НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Кузьо Тарас Володимирович

УДК 524.7+524.8

МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛЬНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ У МІЖЗОРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача Національної академії наук України.

Науковий керівник:	доктор фізико-математичних наук,
	старший науковий співробітник
	Петрук Олег Леонідович,
	Інститут прикладних проблем механіки і ма-
	тематики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
	провідний науковий співробітник.
Офіційні опоненти:	доктор фізико-математичних наук,
	старший науковий співробітник
	Гнатик Богдан Іванович,
	Астрономічна обсерваторія Київського
	національного університету імені Тараса
	Шевченка МОН України,
	провідний науковий співробітник;
	доктор фізико-математичних наук,
	старший науковий співробітник
	Мелех Богдан Ярославович,
	Львівський національний університет
	імені Івана Франка МОН України,
	завідувач кафедри астрофізики.

Захист відбудеться «14» грудня 2021 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано «9» листопада 2021 р.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 кандидат фізико-математичних наук

I.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження залишків Наднових зір (ЗН) є джерелом інформації про високоенергетичні процеси, вивчення багатьох з яких є неможливим у лабораторних умовах. Спостереження залишків Наднових у різних діапазонах електромагнітного спектру дають змогу дослідити властивості сильних нерелятивістських ударних хвиль (УХ), навколозоряного та міжзоряного середовища (МЗС), міжзоряного магнітного поля (МП) і космічних променів (КП). Важливим недослідженим аспектом вивчення динаміки УХ є поведінка і роль МП, оскільки більшість сучасних теоретичних моделей і симуляцій обмежуються тільки гідродинамічним описом течії. З появою нових деталізованих спостережуваних даних з тривалою експозицією виникає потреба у розробці точніших і адекватніших моделей астрофізичних об'єктів.

На сьогодні відомо всього декілька молодих ЗН з віком меншим за 1000 років. Більше того, у розподілі спостережуваних молодих ЗН за віком є досить великі часові проміжки, які не дозволяють чітко відтворити повний перебіг їх еволюції. Таким чином, чисельні експерименти мають дуже важливе значення для отримання інформації про перетворення Наднової на залишок Наднової, про фізичні явища за фронтом ударної хвилі, які виникають на цьому етапі, а також про особливості зорі-попередниці вибуху. Суттєвим у багатьох механізмах генерації електромагнітного випромінювання ЗН є магнітне поле. Тому знання про його еволюцію в молодих ЗН та вплив на течії з УХ є актуальними, однак досі вони ще не були систематично досліджені.

Спостереження ЗН у гамма-діапазоні підтвердили теоретичні припущення про те, що ці об'єкти справді прискорюють космічні промені до енергій $\sim 10^{17}$ eB. Існує два типи механізмів, за допомогою яких можна пояснити спектри випромінювання таких гамма-квантів: зумовлені релятивістськими електронами (лептонний) або протонами (адронний). Для адронного випромінювання суттєвою є висока концентрація протонів-мішеней, з якими взаємодіють протони, прискорені ударною хвилею ЗН. Такі умови природно виникають у випадку, коли УХ взаємодіє з молекулярною хмарою. Проте в такому сценарії УХ починає гальмуватися, а температура плазми за її фронтом зменшується. Внаслідок цього збільшуються радіаційні втрати плазми, які суттєво модифікують властивості течії за фронтом УХ.

Тому актуальною є розробка теорії формування радіаційних ударних хвиль з врахуванням ролі магнітного поля, оскільки такі УХ здатні підвищити концентрацію протонів у сотні разів, що буде достатнім для генерації потоків адронного гамма-випромінювання, які можна буде детектувати. Окрім цього, підвищення напруженості МП зменшує потоки гамма-квантів від тих самих областей, зумовлені конкуруючим до адронного випромінюванням електронів через обернений ефект Комптона, тобто робить адронний механізм домінуючим.

Отже, з одного боку, застосовувати широко вживану адіабатичну модель до пост-адіабатичного залишка уже не можна, оскільки радіаційні втрати порушують умову адіабатичності і починають суттєво впливати на динаміку і структуру ударної хвилі. З іншого боку, в області УХ ще не сформувалася тонка холодна щільна оболонка, яка є необхідною складовою наступного етапу в описі еволюції залишків Наднових зір – радіаційної стадії; тому відома модель повністю радіаційних ударних хвиль також не застосовна. Відтак була обґрунтована потреба в запровадженні в теоретичний опис еволюції залишків Наднових нової пост-адіабатичної стадії, на якій УХ є частково радіаційною, та показано, що нехтувати цією стадією не можна, оскільки її тривалість співмірна з тривалістю адіабатичної стадії.

Сам процес вильоту космічних променів з ЗН у МЗС, на противагу добре розробленим моделям прискорення КП у ЗН, є ще не до кінця вивченим. Отже, важливим є пошук фізичних механізмів, які дозволяють пояснити спостережувані особливості спектрів космічних променів, для чого потрібно дослідити властивості спектрів частинок, прискорених на УХ, а також тих, які залишили область прискорення, вилетівши у МЗС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися під час навчання в магістратурі на кафедрі астрофізики фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка та навчання в аспірантурі у відділі диференціальних рівнянь і теорії функцій Інституту прикладних проблем механіки і математики (ІППММ) ім. Я. С. Підстригача НАН України.

Представлені в дисертації дослідження виконувалися у межах наступних наукових тем ІППІММ ім. Я. С. Підстригача: «Алгебро-геометричні методи дослідження інваріантних структур на многовидах та релятивістських рівнянь математичної і теоретичної фізики» (№ держреєстрації 0110U004819, 2011–2015 рр.), «Розвиток методів дослідження структур на многовидах, асоційованих з групами, алгебрами і графами, та розвиток геометричного аналізу стосовно теорії релятивістських полів і часток» (№ держреєстрації 0115U007253, 2016–2019 рр.), «Розвиток та застосування топологічних, диференціально-геометричних, аналітичних і числових методів дослідження рівнянь теорії фізичних полів і руху часток у ріманових просторах» (№ держреєстрації 0120U100496, 2020–2024 рр.), а також проєктів комплексної цільової програми НАН України «Грід-інфраструктура і грід-технології для наукових і науково-прикладних застосувань»: «Розв'язання задач астрофізики високих енергій, космології та матеріалознавства і нанофізики з використанням кластера та грід-інфраструктури» (№ держреєстрації 0115U002936, 2015 р.), «Чисельні симуляції еволюції залишків молодих Наднових зір як можливих об'єктів спостережень мережею черенковських телескопів СТА, поляризаційні карти та гамма випромінювання залишка Наднової 1006 року» (№ держреєстрації 0118U004780, 2018 р.).

Крім того, було отримано гранти від консорціуму CINECA (Італія) на комп'ютерні обчислювальні ресурси у рамках проєктів «Interactions of supernova remnants with molecular clouds» (HP10CKMKX1, 2016 р.) і «Supernova remnant evolution in the nonuniform outskirts of molecular clouds» (HP10CR7V42, 2017 р.).

В усіх цих темах автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Дисертаційна робота присвячена чисельному магніто-гідродинамічному (МГД) моделюванню еволюції ЗН з метою вивчення динаміки сильних нерелятивістських УХ на перехідних стадіях та в неоднорідних середовищах і визначенню ролі магнітного поля у динаміці потоків космічної плазми з сильними УХ. Для її досягнення було поставлено такі задачі:

- дослідити вплив МП на динаміку ЗН;
- здійснити МГД-моделювання перехідного етапу еволюції ЗН від адіабатичної до радіаційної стадії;
- здійснити МГД-моделювання ранніх етапів еволюції ЗН;
- вивчити вплив різних орієнтацій напруженості міжзоряного магнітного поля відносно нормалі до поверхні УХ на поведінку течії та МП за її фронтом;
- здійснити МГД-моделювання еволюції ЗН у середовищах з неоднорідним розподілом густини та напруженості МП;
- вивчити відмінності між спектрами космічних променів, прискорених на УХ всередині ЗН, та тих, які вилетіли у МЗС;
- розробити і застосовувати метод визначення напруженості магнітного поля у залишку Наднової 1006 року за картами поверхневої яскравості ЗН у різних діапазонах електромагнітного спектру.

Об'ект дослідження: залишки Наднових зір, їх ударні хвилі та магнітне поле на різних етапах еволюції. Предмет дослідження: властивості та еволюція магніто-гідродинамічних характеристик течій плазми з сильними ударними хвилями.

Методи дослідження. Методами дослідження є чисельне моделювання, узагальнення та інтерпретація результатів, порівняння отриманих результатів з даними спостережень.

Наукова новизна отриманих результатів.

- 1. Вперше систематично вивчено роль МП у динаміці нерелятивістських УХ впродовж всього часу їх існування на прикладі ЗН.
- 2. Вперше досліджено роль МП на ранніх етапах еволюції ЗН та вказано на необхідність розгляду додаткового етапу у типовій схемі еволюції ЗН.
- Вперше досліджено еволюцію ЗН на пост-адіабатичній стадії з врахуванням магнітного поля, показано визначальний вплив напряму та напруженості МП на рух УХ та динаміку газу за фронтом УХ в таких ЗН.
- Вперше показано, що на пост-адіабатичній стадії еволюції тангенціальний компонент напруженості МП перешкоджає ефективній компресії плазми за фронтом УХ, тоді як радіальний компонент різко послаблюється у цій області.
- 5. Вперше вивчено особливості МГД-еволюції молодих та пост-адіабатичних ЗН у середовищах з неоднорідними розподілами густини та напруженості МП.
- Вперше показано, що еволюція ЗН у середовищах зі зростаючими розподілами густини пришвидшує перебіг їх еволюційних стадій та перехід до пост-адіабатичного режиму.
- 7. Вперше розроблено модельно-незалежний спосіб оцінки напруженості магнітного поля у ЗН з білатеральною морфологією.
- Вперше виявлено відмінності між формами спектрів КП всередині ЗН та тих, які залишили область прискорення на УХ, зумовлені бомівським коефіцієнтом дифузії та коефіцієнтом дифузії, що виникає внаслідок самоузгодженої альвенівської турбулентності.
- 9. Розвинуто і реалізовано чисельний підхід до моделювання астрофізичних систем з розривами параметрів течії та магнітним полем протягом тривалого періоду часу, який охоплює їх повну еволюцію.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані для інтерпретації даних спостережень, застосовані для моделювання спостережуваних ЗН, а також як основа для подальших тривимірних моделювань та вдосконалення теоретичного опису еволюції ЗН.

Одержані в дисертації результати можуть бути застосовані в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача, Головній астрономічній обсерваторії НАН України, Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, а також в наукових установах інших країн.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень. Результати чисельних моделювань у граничних випадках еволюційних стадій ЗН повністю узгоджуються з відомими аналітичними розв'язками, а у гідродинамічній границі (за слабкого МП) цілком узгоджуються з результатами чисельних моделювань інших авторів.

Результати роботи опубліковано у фахових реферованих журналах та апробовано на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладені в роботах [1–5], які опубліковано у співавторстві з науковим керівником. Зокрема, автору належить наступне:

У роботі [1] автор застосував запропонований науковим керівником метод до спостережуваних даних ЗН 1006 року для визначення напруженості міжзоряного МП у околі залишку і отримав ключовий результат статті.

У роботах [2, 3] автором самостійно проведено масивні чисельні симуляції, отримано та оброблено усі результати моделювання, крім того, автор брав участь у тестуванні чисельних алгоритмів, постановці задачі для роботи [3], інтерпретації та обговоренні результатів, написанні обох статтей.

У роботі [4] автор брав участь у побудові чисельної схеми, тестуванні кодів, чисельній реалізації поставленої задачі, аналізі та інтерпретації отриманих результатів.

У роботі [5] автор дисертації брав безпосередню участь у постановці задачі, підготував огляд літератури, провів усі масивні числові моделювання та брав участь у написанні статті, аналізі і описі отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися та обговорювались на наступних міжнародних конференціях:

 – XIX–XXII, XXIV Міжнародні конференції молодих вчених з астрономії та фізики космосу, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2012–2015, 2017 рр., Київ, Україна,

- Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу» в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, 2016– 2020 рр., Київ, Україна,
- VII–VIII Міжнародні наукові конференції пам'яті Б. Бабія «Вибрані питання астрономії та астрофізики», 2014, 2016 рр., Львів, Україна,
- Міжнародна математична конференція ім В. Скоробогатька, 2015, Дрогобич, Україна,
- Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми механіки та математики», 2018, Львів, Україна,
- Міжнародна наукова конференція XMM-Newton: The Next Decade, 2016, Мадрид, Іспанія,
- Міжнародна наукова конференція Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar death, 2016, Крит, Греція,
- 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, 2016, Гайдельберг, Німеччина,

а також на наукових семінарах Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка та відділу диференціальних рівнянь і теорії функцій Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 5 статтях у фахових журналах [1–5], одній статті у інших виданнях [6] та 26 тезах конференцій [7-32].

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та одного додатку. Загальний обсяг тексту роботи становить 157 сторінок. Текст роботи містить 2 таблиці, 58 рисунків та 136 найменувань у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та основні задачі, описано методи, які необхідні для розв'язання поставлених завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок автора і рівень апробації результатів.

У першому розділі подано огляд літератури, де висвітлено сучасні дані щодо вивчення залишків Наднових зір та фізичних процесів, які супроводжують їх еволюцію. Проаналізовано рівняння магнітної гідродинаміки та їх застосування до опису еволюції залишків Наднових. Розглянуто основні механізми спалахів Наднових зір та їх класифікацію за спостережуваними особливостями.

Значну увагу приділено опису гідродинамічних моделей для різних стадій еволюції ЗН та вказано на потребу розгляду магнітного поля при моделюванні еволюції ЗН, адже у деяких випадках воно має суттєвий вплив на динаміку течії за фронтом УХ.

Також розглянуто основні програми для МГД-моделювання та описано особливості алгоритмів для чисельного розв'язування рівнянь магнітної гідродинаміки для течій астрофізичної плазми з сильними ударними хвилями.

У розділі 2 «Магнітна гідродинаміка залишків Наднових на ранніх стадіях еволюції» подано результати МГД-моделювання переходу від спалаху Наднової зорі до залишку Наднової. Отримано та досліджено поведінку магнітного поля всередині молодих ЗН, динаміку УХ та характеристики гідродинамічних параметрів за фронтом УХ. Оскільки вивчення ЗН може бути суттєвим джерелом інформації про зорю-попередницю, то дослідження переходу між Надновою та її залишком є важливою ланкою для встановлення взаємозв'язку між ними.

Автором досліджено перехід від ранньої стадії вільного розлітання до чітко вираженої сєдовської стадії, а також роль МП у цьому переході. Розглянуто три основні типи Наднових: SN Ia (термоядерний вибух білого карлика у подвійній системі), SN Ic та SN IIP (колапс ядра масивної зорі), які дозволяють охопити широкий спектр типових характеристик Наднових. Симуляції здійснювалися для одновимірних сферично-симетричних моделей в однорідному і неоднорідному середовищах з високою роздільною здатністю та початковими умовами, описаними у [46]. Усі моделювання здійснено за допомогою МГД-коду Pluto [40], який використовується для інтегрування систем МГД-рівнянь у частинних похідних з розривами параметрів.

Після спалаху Наднової формується структура, обмежена передньою ударною хвилею, яка поширюється у навколозоряному середовищі, згрібає і нагріває міжзоряний газ. Крім того, зворотна УХ рухається крізь зоряний викид всередину залишку у системі відліку, яка пов'язана з передньою УХ.

Важливим індикатором еволюційного стану ЗН є параметр сповіль-

нення, який визначається як

$$m = \frac{d\log R}{d\log t} = \frac{tV}{R},$$

де R – радіус УХ, V – швидкість УХ, t – час з моменту вибуху. Параметр сповільнення відповідає змінному показнику степеня у залежності радіуса УХ від часу: $R \propto t^m$.

Червона крива на рис. 1 показує еволюцію радіуса R, швидкості V та параметра сповільнення m для передньої і зворотної УХ (модель SN Ia, у якій залишок еволюціонує в однорідному навколишньому середовищі). Видно, що передня УХ розширюється майже як $R \propto t$ (тобто з $m \approx 1$) для дуже ранніх часів (рис. 1а). Вона сповільнюється з невеликим темпом до ~ 3 р., після чого сповільнення посилюється, поки не досягається сєдовська стадія з $R \propto t^{2/5}$ (m = 0.4) приблизно у той самий час, коли зворотна УХ досягає центра залишку.

Подібні особливості видно і в еволюції залишків Наднових з колапсом ядра: (рис. 1, синя і зелена крива). На ранньому етапі швидкості передньої і зворотної УХ для моделей SN Іс та SN IIP описуються розв'язками [37] та [41]:

$$V \propto t^{(s-3)/(n-s)}.$$

тобто, $V \propto t^{-1/9}$ для n = 11, s = 2 (так, як на рис. 16 для зеленої кривої до 200 р.) і $V \propto t^{-1/3}$ для n = 9, s = 0 (синя крива між 20 і 1000 р.). Також у цих випадках передня УХ починає рухатися у сєдовському режимі (значення m наближається до 0.4) після того, як зворотна УХ повертається до центра. Залишки цього типу еволюціонують у середовищі з густиною $\rho_0 \propto r^{-2}$, тому сам перехід на сєдовську стадію відбувається дещо пізніше (передня УХ зазнає меншого сповільнення) порівняно з моделлю SN Іа, де розширення відбувається в однорідному середовищі (рис. 1а).

Суттєво, що період переходу ЗН з ранніх стадій еволюції (з постійним, близьким до одиниці m) до сєдовської (m = 0.4) триває значну частку тривалості самої сєдовської стадії. Наприкінці цього періоду взаємодія з МЗС домінує над впливом структури зоряного викиду (а, відповідно, і особливостями зорі-попередниці) при визначенні характерних рис еволюції ЗН. Всі три моделі, незважаючи на суттєві відмінності у початкових розподілах зоряного викиду, збігаються до однакових еволюційних шляхів після 7 000 р., оскільки динаміка ЗН на цьому етапі вже повністю визначається взаємодією з навколишнім середовищем.



Рис. 1: Характеристики динаміки ЗН з різними моделями вибуху: еволюція радіуса (а) та швидкості (б) передньої (суцільна лінія) та зворотної (штрихова лінія) УХ та зміна параметра сповільнення з часом (в).

Рис. 2 дає глибше розуміння процесу переходу від ранніх стадій до сєдовського режиму розлітання: на ньому зображено еволюцію окремих компонентів енергії у залишку. Можна чітко бачити відмінну рису перехідної стадії: перерозподіл енергії вибуху (яка спочатку перебувала у формі кінетичної енергії розльоту матеріалу зорі) в окремі компоненти з фіксованим відношенням між тепловою і кінетичною.

Енергія вибуху Наднової (блакитна штрих-пунктирна лінія) переходить у енергію згребеного матеріалу зорі (крапкові лінії) та згребеного M3C (штрихові лінії). Енергія збуреного зворотною УХ зоряного викиду є здебільшого кінетичною (ліва панель на рис. 2). Вона зростає до певного максимального значення (приблизно на момент часу, коли кінетична енергія незбуреного викиду складає 25% повної енергії) і тоді спадає до нехтовно малого значення (коли зворотна УХ починає рухатися назад у системі відліку зовнішнього середовища).

З часом, більшість початкової енергії переходить у згребений ударною хвилею міжзоряний газ. Енергія згребеного МЗС розподілена між тепловим і кінетичним компонентами, а їх співвідношення прямує до сталого значення, яке для моделі Сєдова в однорідному середовищі складає 2.54 [44]. Крім того, це відношення є сталим і для автомодельних розв'язків [37], які описують еволюцію одразу після спалаху Наднової (до прикладу, 0.6 для s = 2 і 1 для s = 0).

Для кожної моделі вибуху ми проводили симуляції для двох конфігурацій МП: радіального і тангенціального. Результати показують, що для молодих ЗН магнітне поле з типовою для молодих ЗН напруженістю не впливає на гідродинаміку течій плазми. У структурі тангенціального МП за фронтом УХ виділяються два регіони, які просторово відповідають розташуванню збуреного викиду зорі та збуреного середовища. Розподіл тангенціального МП зазнає розриву і стрибка на фронті передньої УХ, а також демонструє різкий пік на зоні контактного розриву, що розмежовує зоряний викид і збурене середовище. Просторовий розподіл напруженості тангенціального МП еволюціонує подібно до густини. Для випадку радіального МП, його напруженість є завжди меншою за значення перед фронтом. Таку поведінку МП, виявлену в чисельних симуляціях, підтверджено аналітичними аргументами.

Підсумовуючи, період між стадією вільного розлітання і сєдовською стадією є достатньо тривалим і характеризується низкою відмінних рис, зокрема перетворенням компонентів енергії у різних областях залишку, тому є сенс враховувати його як окрему перехідну стадію при описі еволюції ЗН.

Результати розділу опубліковані в статті [5] та тезах конференцій



Рис. 2: Еволюція компонентів енергії у ЗН з різними моделями вибуху: Іа (зверху), Іс (посередині), ПР (внизу). Графіки ліворуч відображають кінетичний (сині криві) та тепловий (зелені криві) компоненти енергії. Праворуч показано повну енергію ЗН (сума кінетичного і теплового компонентів). Суцільні лінії відповідають цілому об'єму ЗН, штрихові лінії – енергіям у області між передньою ударною хвилею і зоною контактного розриву, крапками позначено область між зоною контактного розриву і зворотною УХ, штрих-пунктирна лінія відповідає області між центром ЗН і зворотною УХ.

[18, 24-32].

У розділі З «Пост-адіабатичні залишки Наднових у міжзоряному магнітному полі» подано результати моделювання еволюції ЗН при переході від сєдовської (адіабатичної) до радіаційної стадії. Показано визначальний фактор міжзоряного МП у еволюції ЗН, коли умова адіабатичності порушується. Досліджено вплив орієнтації зовнішнього МП на характер еволюції ЗН, а також досліджено вплив середовища з неоднорідним розподілом густини та МП на залишок.

Еволюція ЗН на пост-адіабатичній стадії супроводжується зростанням ролі радіаційних втрат, що суттєво змінює структуру течії за фронтом УХ. Очікується, що завдяки зміні конфігурації течії плазми суттєво збільшиться частка гамма-променів, які мають адронну природу (через збільшення концентрації протонів-мішеней і зменшення лептонних гамма-променів). Таким чином, пост-адіабатичні ЗН можна розглядати як потенційні джерела адронних гамма-променів.

Наявні моделі пост-адіабатичних ЗН не враховують вплив міжзоряного МП на структуру течії [35, 38], тоді як зростання густини за фронтом за рахунок радіаційних втрат призводить до зростання фактора компресії УХ і, як наслідок, зростання напруженості МП одразу за фронтом. Густина енергії МП при цьому може бути співмірною з густиною теплової енергії ЗН.

Автором здійснено МГД-моделювання сферично-симетричних ЗН з різними конфігураціями МП: радіальним (паралельна УХ), тангенціальним (перпендикулярна УХ) та проміжними значеннями кута між МП і нормаллю до УХ. Використано такі ж початкові умови як у [35] з функцією нерівноважного охолодження плазми, описаною у [45].

Результати моделювання показали, що магнітне поле, яке орієнтоване паралельно до напряму руху УХ, не впливає на її динаміку, тоді як для тангенціального поля ситуація суттєво відрізняється – напруженість поля зростає за фронтом і сильно модифікує структуру течії ЗН.

Рис. За показує еволюцію параметра сповільнення для паралельної і перпендикулярної УХ. Видно, що пост-адіабатична УХ менше сповільнюється при вищих значеннях напруженості МП. Також значення m на радіаційній стадії є вищим за очікуване значення у звичайній гідродинамічній моделі $m \approx 0.3$ і навіть може наближатися до сєдовського значення 0.4 для достатньо сильного магнітного поля B_o (рис. 3а, помаранчева штрихова лінія).

На рис. Зб зображено еволюцію ефективної компресії газу в оболонці за фронтом УХ. Видно, що з настанням пост-адіабатичної ста-



Рис. 3: Вплив магнітного поля на динаміку УХ з радіаційними втратами. Показано залежність параметра сповільнення (а) та максимальної густини газу в оболонці за фронтом УХ (б) від часу. Криві для паралельної УХ мають однаковий вигляд незалежно від значення напруженості МП.

дії щільна оболонка при МП, вищому за $B_{o\perp} = 10$ мкГс, не формується взагалі, оскільки тиск МП є достатньо високим, щоб компенсувати втрати теплового тиску за рахунок радіаційних втрат. Це обмежує компресію газу до 10, тоді як для паралельної УХ чи слабкого тангенціального МП значення компресії газу досягає кількох сотень.

Розрахунки показують, що існують два незалежні канали перерозподілу енергії: тепловий компонент переходить у радіаційний, а кінетичний – у магнітний. Енергія тангенціального компонента МП зростає з часом і може досягнути значної частки повної енергії ЗН. Радіаційні втрати відбуваються за рахунок падіння теплової енергії, навіть коли МП є достатньо сильним.

Просторові розподіли характеристик течії показано на рис. 4 на момент часу після першого мінімуму параметра сповільнення *m*. На радіальних профілях видно, що товщина оболонки газу відразу за фронтом УХ зростає зі збільшенням напруженості тангенціального МП. Крім того, наявність тангенціального МП стримує компресію, тобто густину газу в оболонці: густина є меншою для більшого значення напруженості МП. Також фронт УХ більше просувається вперед за наявності тангенціального МП – ефект посилюється зі збільшенням цього компонента (рис. 4а).

Для встановлення залежності розподілів параметрів течії від орієнтації зовнішнього МП, ми зробили 'реконструкцію' двовимірних поперечних перерізів ЗН. Для цього було скомбіновано набір одновимірних моделей з різною орієнтацією МП (рис. 5). Кожен профіль розташо-



Рис. 4: Просторовий розподіл параметрів течії за фронтом перпендикулярної УХ на момент часу $t = 70\ 000$ р.: густина (а), швидкість (б), тепловий тиск (в) та магнітний тиск (г). Криві для паралельної УХ співпадають з результатами для $B_o = 0$ мкГс.

ваний під кутом, який утворює зовнішнє МП та нормаль до поверхні УХ для конфігурації відповідної моделі. На рисунках чітко видно, що магнітне поле впливає на структуру течії у областях, де β плазми (відношення густин магнітної і теплової енергій) зростає вище за одиницю (рис. 5б). Тому до настання суттєвих радіаційних втрат, β плазми залишається відносно малим по всьому об'єму залишку і зростає за рахунок збільшення компресії за фронтом УХ внаслідок радіаційних втрат. Оскільки фактор компресії залежить від орієнтації МП, то характеристики профілів за течією плавно змінюються зі зміною кута.

Радіальний компонент МП (рис. 5в) різко спадає вниз за течією: чим меншим є кут між МП та нормаллю до УХ, тим меншою є товщина оболонки за фронтом УХ, де активно відбуваються радіаційні втрати, а, отже, і падіння радіального МП є більш різким за фронтом УХ.

Компресія тангенціального компонента МП призводить до його до-

14



Рис. 5: Залежності густини (а), β плазми (б), радіального (в) та тангенціального (г) компонентів МП всередині ЗН від кута між зовнішнім МП та нормаллю до поверхні УХ для моментів часу 53 000 (ліва сторона кожної панелі) і 70 000 р. (права сторона кожної панелі). Зовнішнє МП напруженістю $B_{\rm o} = 10$ мкГс спрямоване вздовж горизонтальної осі. Внутрішні частини профілів не показано з метою виділити кольорову шкалу структури течії в області за фронтом.

мінування за фронтом УХ пост-адіабатичних ЗН для широкого діапазону орієнтацій зовнішнього МП (рис. 5г). Це може пояснювати спостережувані дані радіополяризації старих ЗН, в яких домінує тангенціальна орієнтація.

Іншим аспектом дослідження еволюції пост-аіабатичних ЗН є вплив великомасштабних градієнтів густини і напруженості МП у МЗС. Автором встановлено, що наявність додатних градієнтів густини на шляху ударної хвилі (наприклад, молекулярних хмар), пришвидшує перебіг еволюційних стадій, тобто настання радіаційної стадії відбувається раніше, ніж у випадку еволюції в однорідному середовищі. Цікавим наслідком наявності градієнта густини є перемасштабування еволюції ЗН у часі в залежності від масштабного фактора градієнта густини, а також просторового масштабування структур за фронтом ЗН. Після мінімуму у залежності параметра сповільнення m від часу (рис. 3) газ у оболонці за фронтом не може досягнути високих значень компресії через тиск магнітного поля, яке протидіє компресії. Роль тангенціального компонента МП зменшується для більших градієнтів густини середовища, коли УХ зазнає більшого сповільнення. Це відбувається тому, що інформація про сповільнення УХ доходить до внутрішніх шарів з затримкою, і вони сильніше налітають на фронт УХ. Також зі сильнішим сповільненням більше падає температура за фронтом, що призводить до більших радіаційних втрат і, як наслідок, до ще більшої компресії в оболонці за фронтом.

Наявність градієнта напруженості МП не впливає на темпи перебігу еволюції ЗН, на відміну від градієнта густини. Проте зі зростанням зовнішнього МП у напрямі руху УХ, напруженість поля за фронтом тангенціального МП зростає, що виражається у домінуванні магнітного тиску за фронтом УХ, що в свою чергу запобігає компресії газу у оболонці біля фронту і збільшує її товщину.

Оскільки градієнт густини пришвидшує настання пост-адіабатичної стадії, а наявність тангенціального компонента МП послаблює компресію газу в оболонці за фронтом, то ці явища відіграватимуть ключову роль у моделюванні прискорення космічних променів, які є джерелом гамма-випромінювання від ЗН, що взаємодіють з молекулярними хмарами.

Результати розділу опубліковані в статтях [2, 3] та тезах конференцій [9, 10, 13–17, 19–23].

У розділі 4 «Прискорення космічних променів у пост-адіабатичних залишках Наднових» подано результати дослідження спектрів КП у адіабатичних і пост-адіабатичних ЗН.

Відомо, що ЗН є одними з основних джерел галактичних КП [34] і хоча на сьогодні прискорення КП в ЗН добре вивчене, сам процес вильоту високоенергетичних КП за межі ЗН у МЗС все ще до кінця не зрозумілий.

В роботі здійснено сферично-симетричні моделювання прискорення і вильоту КП у адіабатичних і пост-адіабатичних ЗН, для чого одночасно розв'язувалися рівняння переносу для космічних променів і магнітної гідродинаміки течії космічної плазми. Еволюція спектру КП досліджувалася для двох сценаріїв: бомівської дифузії у зовнішньому МП напруженістю 5 мкГс і коефіцієнта дифузії, отриманого для самоузгодженого посилення альвенівських турбулентностей [36]. Усі симуляції виконані у наближенні тестової частинки, тобто за припущення, що тиск КП не впливає на гідродинаміку течії плазми.

Для бомівської дифузії спектр всередині ЗН має стандартну сте-

пеневу форму з індексом s = 2 на всіх стадіях еволюції, з обрізанням в околі максимальної енергії. При переході від сєдовської до постадіабатичної стадії максимальна енергія спадає від 20 до 5 TeB.



Рис. 6: Спектр протонів у моделі альвенівської дифузії для різних моментів часу. Суцільні лінії відповідають повному спектру, штрихові лінії відображають спектр частинок всередині ЗН (за фронтом УХ), а крапкові – спектр частинок, які покинули ЗН (перед фронтом УХ).

Для високоенергетичних частинок неефективне утримання альвенівським режимом дифузії призводить до різкого зменшення їх кількості на фронті УХ, що, у свою чергу, призводить до формування зламу спектру поблизу діапазону енергій 10–100 ГеВ. Рис. 6 показує компоненти повного спектру (перед і після фронту УХ) за альвенівської дифузії для кількох моментів часу у проміжку від початку сєдовської до пост-адіабатичної стадії. Видно, що значення нормування спектру зростає з часом, оскільки зі сповільненням УХ відбувається інжекція на нижчих енергіях з більшою кількістю частинок.

У спектрі КП за фронтом УХ немає переходу від степеневого розподілу з s = 2 до експоненційного обрізання (як у випадку бомівської дифузії), а натомість спостерігається злам до степеневого спектру з показником s = 2.7 (рис. 6, зелена штрихова крива). Так, для моменту часу 60 000 р. на ділянці до $\log (p/m_{\rm p}c) < 1$ спектральний індекс має значення 2, для $1 < \log (p/m_{\rm p}c) < 4$ – значення 2.7 і при $\log (p/m_{\rm p}c) > 4$

маємо експоненційне обрізання. Така структура спектру подібна до спостережуваних особливостей в ЗН W44 та IC 443 [34].

Повний спектр КП, як правило, відрізняється від спектру частинок за фронтом УХ (який відповідає за детектоване від об'єкта випромінювання). Розрахунок повного спектру КП, враховуючи частинки, які покинули ЗН, також виявив злам спектру з s = 2.4 для високих енергій (рис. 6 суцільна зелена крива). Така поведінка перебуває у непоганій узгодженості зі спектром інжекції у моделі галактичного поширення КП, а саме, s = 2 для низьких енергій і злам до $s \approx 2.4$ вище 10 ГеВ. Таким чином, спектральний індекс для частинок, які покинули ЗН, є більш жорстким, ніж спектр КП всередині ЗН. Альвенівська модель дифузії адекватніше описує спостережувані особливості спектрів КП від ЗН.

Результати розділу опубліковані в статті [4].

У розділі 5 «Напруженість міжзоряного магнітного поля у залишку Наднової 1006 року» описано метод оцінки напруженості МП у ЗН, які мають білатеральну морфологію, з їх спостережуваних карт поверхневої яскравості у радіо-, рентгенівському і гаммадіапазонах, а також подано результати застосування методу до ЗН 1006.

Залишок Наднової 1006 року добре підходить для досліджень фізики КП. Його відмінною особливістю є доволі симетрична морфологія з двома лімбами у радіо [42], нетепловому рентгенівському [39] та ТеВ гамма [33] діапазонах. Просторове розташування двох яскравих лімбів є однаковим для нетеплового випромінювання – від радіо до ТеВ гамма-променів (тому морфологію таких ЗН і називають білатеральною).

У [43] розвинено модельно-незалежний метод перевірки спостережуваної кореляції поверхневої яскравості запишку у гамма- і рентгенівських променях як аргумент на користь механізму випромінювання гамма-променів шляхом оберненого ефекту Комптона у ЗН 1006. Ідея методу полягає у тому, що і синхротронне радіо-, і жорстке рентгенівське випромінювання від залишку несе в собі інформацію про зміни кількості і максимальної енергії електронів, прискорених на УХ.

Крім того, у [43] показано, що морфологічні особливості розподілу поверхневої яскравості у модельних гамма-зображеннях ЗН 1006 (шляхом оберненого ефекту Комптона) є подібними до спостережуваних карт у радіо- та рентгенівському діапазонах. Такі кореляції зберігаються для різних просторових конфігурації МП, що також є вагомим додатковим аргументом на користь лептонної природи гамма-променів від ЗН 1006.

Іншою важливою властивістю залишку є те, що його два лімби мають різну поверхневу яскравість. Більше того, відношення між яскравостями лімбів є різним для радіо-, нетеплового рентгенівського та гамма-діапазонів.

Автором показано, що просторове розташування лімбів та контраст їх яскравості залежить від значення напруженості МП. Підхід методу є модельно-незалежним, оскільки базується цілком на даних спостережень, а єдиними припущеннями методу є домінування оберненого ефекту Комптона у гамма-випромінюванні від залишку та форма спектру електронів (що є загальною характеристикою):

$$N(E) = KE^{-s} \exp\left[-\left(E/E_{\max}\right)^{\alpha}\right],$$

де K – нормування спектру, s – спектральний індекс, E_{\max} – максимальна енергія електронів, α – параметр, який регулює швидкість падіння спектру.

Показано, що відношення яскравостей у двох областях-лімбах залишку з однаковим значенням напруженості МП у радіо- (\mathcal{R}_r), рентгенівському (\mathcal{R}_x) та гамма (\mathcal{R}_{ic}) діапазонах наближено можна виразити як

$$\mathcal{R}_{\rm ic} \simeq \mathcal{R}_{\rm r} \left(\frac{\mathcal{R}_{\rm x}}{\mathcal{R}_{\rm r}}\right)^{\xi(B)}, \quad \xi = \frac{\beta_{\rm ic}\beta_{\alpha\rm ic}(c_1B)^{0.37\beta_{\alpha\rm x}}}{\beta_{\rm x}\nu_{\rm x}^{0.37\beta_{\alpha\rm x}}},\tag{1}$$

де B – напруженість МП, $c_1 = 6.26 \times 10^{18}$, ν_x – частота рентгенівського випромінювання,

$$\beta_{\rm ic} = \begin{cases} 15, & \text{for } 2 \le s \le 2.5, \\ 15 + 2(2 - s), & \text{for } 1.8 \le s < 2, \end{cases}$$
$$\beta_{\alpha \rm ic} = 1.08\alpha^2 - 0.3\alpha + 0.22,$$
$$\beta_{\alpha \rm x} = \alpha(1.24 - 0.24\alpha).$$

Отримавши значення $\mathcal{R}_{\rm r}$, $\mathcal{R}_{\rm x}$ та $\mathcal{R}_{\rm ic}$ зі спостережень, можна зробити оцінку на значення МП у залишку. Наприклад, якщо взяти типові значення $s = 1.8 \div 2.2$, $\alpha = 1$ і $\nu_{\rm x} = 2.4$ кеВ, то тоді $\xi = 0.15 B_{\mu}^{0.37}$, де B_{μ} – напруженість МП у мкГс.

Визначені зі спостережень, у ЗН 1006 $\mathcal{R}_r = 0.958$ і $\mathcal{R}_x = 1.5$. Залежність відношення яскравостей для гамма-діапазону, отримане з (1) показано на рис. 7. Можна побачити, що для більшого значення напруженості МП, відношення яскравостей у лімбах є більшим.



Рис. 7: Залежність відношення гамма-випромінювання через обернений ефект Комптона \mathcal{R}_{ic} (для 1 ТеВ) від напруженості МП *В* і $\alpha = 1$ (чорний), $\alpha = 0.5$ (зелений), $\alpha = 2$ (синій). Спостережувані значення \mathcal{R}_r , \mathcal{R}_x для суцільних ліній отримано з зображень з високою роздільною здатністю, а штриховим лініям відповідають зображення, згладжені до розділення HESS. Горизонтальні лінії позначають відношення яскравості лімбів у гамма-діапазоні (чорний) та відповідні 1- σ інтервали (червоний) з даних [33].

Спостереження черенковського гамма-телескопа HESS [33] дають діапазон значень $\mathcal{R}_{ic} = 1.32 \pm 0.37$ (горизонтальні лінії на рис. 7).

Отримана залежність відношення яскравостей у гамма-діапазоні міняється досить повільно з ростом B (всього у кілька разів, у той час як B змінюється на кілька порядків), тому цей метод має суттєвий потенціал. Проте відносно великі похибки існуючих на сьогодні спостережуваних даних у гамма-діапазоні не дозволяють визначити напруженість МП у ЗН 1006, оскільки діапазон можливих значень B, через похибку спостережень, – від кількох мікрогаусів до кількох сотень мікрогаусів. Метод можна буде використати у майбутніх дослідженнях, коли точність і роздільна здатність інструментів для спостережень будуть більшими.

Результати розділу опубліковані в статті [1] та тезах конференцій [7, 8, 11, 12].

Додаток А містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було досліджено вплив магнітного поля на різних стадіях еволюції залишків Наднових зір – від вільного розлітання одразу після вибуху Наднової до пізньої радіаційної стадії на завершальному етапі існування ЗН. Проаналізовано характерні особливості перехідних фаз між класичними стадіями еволюції ЗН та досліджено вплив МП на процеси нетеплового випромінювання ЗН.

Основні результати дисертаційної роботи:

- 1. Розвинуто і реалізовано чисельний підхід до МГД-моделювання астрофізичних систем з розривами параметрів та магнітним полем впродовж тривалого періоду часу, який охоплює їх повну еволюцію.
- 2. Проведено повне МГД-моделювання ранньої еволюції ЗН для типових сценаріїв вибухів Наднових: Іа, Іс та ІІР. Досліджено перехід між класичними стадіями вільного розлітання і сєдовською. Показано характерні ознаки, коли модель вільного розлітання уже, а модель Сєдова ще не можуть бути застосовані. Визначено динаміку МІІ та компонентів енергії різних частин залишку і показано їх роль у модифікації структури течії за фронтом УХ.
- 3. Проведено повне МГД-моделювання еволюції ЗН від сєдовської до чітко вираженої радіаційної стадії. Показано визначальну роль магнітного поля у динаміці УХ та формуванні структури течії за фронтом таких пост-адіабатичних ЗН. Досліджено поведінку магнітного поля і залежність параметрів течії в об'ємі ЗН від орієнтації МП.
- Досліджено еволюцію пост-адіабатичних ЗН у середовищах з неоднорідним розподілом густини та/або магнітного поля. Визначено вплив масштабних факторів градієнтів густини та МП у зовнішньому середовищі на особливості перебігу еволюції ЗН.
- 5. Виявлено необхідність введення у загальноприйнятий теоретичний опис еволюції ЗН двох нових стадій, а саме, проміжних між стадією вільного розлітання і сєдовською та між сєдовською і радіаційною.
- 6. Досліджено особливості спектрів КП від пост-адіабатичних ЗН у магніто-гідродинамічній моделі.
- Розроблено метод визначення напруженості магнітного поля у ЗН з білатеральною морфологією на основі карт поверхневої яскравості у різних діапазонах і застосовано його для оцінки напруженості МП у ЗН 1006.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, опубліковані у фахових реферованих виданнях

- Petruk O. Constraints on magnetic field strength in the remnant SN 1006 from its non-thermal images / Petruk O., Kuzyo T., Bocchino F. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2012. – V. 419. – P. 608P.
- Petruk O. Post-adiabatic supernova remnants in an interstellar magnetic field: parallel and perpendicular shocks / Petruk O., Kuzyo T., Beshley V. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2016. – V. 456. – P. 2343.
- Petruk O. Post-adiabatic supernova remnants in an interstellar magnetic field: oblique shocks and non-uniform environment / Petruk O., Kuzyo T., Orlando S., et al. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2018. – V. 479. – P. 4253.
- Brose R. Cosmic-ray acceleration and escape from post-adiabatic supernova remnants / Brose R., Pohl M., Sushch I., Petruk O., Kuzyo T. // Astron. and Astrophys. – 2020. – V. 634 – P. A59.
- Petruk O. Magneto-hydrodynamic simulations of young supernova remnants and their energy-conversion phase / Petruk O., Kuzyo T., Orlando S., Pohl M. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2021. – V. 505. – P. 755.

Публікації в інших виданнях

Бешлей В. Історичні Наднові типу Іа та їх залишки / Бешлей В., Кузьо Т., // Праці Наукового Товарства ім. Шевченка, фізичний збірник – 2014. – том 9. – ст. 190–208.

Публікації у матеріалах та тезах конференцій

- Kuzyo T. Magnetic Field Strength from Nonthermal Images of SN 1006 / Kuzyo T., Petruk O. // 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 26 – May 1, 2010, Kyiv, Ukraine, P. 43.
- Kuzyo T. Properties of interstellar medium and magnetic field around Tycho SNR / Kuzyo T., Petruk O. // 18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held May 2–7, 2011, Kyiv, Ukraine, P. 57.
- Beshley V. Role of magnetic fields in evolution of adiabatic supernova remnants / Beshley V., Kuzyo T., Petruk O. // 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 23–28, 2012, Kyiv, Ukraine, P. 52.

- Kuzyo T. One-dimensional numerical hydrodynamical simulations of the post-adiabatic supernova remnants / Kuzyo T., Beshley V., Petruk O. // 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 23–28, 2012, Kyiv, Ukraine, P. 52.
- Kuzyo T. Gamma-ray image of Tyho SNR / Kuzyo T., Petruk O. // 21st Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 28 – May 3, 2014, Kyiv, Ukraine, P. 28.
- Kuzyo T. The MF strength estimation from the nonthermal X-ray radial proles of Tyho SNR / Kuzyo T., Petruk O., Beshley V. // 22nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 20–25, 2015, Kyiv, Ukraine, P. 42.
- Beshley V. Magnetohydrodynamic simulations of radiative shocks / Beshley V., Petruk O., Kuzyo T. // Міжнародна математична конференція ім В. Я. Скоробогатька, Збірка тез доповідей, 25–28 серпня 2015, Дрогобич, Україна, ст. 13.
- Kuzyo T. Numerical Algorithms and Codes for Radiative Magnetohydrodynamics, / Kuzyo T. // Міжнародна математична конференція ім В. Я. Скоробогатька, Збірка тез доповідей, 25–28 серпня 2015, Дрогобич, Україна, ст. 93.
- 15. Кузьо Т. Магнітогідродинамічне моделювання косих пост-адіабатичних ударних хвиль / Кузьо Т., Петрук О. // Міжнародна конференція Астрономія та фізика космосу у Київському університеті, Збірка тез доповідей, 24–27 травня 2016, Київ, Україна, ст. 29–30.
- 16. Кузьо Т. Пост-адіабатичні залишки Наднових зір у неоднорідному середовищі та неоднорідному магнітному полі / Кузьо Т., Петрук О. // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2016», Збірка тез доповідей, 25–27 травня 2016, Львів, Україна.
- Kuzyo T. Post-Adiabatic Supernova Remnants in the Non-Uniform Interstellar Medium and Magnetic Field / Kuzyo T., Petruk O. // 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 25–30, 2016, Kyiv, Ukraine, P. 30.
- Beshley V. Tycho: ambient medium structure by analysis of the supernova remnant / Beshley V., Dubner G., Kuzyo T., et al. // XMM-Newton: The Next Decade, Proceedings of the Conference held 9–11 May, 2016, Madrid, Spain, P. 72.
- Petruk O. Magnetohydrodynamic simulations of the post-adiabatic supernova remnants in the interstellar magnetic field / Petruk O., Kuzyo T., Beshley V. // Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar death, Proceedings of the Conference held 6–10 June, 2016, Crete,

Greece, P. 56.

- Petruk O. Magneto-hydrodynamic simulations of SNR shocks interacting with molecular clouds / Petruk O., Kuzyo T. // 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma 2016), Proceedings of the Conference held 11–15 July, 2016, Heidelberg, Germany, P. 17.
- Кузьо Т. Тривимірне магніто-гідродинамічне моделювання постадіабатичних залишків Наднових зір / Кузьо Т., Петрук О. // VIII наукова конференція «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвячена пам'яті Богдана Бабія, Збірка тез доповідей, 17–20 жовтня 2016, Львів, Україна, ст. 34–35.
- 22. Kuzyo T. Three-Dimensional Simulations of Post-Adiabatic Supernova Remnants in the Interstellar Magnetic Field / Kuzyo T., Petruk O. // 24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 24–29, 2017, Kyiv, Ukraine, P. 35.
- 23. Кузьо Т. Застосування методу скінченних об'ємів для розв'язування рівнянь магнітної гідродинаміки у астрофізиці / Кузьо Т., Петрук О. // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2017», Збірка тез доповідей, 23–25 травня 2017, Львів, Україна.
- 24. Kuzyo T. Three-Dimensional MHD Simulations of SNR Evolution / Киzyo T., Petruk O. // Міжнародна конференція Астрономія та фізика космосу у Київському університеті, Збірка тез доповідей, 23–26 травня 2017, Київ, Україна, ст. 36.
- 25. Кузьо Т. Тривимірне моделювання еволюції сильних ударних хвиль у неоднорідному середовищі / Кузьо Т., Петрук О. // Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми механіки та математики», Збірка тез доповідей, 22–25 травня 2018, Львів, Україна, ст. 136.
- Kuzyo T. MHD Simulations of Early SNR Evolution / Kuzyo T., Petruk O. // 25th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Proceedings of the Conference held April 23–28, 2018, Kyiv, Ukraine, P. 22.
- 27. Kuzyo T. 3-D Simulations Of Supernova Remnant Evolution In The Non-Uniform Interstellar Medium Kuzyo T., Petruk O. // Міжнародна конференція Астрономія та фізика космосу у Київському університеті, Збірка тез доповідей, 29 травня – 1 червня 2018, Київ, Україна, ст. 29.
- 28. Кузьо Т. Магніто-гідродинамічне моделювання ранніх етапів еволюції залишків Наднових зір / Кузьо Т., Петрук О. // IX наукова конференція «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвячена пам'яті Богдана Бабія, Збірка тез доповідей, 2–5 жовтня 2018, Львів, Україна, ст. 76–77.

- Кузьо Т. Тривимірне моделювання залишку Наднової Тихо Браге / Кузьо Т., Петрук О. // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2019», Збірка тез доповідей, 27–29 травня 2019, Львів, Україна.
- Kuzyo T. Three-dimensional MHD Simulations of Tycho SNR / Kuzyo T., Petruk O. // Міжнародна конференція Астрономія та фізика космосу у Київському університеті, Збірка тез доповідей, 28–31 травня 2019, Київ, Україна, ст. 26.
- Кузьо Т. Тривимірна структура магнітного поля у молодих залишках Наднових зір / Кузьо Т., Петрук О. // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання – 2020», Збірка тез доповідей, 26– 28 травня 2020, Львів, Україна.
- 32. Kuzyo T. Magnetic Field in Young Supernova Remnants / Kuzyo T., Petruk O. // Міжнародна конференція Астрономія та фізика космосу у Київському університеті, Збірка тез доповідей, 27–29 травня 2020, Київ, Україна, ст. 32.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Acero F. First detection of VHE γ-rays from SN 1006 by HESS / Acero F., Aharonian F., Akhperjanian A., et al. // Astron. and Astrophys. 2010. V. 516. P. A62.
- Ackermann M. Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants / Ackermann M. Ajello M., Allafort A., et al. // Science. – 2013. – V. 339. – P. 807.
- Blondin J. Transition to the Radiative Phase in Supernova Remnants / Blondin J. Wright E., Borkowski K., Reynolds S. // Astrophys. J. – 1998. – V. 500. – P. 342.
- Brose R. Transport of magnetic turbulence in supernova remnants / Brose R., Telezhinsky I., Pohl M. // Astron. and Astrophys. – 2016. – V. 593. – P. A20.
- Chevalier R. Self-similar solutions for the interaction of stellar ejecta with an external medium / Chevalier R. // Astrophys. J. – 1982. – V. 258. – P. 790.
- Cioffi D. Dynamics of Radiative Supernova Remnants / Cioffi D., Mc-Kee C., Bertschinger E. // Astrophys. J. – 1988. – V. 334. – P. 252.
- Miceli M. Thermal emission, shock modification, and X-ray emitting ejecta in SN 1006 / Miceli M., Bocchino F., Iakubovskyi D., et al. // Astron. and Astrophys. – 2009. – V. 501. – P. 239.
- 40. Mignone A. The PLUTO Code for Adaptive Mesh Computations in

Astrophysical Fluid Dynamics / Mignone A., Zanni C., Tzeferacos P., et al. // Astrophys. J. Suppl. – 2007 – V. 170. – P. 228.

- Nadezhin D. On the Initial Phase of Interaction Between Expanding Stellar Envelopes and Surrounding Medium / Nadezhin D. // Astrophys. and Space Science. – 1985. – V. 112. – P. 225.
- Petruk O. Aspect angle for interstellar magnetic field in SN 1006 / Petruk O., Dubner G., Castelletti G., et al. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 2009. - V. 393. - P. 1034.
- Petruk O. Predicted γ-ray image of SN 1006 due to inverse Compton emission / Petruk O., Bocchino F., Miceli M., et al. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009. – V. 399. – P. 157.
- 44. Sedov L. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics / Sedov L. New York: Academic Press. 1959.
- Sutherland R. Cooling Functions for Low-Density Astrophysical Plasmas / Sutherland R., Dopita M. // Astrophys. J. Suppl. – 1993. – V. 88. – P. 253.
- Telezhinsky I. Acceleration of cosmic rays by young core-collapse supernova remnants / Telezhinsky I., Dwarkadas V., Pohl M. // Astron. and Astrophys. – 2013. – V. 552. – P. A102.

АНОТАЦІЯ

Кузьо Т. В. Магнітогідродинамічне моделювання сильних ударних хвиль у міжзоряному середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія (10 – Природничі науки; 104 – Фізика та астрономія). – Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі досліджується еволюція сильних нерелятивістських ударних хвиль на прикладі залишків Наднових зір у міжзоряному магнітному полі з використанням чисельного магніто-гідродинамічного моделювання поширення ударної хвилі від вибуху Наднової у міжзоряному середовиці. Вперше вивчено роль магнітного поля у динаміці залишків Наднових впродовж всього часу їх існування – від вільного розлітання до радіаційної стадії еволюції. Вперше досліджено еволюцію залишків Наднових на пост-адіабатичній стадії з врахуванням магнітного поля, показано визначальний вплив напряму та напруженості магнітного поля на рух ударної хвилі з радіаційними втратами та динаміку газу за її фронтом. Показано вплив різних типів коефіцієнта дифузії на розвиток форми спектру космічних променів, прискорених в залишках Наднових. Розроблено модельно-незалежний метод оцінки напруженості магнітного поля у залишках Наднових з білатеральною морфологією.

Ключові слова: залишки Наднових зір, ударні хвилі, магнітна гідродинаміка, міжзоряне середовище, міжзоряне мігнітне поле.

ANNOTATION

Kuzyo T. V. Magneto-hydrodynamic simulations of strong shock waves in the interstellar medium. – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Candidate's thesis in Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy (10 – Natural sciences; 104 – Physics and astronomy). – Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the NAS of Ukraine, Lviv; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The evolution of supernova remnants (SNR) in the interstellar magnetic field is studied using magneto-hydrodynamic (MHD) simulations of a strong non-relativistic shock wave from a supernova explosion in the interstellar medium. We have performed a series of numerical MHD simulations for spherically-symmetric models covering the full range of SNR's life span starting from few days after the supernova explosion up to a well-established radiative stage.

The interstellar magnetic field is an important component of SNRs but often it is not taken into account both in analytical and numerical models: it is either treated approximately or ignored leading to a purely hydrodynamic description of SNR evolution. We have explored the role of the magnetic field in the SNR dynamics from the early free expansion up to the welldeveloped radiative stage. The magnetic field is dynamically unimportant during the adiabatic regime of the SNR evolution, so its energy density is at least an order of magnitude smaller than the thermal energy density. The radial component of the magnetic field drops immediately behind the shock front, while the tangential component increases due to the jump conditions on the shock front. With the onset of the post-adiabatic stage, the tangential magnetic field becomes a major factor in the SNR evolution.

We have identified the characteristic features of the shock wave dynamics and the post-shock flow when one can no longer use the free expansion

model where expanding ejecta dominates but the upcoming Sedov stage has not started yet. Its distinctive feature is energy conversion between different SNR components, namely the kinetic energy of ejects is gradually transforming into the thermal energy of the shocked interstellar gas.

We have studied the evolution of post-adiabatic SNRs using a proper treatment of the magnetic field. The interstellar magnetic field significantly changes the post-shock flow structure and affects the dynamics of the shock wave itself. We have shown the effect of the magnetic field strength and its orientation on the features of the post-adiabatic flow. The tangential component of the magnetic field compensates the thermal pressure drop in the rapidly cooling post-shock shell, prevention the shock wave from significant deceleration. At the same, time the magnetic field in the post-shock shell controls gas compression in the shell, thus preventing the creation of a very thin and dense shell.

Also, we have explored the features of SNRs MHD evolution in a nonuniform medium and non-uniform magnetic field. The SNR evolution in a medium with a non-uniform increasing density speeds up the shock evolution, so the beginning of the post-adiabatic stage happens earlier.

We have shown the effect of different diffusion models on the evolution of cosmic rays spectrum shape in SNRs accelerated on the shock front. Namely, we considered a Bohm-like diffusion coefficient and a self-consistent diffusion coefficient within Alfvénic turbulence model. To compute cosmic rays spectra we have simultaneously solved the transport equations for cosmic rays and turbulence equation along with hydrodynamic equations for the post-shock flow. We found that the Alfvénic diffusion scenario yields a spectral index consistent with the galactic model for cosmic rays.

Also, we have developed a model-independent method of magnetic field strength estimation in SNRs with bilateral morphology using non-thermal images of the SNR in different ranges of the electromagnetic spectrum. The method has been applied to SN 1006. The method makes use of the similarity of SNR's morphology in radio, x-ray and gamma-ray ranges being a strong indicator for SNR's non-thermal emission being generated by the same particles type (electrons) for photons on different energies.

Keywords: supernova remnants, shock waves, magnetic hydrodynamics, interstellar medium, interstellar magnetic field.