

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Петрук Олег Леонідович

УДК 524.354:524.1-6

**ACCELERATION OF COSMIC RAYS
IN SHELL SUPERNOVA REMNANTS
(ПРИСКОРЕННЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ
В ОБОЛОНКОВИХ ЗАЛИШКАХ
НАДНОВИХ ЗІР)**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

КИЇВ – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача Національної академії наук України.

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Гнатик Богдан Іванович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Кришталь Олександр Нектарійович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
завідувач відділу фізики космічної плазми,

доктор фізико-математичних наук, професор
Черемних Олег Костянтинович,
Інститут космічних досліджень НАН та НКА України,
заступник директора з наукової роботи,

доктор фізико-математичних наук
Птускін Володимир Соломонович,
Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль
ім. М. В. Пушкова РАН,
завідувач лабораторії астрофізичних досліджень.

Захист відбудеться «10» березня 2011 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «...» лютого 2011 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук



І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена розробці методів моделювання еволюції сильних нерелятивістських ударних хвиль в неоднорідних середовищах і полях, методів опису кінетики і випромінювання заряджених релятивістських часток в їх околі, моделюванню нетеплового випромінювання оболонкових залишків наднових зір, методикам використання даних спостережень для накладання обмежень на властивості космічних променів і магнітного поля в таких залишках.

Актуальність теми. Питання про те, чи залишки наднових зір (ЗН) є основним джерелом галактичного компонента космічних променів (КП) – заряджених часток релятивістської енергії, залишається одним з найважливіших в астрофізиці високих енергій.

Майже 100 років тому, 7 серпня 1912 року, В. Гесс провів найуспішніший свій експеримент, який виявив зростання радіоактивності з висотою, та пояснив це припущенням про існування “випромінювання з високою проникаючою здатністю”, що входить в земну атмосферу з космічного простору. 1936 року за це відкриття він одержав Нобелівську премію.

Довго вважалося, що феномен, виявлений Гессом, має електромагнітну природу. Тому він одержав назву “космічні промені”. В період з 1927 року, коли був виявлений геомагнітний ефект, до 1937 року (“східно-західний” ефект), ряд експериментів переконливо довів, що космічні промені відхиляються в магнітному полі Землі, а отже є зарядженими частками.

В 1930–1950 роки, до того, як експериментальні прискорювачі заряджених часток досягли достатньо високих енергій, інформацію для фізики елементарних часток надавали саме КП; завдяки ним було відкрито субатомні частки, зокрема позитрон і мюон. Хоча ядерна фізика й досі використовує результати спостережень КП, основний фокус їх вивчення змістився до астрофізичних аспектів: які об’єкти є їх джерелами, як вони прискорюються до високих енергій, яку роль відіграють в динаміці Галактики та Всесвіту, яку інформацію про міжзоряне чи позагалактичне середовище можна одержати з їх хімічного складу.

Енергетичний спектр КП простягається від кількох сотень MeV до $\sim 10^{20}$ eV. Він має степеневий характер з деякими особливостями, пов’язаними зі зміною нахилу, а саме: на енергіях біля 3×10^{15} eV спектральний індекс диференціального спектру E^{-s} змінюється з $s = 2.7$ до $s = 3.1$, який спостерігається аж до енергій 3×10^{18} eV, де він повертається знову до величини $s = 2.7$. КП надвисоких енергій ($> 10^{18}$ eV)

повинні бути позагалактичними за своїм походженням, оскільки магнітне поле Галактики є малим, щоб забезпечити утримання таких часток у своєму об'ємі. Спектр має обрізання на енергіях $\sim 5 \times 10^{19}$ еВ, зумовлене взаємодією таких КП з мікрохвильовим фоном; наявність такого обрізання була остаточно підтверджена в останні роки експериментами наземної обсерваторії ім. П'єра Оже.

Вважається, що КП з енергіями, меншими за 3×10^{15} еВ, або й аж до 10^{17} еВ, прискорюються в галактичних джерелах. Хоча продукувати КП здатні різні об'єкти (наприклад ОВ зорі, пульсари тощо), загальноприйнятною є гіпотеза про те, що лише залишки наднових можуть бути відповідальними за більшість галактичних КП [57,58]. Однак досі ця гіпотеза не одержала прямих експериментальних підтверджень (за винятком електронного компонента КП).

Галактичне магнітне поле (МП) з напруженістю $\sim 3 \mu\text{Гс}$ суттєво впливає на рух КП з такими енергіями, відхиляючи їх від напрямків на джерела. Тому неможливо прямо спостерігати КП від ЗН. Вивчати КП в ЗН дозволяє лише аналіз різних типів випромінювання, породженого взаємодією прискорених часток з магнітним полем, фоновими фотонами чи іншими частками.

Вивчення КП тісно пов'язане з радіоастрономією. Починаючи з початку 1950-х років, радіоспостереження надають важливі докази про присутність електронного компонента КП в усьому Всесвіті. Протягом останніх десяти років значного розвитку досягли методи спостережень високоенергетичного (рентгенівського та гама-) випромінювання. Тепер дані супутників та наземних експериментів астрофізики високих енергій дозволяють тестувати теорії прискорення елементарних часток в околі ударних хвиль (УХ). Тому джерела нетеплового випромінювання, зокрема залишки наднових зір, інтенсивно вивчаються. Їх випромінювання несе в собі інформацію про фізику сильних ударних хвиль, рух та випромінювання космічних променів, властивості МП. Вони є важливим та унікальним експериментальним "майданчиком" для вивчення взаємодії плазми та релятивістських часток. ЗН є одним з основних об'єктів для спостережень сучасними космічними та наземними телескопами в багатьох ділянках електромагнітного спектру від радіо- до жорсткого гама-діапазону (див., наприклад, програму розвитку Космо-мікрофізики в ЄС [59]).

Важливими для розуміння фізики явищ, що відбуваються в околі ударних хвиль в ЗН, є рентгенівські спостереження цих об'єктів. Максимум теплового випромінювання залишків наднових зір припадає саме на рентгенівський діапазон. Проте високе просторове та спектраль-

не розділення сучасних рентгенівських телескопів дозволяє виділяти та аналізувати нетепловий компонент рентгенівського випромінювання ЗН, який є наслідком синхротронного випромінювання релятивістських електронів, прискорених на УХ до енергій порядку 30 – 300 TeV. Відкриття у 1995 році нетеплового компонента в рентгенівському спектрі залишків наднових зір [60] надало нового імпульсу вивченню цих об'єктів. Якщо цей нетепловий компонент є наслідком синхротронного випромінювання релятивістських електронів, то це свідчить про прискорення електронного компонента КП на фронтах ударних хвиль в ЗН до енергій $\sim 30 \div 300$ TeV [61,62]. Електрони з цими ж енергіями повинні випромінювати також в гама-діапазоні (зворотний ефект Комптона та нетеплове гальмівне випромінювання). Висновки ж про протонний компонент КП можна робити лише через спостереження γ -фотонів, які виникли через розпад піонів, породжених зіткненнями прискорених до релятивістських швидкостей протонів з протонами-мішенями. Відтак, засоби спостережень активно розвиваються. Особливо слід відзначити успіхи спостерігачів у надзорсткому γ -діапазоні. Перша карта ЗН в γ -променях, одержана 2004 року системою черенковських гама-телескопів HESS, започаткувала зображувальну γ -астрономію; відгоді спостереження дали карти ще декількох залишків наднових зір. Ці результати, поряд з рентгенівськими і радіоспостереженнями надають прямі докази того, що КП справді прискорюються ударними хвилями цих об'єктів до енергій в сотні, тисячі TeV. І якщо спектральні властивості випромінювання релятивістських часток в ЗН вивчаються достатньо широко, то інша частина спостережуваної інформації, а саме властивості поверхневого розподілу яскравості, досі практично не використовується через складність моделювання.

Спостереження та теоретичний аналіз процесів нетеплового випромінювання ЗН дозволяють вивчати фізичні процеси, недоступні для земної експериментальної фізики, та сприяють розумінню походження КП. ЗН є одними з пріоритетних об'єктів спостережень орбітальними рентгенівськими та гама-обсерваторіями Chandra, XMM-Newton, Integral, Fermi, як також і наземними експериментами зі спостереження черенковського випромінювання атмосфери від γ -фотонів з енергіями в діапазоні 0.1–100 TeV (HESS, MAGIC, VERITAS та ін.). Насьогодні з 274 ЗН [63] нетеплове випромінювання в рентгенівському діапазоні виявлено в кількох десятках оболонкових ЗН. З 2004 року надзорстке γ -випромінювання зафіксовано від низки ЗН [64,65]. Запущений 2008 року орбітальний гама-телескоп ім.Фермі спостеріг γ -випромінювання з квантами з енергіями в діапазоні 0.1–100 TeV від

багатьох джерел, зокрема й від ЗН [66]. Триває пошук інших ЗН з домінуючим нетепловим компонентом рентгенівського спектру та помітним γ -випромінюванням; накопичуються спостережувані дані відомих джерел, що відчутно позначається на якості і детальності експериментальної інформації.

Щороку з'являються кілька сот публікацій, в яких вивчається той чи інший аспект цієї проблеми. Теоретичні результати, одержані переважно в останні кілька років, оглянуто в роботах [67–71]. Основні здобутки спостерігачів представлено в оглядах [71–75]. Розвиток теоретичних досліджень і спостережень ЗН зумовив виявлення нових явищ, що відбуваються в околі фронтів сильних нерелятивістських УХ, які поширюються у міжзоряному середовищі (МЗС). Ці особливості пов'язані з рухом УХ у середовищах з різними типами неоднорідностей густини та магнітного поля, а також з процесами інжекції та подальшого прискорення теплових заряджених часток до релятивістських енергій на фронтах цих хвиль, їх взаємодією з міжзоряними МП.

Саме тому побудова теоретичних моделей нетеплового випромінювання ЗН в різних діапазонах з врахуванням особливостей динаміки УХ, КП і МП, як також розробка нових методів аналізу спостережуваних даних, зокрема карт поверхневої яскравості, є актуальним та необхідним кроком подальших досліджень.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстигача НАН України в рамках держбюджетних тем “Розвиток диференціально-геометричних методів дослідження рівнянь математичної і теоретичної фізики” (номер державної реєстрації 0102U000451), “Диференціально-топологічні та геометричні аспекти теорії динамічних систем, рівнянь математичної фізики, теорії фундаментальних взаємодій” (0106U000593), а також тем: “Дослідження неklasичних крайових задач для рівнянь із частинними похідними та руху часток у неоднорідних середовищах і полях” (0105U000929) за цільовою програмою наукових досліджень Відділення математики НАН України, “Розробка моделей Всесвіту з космологічними полями, моделей темної енергії, дослідження впливу темної енергії на еволюцію Всесвіту” (0109U003207) за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України “Дослідження структури та складу всесвіту, прихованої маси і темної енергії” (“Космомікрофізика”), “Дослідження природи джерел космічних променів надвисоких енергій” (0103U006381) за проектом Фонду фундаментальних досліджень, та в рамках держбюд-

жетних тем, що виконувались в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка: “Визначення фізичних параметрів змінних зір, газопилових туманностей, зоряних скупчень, галактик та квазарів” (0105U002240), “Спостереження, статистичний аналіз та моделювання фізичних процесів галактичних та позагалактичних джерел випромінювання” (0107U002061), “Дослідження змінних зір, залишків наднових та галактичних зоряних скупчень на основі наземних та космічних телескопів” (0110U001384).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є побудова магнітогідродинамічних моделей залишків наднових зір, сформованих внаслідок поширення сильних ударних хвиль у міжзоряному середовищі з різними типами неоднорідностей густини та магнітного поля, розробка нових аналітичних методів розв’язку систем нелінійних диференціальних рівнянь, які описують еволюцію УХ, рух та випромінювання релятивістських заряджених часток в околі фронтів цих УХ, а також застосування розроблених теоретичних засад до побудови фізичних моделей конкретних ЗН за даними спостережень сучасних космічних та наземних обсерваторій в різних діапазонах випромінювання.

Для реалізації поставленої мети сформульовано низку теоретичних і експериментальних задач:

1. Дослідити еволюцію ЗН з моменту, коли порушуються умови адіабатичності руху УХ.
2. Розробити наближені аналітичні методи опису динаміки УХ і течії в просторово-неоднорідній плазмі після закінчення адіабатичної стадії еволюції.
3. Розробити аналітичний метод опису процесу інжекції електронів в процес прискорення Фермі I роду з метою одержання розподілу інжектованих часток за імпульсами.
4. Розробити модель еволюції енергетичного спектру прискорених електронів за фронтом УХ, яка рухається в неоднорідних середовищах і полях.
5. Побудувати аналітичну апроксимацію для розрахунку випромінювальної здатності електронів шляхом зворотного комптонівського розсіяння.
6. Промоделювати та дослідити властивості розподілу поверхневої яскравості адіабатичних ЗН в МЗС з однорідною густиною та магнітним полем внаслідок випромінювання електронного компонента КП: в радіо-, рентгенівському і γ -діапазонах; виявити основні фактори, які визначають морфологію ЗН.

7. Виявити причини асиметрії в розподілі поверхневої яскравості ЗН шляхом моделювання їх еволюції в неоднорідних середовищах і магнітних полях.
8. Розробити методи аналізу спостережуваних карт ЗН в радіо-, рентгенівському і γ -діапазонах на прикладі конкретного ЗН, за використання даних сучасних космічних та наземних експериментів.
9. Провести статистичний аналіз характеристик ЗН і їх радіовипромінювання в нашій та близьких галактиках з метою тестування моделей прискорення заряджених часток сильними ударними хвилями.

Об'єкт досліджень – космічні промені та ударні хвилі в оболонкових залишках наднових зір.

Предмет досліджень – магніто-гідродинамічні властивості сильних нерелятивістських ударних хвиль в неоднорідних середовищах і полях та властивості прискорення ними релятивістських заряджених часток, їх зв'язок з процесами нетеплового випромінювання оболонкових залишків наднових зір.

Методи досліджень. Розробка наближених аналітичних та числових методів розв'язування систем нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних, що описують динаміку сильних нерелятивістських УХ в неоднорідних середовищах і полях та кінетику заряджених часток в їх околі; їх застосування до теоретичного моделювання нетеплового випромінювання залишків наднових зір, зокрема карт розподілу поверхневої яскравості ЗН. Спостереження та аналіз інтегральних та просторово-розділених характеристик нетеплового випромінювання ЗН, розробка методів їх аналізу та порівняння з теоретичними моделями.

Достовірність і обґрунтованість одержаних результатів підтверджені тестами на основі теоретичного та експериментального матеріалу, даними спостережень в радіо-, рентгенівському та гама-діапазонах, сукупністю даних про ЗН в нашій та сусідніх галактиках, апробацією результатів досліджень на міжнародних наукових конференціях, рецензіями в журналах, цитуванням опублікованих статей, використанням одержаних результатів іншими авторами і незалежними дослідженнями (зокрема, метод визначення орієнтації міжзоряного МП (підрозділ 5.3) був застосований в [76] до чисельного магніто-гідродинамічного моделювання SN 1006, в ході якого були одержані результати, аналогічні до представлених у підрозділі; запропоноване пояснення кумулятивного розподілу ЗН за розмірами (підрозділ 6.5) було детально розглянуте та підтверджене в [77]).

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено модельно-незалежний метод розрахунку розподілу поверхневої яскравості нетеплового лептонного випромінювання ЗН в γ -діапазоні на основі його спостережуваних радіо- та рентгенівської карт. Метод застосовано для SN 1006. Передбачена карта яскравості в γ -променях співпадає з даними спостережень, що є новим аргументом на користь лептонної природи γ -випромінювання цього ЗН.
2. Вперше розроблено метод визначення тривимірної орієнтації міжзоряного МП в околі ЗН за його радіокартою. Метод застосовано для SN 1006, що вперше дозволило визначити орієнтацію зовнішнього МП в околі цього залишка.
3. Вперше промодельовано карти яскравості сферичних ЗН в гама-діапазоні, а також радіо-, рентгенівські та гама-карти ЗН, які знаходяться в неоднорідних МЗС і міжзоряних МП. Вперше проаналізовано властивості γ -зображень і виявлено вплив неодорідностей МЗС і міжзоряного МП на карти нетеплового лептонного випромінювання ЗН в різних діапазонах.
4. Запропоновано нову модель класу ЗН – теплових рентгенівських композитів, – яка базується на ідеї про рух УХ в суттєво неоднорідному МЗС, з масштабом неоднорідності, меншим за 10 парсек. Модель передбачає, що ЗН, представники цього класу, мали б бути перспективними джерелами протонного γ -випромінювання.
5. Вперше отримано наближені аналітичні вирази для опису азимутальних і радіальних профілів розподілу поверхневої яскравості адіабатичних ЗН в однорідному середовищі і однорідному магнітному полі внаслідок випромінювання прискорених електронів в радіо-, рентгенівському і γ -діапазонах. Вперше виявлено фактори, які визначають розподіли яскравості у вказаних діапазонах.
6. Вперше показано необхідність введення в опис еволюції сильної нерелятивістської ударної хвилі в ЗН нової додаткової стадії, перехідної від адіабатичної до радіаційної, тривалість якої є співмірною з тривалістю адіабатичної стадії. Вперше розроблено наближені аналітичні методи гідродинамічного опису ударної хвилі та потоку на перехідній та радіаційній стадіях еволюції.
7. Проведено новий аналіз радіо- та рентгенівських спостережень SN 1006. Спостережувані дані (просторовий розподіл яскравості, інтегральні спектри та результати просторово-розділеного спектрального аналізу) вперше використано для комплексного визначення властивостей КП і МП в цьому ЗН, його тривимірної морфології та інших властивостей.

8. Вперше показано, що $(\Sigma - D)$ -залежність не може бути еволюційним треком “типового” ЗН, а є наслідком еволюції багатьох ЗН в суттєво різних умовах; що моделі УХ, в яких вважається, що частки енергії, які переходять від УХ до КП і МП є постійними, не узгоджуються з даними спостережень ЗН; що кумулятивний розподіл ЗН за розміром не має відношення до закону руху УХ, а зумовлений лише густинами МЗС, в яких еволюціонують ЗН.

Практичне значення одержаних результатів.

Модель теплових рентгенівських композитів пропонує розглядати представників цього класу ЗН як перспективні джерела для спостережень протонного γ -випромінювання системами черенковських телескопів.

Розроблені гідродинамічні моделі ЗН на пост-адіабатичній та радіаційній стадіях дозволять в майбутньому проводити моделювання старих ЗН та їх випромінювання, зокрема вивчати процеси затухання радіо-випромінювання, що є важливим, наприклад, для розуміння природи $(\Sigma - D)$ -залежності.

Методи розрахунку еволюції електронів за фронтом УХ, яка рухається в неоднорідних середовищі і магнітному полі, а також аналітична апроксимація випромінювальної здатності через зворотний Комптон-ефект відкривають можливість проводити розрахунки карт поверхневої яскравості ЗН в гама-діапазоні та в усьому електромагнітному спектрі при русі УХ в неоднорідних середовищах і полях.

Синтезовані карти ЗН вперше дають розуміння причин формування розподілів та асиметрій різного типу в спостережених зображеннях ЗН. Це сприятиме розробці методів виявлення певних властивостей КП і МП шляхом аналізу спостережуваних карт ЗН.

Розроблені нові методики визначення властивостей КП і МП є теоретичною базою для аналізу спостережень. В роботі вони застосовані до SN 1006, проте можуть бути використані й для інших ЗН. Йдеться насамперед про метод прогнозування зображення ЗН, зумовленого випромінюванням електронів в гама-діапазоні, метод визначення тривимірної орієнтації міжзоряного МП за радіокартою ЗН, методику побудови “чистого” теплового зображення ЗН за рентгенівськими даними.

Результати роботи можуть бути використані для розвитку теорії взаємодії прискорених заряджених часток з магнітним полем і плазмою, вони можуть бути розширені на випадок релятивістських УХ, можуть бути використані для вивчення інших астрофізичних об’єктів з сильними УХ (сонячні спалахи, активні ядра галактик, гама-спалахи).

Особистий внесок здобувача.

Роботи [1–5,8,10,15,25–27] виконані здобувачем самостійно.

В роботі [6,12,24] здобувач брав участь у постановці задачі, розробці моделей, проводив чисельне моделювання, брав участь у аналізі результатів та написанні статті.

В [7] здобувач досліджував гілки розв’язків, властивості розв’язків, брав участь у написанні статті.

В роботах [9,11,14] здобувачеві належать постановка задачі, розробка методів моделювання, участь в обговоренні результатів та написанні статей.

В [20] здобувач формував вибірки, брав участь у виборі методів статистичного аналізу, в аналізі результатів і написанні статті.

В циклі робіт [17–19,22] здобувачеві належить участь в обговоренні результатів та написанні статей, а також: постановка задачі в [17,19,22]; розробка методів моделювання й аналізу в [17,19,22]; принцип підходу до проведення просторово-розділеної рентгенівської спектроскопії в [18]; проведення розрахунків в [17,19,22].

В роботах з теоретичного моделювання карт ЗН [13,16,21,23] здобувачеві належить постановка задачі, розробка тієї частини моделі, що стосується опису поведінки релятивістських електронів і процесів їх випромінювання, участь в тестуванні методів, обговоренні результатів і написанні статей.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати, отримані в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на таких наукових конференціях і семінарах:

- 35th COSPAR Scientific Assembly (Париж, Франція, 2004 р.);
- 37th COSPAR Scientific Assembly (Монреаль, Канада, 2008 р.);
- 38th COSPAR Scientific Assembly (Бремен, Німеччина, 2010 р.);
- Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Київ, 2003–2010 рр.);
- Міжнародна конференція “Астрофізика та космологія після Гамова” (Одеса, 2004, 2009 рр.);
- Наукова конференція пам’яті Б.Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (Львів, 2002, 2006, 2008 рр.);
- International Conference “The X-ray Universe” (Гранада, Іспанія, 2008 р.);
- Міжнародна математична конференція “Нові підходи до розв’язку диференціальних рівнянь” ім. В. Я. Скоробогатька (Дрогобич, 2001, 2004, 2007 рр.);
- “Endpoints and Interactions”. A Workshop On the Future of Supernova Remnant Research (Гонолулу, Гаваї, 2007 р.);

- IAU XXVIth General Assembly. Joint Discussion 1: Cosmic Particle Acceleration (Прага, Чеська Республіка, 2006 р.);
- International Conference “New Century in X-ray Astronomy” (Йокогама, Японія, 2001 р.);
- International School of Cosmic Ray Astrophysics (Еріче, Сіцилія, Італія, 2000 р.);
- наукові семінари відділу диференціальних рівнянь і теорії функцій Інституту прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України (2000–2010 рр.), Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка (2000–2010 рр.), Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (2000–2010 рр.), Головної астрономічної обсерваторії НАН України (2010 р.), Астрономічної обсерваторії Ягелонського університету (Краків, Польща, 2006, 2007, 2009 рр.), Астрофізичної обсерваторії (Флоренція, 2003, 2004, 2006 рр.) і Астрономічної обсерваторії (Палермо, 2006, 2008 рр.) Національного інституту астрофізики Італії.

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано протягом 2000–2010 рр. в 27 статтях у рецензованих вітчизняних і зарубіжних наукових журналах [1–24] та наукових збірниках [25–27] і в 29 тезах конференцій [28–56].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, в яких проведено огляд стану проблеми та викладені результати дослідження, висновків, списку використаних джерел, який містить 376 найменувань, і шести додатків. Загальний обсяг дисертації – 353 сторінки; робота містить 112 рисунків і 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості стосовно апробації та публікації результатів досліджень, які винесені на захист.

Розділ 1 має оглядовий характер. Тут описано історію відкриття, розвиток основних ідей, ключових експериментів та сучасний стан вивчення космічних променів. Основну увагу зосереджено на галактичному компоненті КП. Наведено основні аргументи на користь того,

що він продукується в залишках наднових зір. Описано основні задачі та проблеми, пов'язані з прискоренням та випромінюванням заряджених часток ударними хвилями в оболонкових ЗН та вказано на місце дисертаційних досліджень у спектрі сучасних студій в даній галузі.

Розділ 2 присвячений викладу теоретичних методів моделювання динаміки сильних нерелятивістських ударних хвиль в неоднорідних середовищах. Задача про точковий вибух – дослідження течії газу при швидкому локалізованому виділенні енергії – є однією з актуальних проблем астрофізики високих енергій. Математичну модель цієї задачі становить система нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних гіперболічного або мішаного типу. Значний прогрес в дослідженні цих рівнянь зумовило знаходження Л. Седовим [78] точного аналітичного розв'язку для випадку автомоделних рухів газу, як, наприклад, при русі адіабатичної ударної хвилі від точкового вибуху в ідеальному газі з постійною густиною. Однак, ряд суттєвих фізичних процесів: неоднорідність в розподілі густини газу, втрати газом енергії на висвічування тощо, – приводять до втрати автомоделності та адіабатичності, відтак до неможливості застосування седовських розв'язків. В нашій попередній роботі [79] було розроблено наближений аналітичний метод опису *адіабатичної* течії газу від точкового вибуху в довільно неоднорідному середовищі.

В підрозділі 2.1 цей метод застосовано до пояснення природи теплових рентгенівських композитів, морфологічного класу ЗН з підвищеною яскравістю рентгенівського випромінювання в центральній частині ЗН та оболонковою структурою в радіодіапазоні; при цьому рентгенівське випромінювання є тепловим за своєю природою та породжене не матеріалом зруйнованої зорі, а газом МЗС, який був нагребений УХ. Показано, що причиною такої морфології може бути градієнт густини МЗС з масштабом < 10 пк, зорієнтований під невеликим кутом до променя зору; ця модель забезпечує спостережувану морфологію теплових рентгенівських композитів (рис. 1 б, в), а також пояснює усі інші їх властивості. Варто зауважити, що така конфігурація часто зустрічається при взаємодії ЗН з молекулярними хмарами; й справді, у більш, ніж 60% композитів виявлено ознаки взаємодії УХ з молекулярними хмарами. Тому очікується, що ЗН, представники цього класу, можуть бути перспективними кандидатами для спостережень γ -випромінювання від взаємодії протонів, прискорених на ударних хвилях ЗН, з протонами-мішенями в областях підвищеної концентрації – молекулярних хмарах.

Далі в розділі побудовано наближені аналітичні методи повного опису руху фронту та течії газу за фронтом *неадіабатичної* ударної хви-

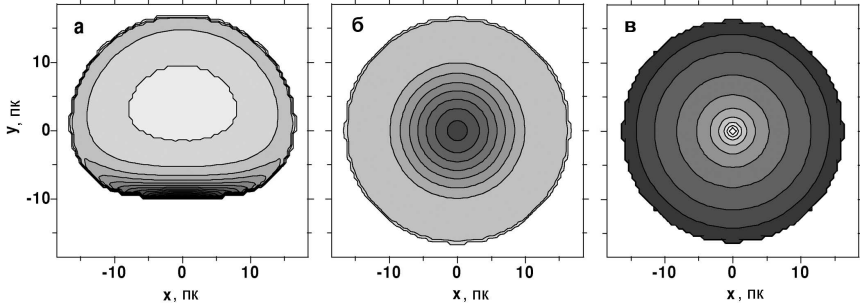


Рис. 1. Розподіл поверхневої яскравості (в логарифмічній шкалі) ЗН в неоднорідному МЗС, в рентгенівському (а, б) та в радіодіапазонах (в). Градієнт густини МЗС лежить в площині проєкції (а; густина зростає вниз) чи спрямований на спостерігача (б, в).

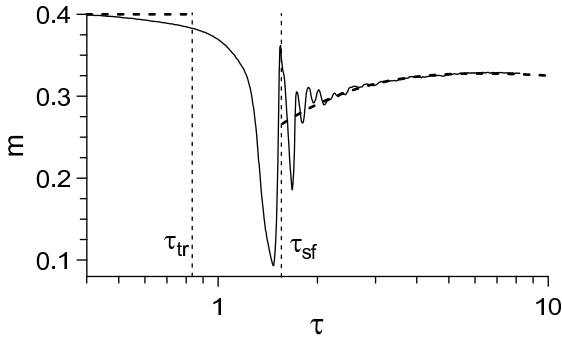


Рис. 2. Еволюція параметру сповільнення m та моменти часу t_{tr} і t_{sf} (в безрозмірних одиницях: $\tau = t/t_m$, де t_m – деякий масштаб). Параметр m означено як $R \propto t^{-m}$, де R – радіус ударної хвилі. Суцільні лінії – чисельні розрахунки [80], товсті штриховані лінії – розв’язок Седова [78] (до τ_{tr}) і аналітичний розв’язок з підрозділу 2.4 (після τ_{sf}).

лі. Ці методи є узагальненням чисельних досліджень [80,81] для опису ударної хвилі після моменту часу t_{tr} , коли починають порушуватися умови адіабатичності руху і радіаційні втрати починають помітно впливати на динаміку системи (рис. 2).

Показано (підрозділ 2.2), що в описі еволюції ударної хвилі після t_{tr} необхідно виділити дві стадії, нову пост-адіабатичну і лише після її закінчення, з часу t_{sf} , традиційну радіаційну, – оскільки властивості удар-

ної хвилі і течії є відмінними впродовж цих двох періодів часу. Початок пост-адіабатичної фази фіксується моментом t_{tr} , коли час радіаційних втрат стає співмірним з віком ЗН, тоді розпочинається формування холодної оболонки. Це формування триває до часу t_{sf} , який фіксується умовою появи першого елемента, який повністю охолов; відтоді вже стають чинними традиційні припущення радіаційної гідродинаміки, а саме: гарячий газ внутрішніх областей штовхає тонку холодну щільну оболонку (рис. 2). Протягом часу ($t_{tr}; t_{sf}$) структура течії реструктуризується від адіабатичної до класичної радіаційної. Відношення t_{sf}/t_{tr} практично не залежить від величини градієнта неоднорідності зовнішнього середовища, а тривалість пост-адіабатичної стадії є співмірною з тривалістю адіабатичної фази.

Представлені в підрозділах 2.3–2.5 методи моделювання залишків наднових протягом вказаних двох стадій дозволяють описувати рух ударної хвилі та, вперше, розподіл параметрів у тонкій холодній оболонці та в гарячому газі всередині оболонки. Так, для повного опису ЗН, який розвивається в неоднорідному середовищі, тривимірна область розбивається на ряд одновимірних секторів, в кожному з яких рух розглядається як незалежний (т. зв. секторне наближення). Відтак в кожному секторі знаходиться закон руху фронту УХ (аналітичний розв'язок для радіаційної УХ наведено в підрозділі 2.4), розподіл параметрів газу в гарячій області, що міститься всередині тонкої щільної холодної оболонки, та характеристики газу в цій оболонці. Для цього розглядається процес формування оболонки протягом пост-адіабатичної стадії (підрозділ 2.3); на радіаційній стадії (підрозділ 2.5) вважається, що оболонка вже сформована. Після t_{tr} , увесь газ МЗС залишається в оболонці; окрім того, протягом часу від t_{tr} до t_{sf} частина гарячого газу ($\approx 5\%$) з внутрішніх областей охолоджується і також входить в оболонку. Стійкість оболонки зумовлюється рівністю теплового тиску в оболонці та динамічних тисків набігаючого зовні та гарячого внутрішнього газу; з відомого тиску знаходяться інші гідродинамічні характеристики оболонки. Еволюція розподілів характеристик гарячого газу в об'ємі ЗН знаходиться шляхом апроксимації розподілу для одного з параметрів (наприклад, для майже лінійного розподілу швидкості елементів газу приймається, що $u(r,t)/u_s(t) \approx r/R(t)$), відтак для усіх інших знаходиться з точних гідродинамічних співвідношень, за відомими розподілами на початок відповідної стадії. Початковими розподілами для пост-адіабатичної (радіаційної) стадії є відповідно адіабатичні (пост-адіабатичні) розподіли на час t_{tr} (t_{sf}). Опис здійснюється в лагранжевих координатах, що дозволяє слідкувати за змінами в кожному

елементі потоку.

Порівняння розв'язків, одержаних із застосуванням розроблених методів, з відомими результатами прямих чисельних розрахунків [80,81] засвідчує їх достатньо високу точність (наприклад рис. 2), що дозволяє застосовувати їх в конкретних прикладних задачах.

Розділ 3 присвячено властивостям релятивістських заряджених часток, які прискорюються на сильних УХ в оболонкових ЗН. Зокрема, дослідженню властивостей інжекції електронів в процес прискорення і задачам, які виникають при моделюванні нетеплового випромінювання ЗН: еволюції прискорених електронів в об'ємі ЗН та їх гама-випромінюванню.

В підрозділі 3.1 запропоновано модель інжекції електронів в процес прискорення Фермі I роду. Показано, що ефективність інжекції залежить від рівня теплової рівноваги між електронами і протонами та числа Маха M для ударної хвилі. Частка прискорених електронів (ефективність інжекції) може бути знайдена як

$$\zeta = \int_0^{\infty} \mathcal{P}(y) f_M(y) dy,$$

де $y = p/p_{\text{th}}$ – безрозмірний імпульс електрона, $p_{\text{th}} = \sqrt{2m_e k T_e}$, $f_M(y)$ – розподіл Максвелла для теплових часток з температурою T_e , $\mathcal{P}(y)$ – імовірність для електронів з імпульсом p розпочати процес прискорення. Імовірність $\mathcal{P}(y)$ може бути знайдена як добуток імовірності $\mathcal{P}_r(y)$ електрона зі швидкістю v , який зноситься течією зі швидкістю u , повернутися проти течії назад до фронту та імовірності $\mathcal{P}_c(y)$ того, що він зможе перетнути фронт та потрапити знову до прифронтної області, тобто здійснити хоча б один цикл Фермі. Розроблено підхід до розрахунку імовірності $\mathcal{P}_c(y)$, який базується на процесах взаємодії електронів з плазмовою турбулентністю. Показано, що вона залежить від “щільності” розсіюючих центрів в плазмі, які, з одного боку, перешкоджають перетину фронту електронами, які рухаються в зворотному напрямі, а, з іншого боку, термалізують частки зовнішнього середовища, які вперше проходять через фронт у прямому напрямі. Тому ефективність інжекції є наслідком двох конкуруючих процесів. Чим вища температура електронів, тим більша їх частка здатна повернутися, рухаючись проти течії, до фронту УХ, й бути готовою перетнути його, тобто почати процес прискорення. Проте, високий рівень турбулентності середовища, який і призвів до вищої температури електронів, перешкоджає цим електронам здійснити цей перехід, розсіюючи їх. Підхід, застосований до

розв'язку проблеми, вперше дозволяє одержати розподіл інжектованих електронів за імпульсами, а саме: $f_{\text{inj}}(y)dy = \mathcal{P}_r(y)\mathcal{P}_c(y)f_M(y)dy$.

Метод розрахунку енергетичного спектру $N(E)$ прискорених електронів в різних ділянках поверхні ЗН та його еволюції після проходження УХ розроблено в підрозділі 3.2. Нехай на фронті УХ формується енергетичний спектр прискорених електронів

$$N(E)dE = K_s E^{-s} \exp[-(E/E_{\text{max},s})^\alpha] dE, \quad (1)$$

де K_s – амплітуда спектру, $E_{\text{max},s}$ – максимальна енергія, $\alpha \sim 1$ – параметр, який регулює швидкість падіння спектру в області високих енергій. Для УХ в неоднорідних середовищах та магнітних полях, розподіл K_s і $E_{\text{max},s}$ по поверхні УХ описується виразами

$$K_s = K_{\parallel} \mathcal{F}_K(\Theta_o) \mathcal{R} \mathcal{V}^{-b}, \quad E_{\text{max},s} = E_{\text{max}\parallel} \mathcal{F}_E(\Theta_o) \mathcal{V}^q \mathcal{B}^\lambda,$$

де Θ_o – кут між векторами зовнішнього магнітного поля B_o та швидкістю УХ V ; індекс \parallel позначає області на УХ, де $\Theta_o = 0$; b, q, λ – параметри; функції F_K і F_E відтворюють зміни, зумовлені косою УХ, а $\mathcal{R}_s = \rho_s/\rho_{s\parallel}$, $\mathcal{V} = V/V_{\parallel}$, $\mathcal{B} = B_o/B_{o\parallel}$ – зміни внаслідок неоднорідностей густини ρ_o зовнішнього середовища чи магнітного поля. Зміни енергії електронів E та інтервалу енергій dE в елементі потоку, що рухається вниз за течією, визначаються як $E = E_i \mathcal{E}_{\text{ad}} \mathcal{E}_{\text{rad}}$, $dE = dE_i \mathcal{E}_{\text{ad}} \mathcal{E}_{\text{rad}}^2$, де індексом i позначено величини на момент виходу елемента потоку з області прискорення. Опис еволюції спектру здійснено в лагранжевих координатах a , що дозволяє наочно врахувати як втрати енергії на адіабатичне розширення (функція $\mathcal{E}_{\text{ad}}(a) \leq 1$), так і радіаційні втрати внаслідок синхротронного випромінювання та зворотного ефекту Комптона (функція $\mathcal{E}_{\text{rad}}(a, E) \leq 1$). Спектр (1) в будь-якій точці всередині ЗН розраховується як

$$N(E, a)dE = K_s \mathcal{K}(a) E^{-s} \mathcal{E}_{\text{rad}}^{s-2} \exp \left[- \left(\frac{E}{E_{\text{max},s} \mathcal{E}(a) \mathcal{E}_{\text{ad}} \mathcal{E}_{\text{rad}}} \right)^\alpha \right] dE,$$

де спектральний індекс s є постійним вниз за течією (оскільки радіаційні втрати, як видно з наведеної формули, є ефективними лише в області енергій $E \sim E_{\text{max}}$, а адіабатичні втрати не залежать від E),

$$\mathcal{K}(a) = \left(\frac{P(a, t)}{P_s(t)} \right)^{-b/2} \left(\frac{\rho_o(a)}{\rho_o(R)} \right)^{-b/3-(s-1)/3} \left(\frac{\rho(a, t)}{\rho_s(t)} \right)^{5b/6+(s+2)/3},$$

$$\mathcal{E}(a) = \left(\frac{P(a, t)}{P_s(t)} \right)^{q/2} \left(\frac{\rho_o(a)}{\rho_o(R)} \right)^{q/3} \left(\frac{\rho(a, t)}{\rho_s(t)} \right)^{-5q/6} \left(\frac{B_o(a)}{B_o(R)} \right)^\lambda.$$

Методика обчислення зворотного Комптон-ефекту потребує розрахунку багатократних інтегралів в кожній точці об'єкта, відтак, в поєднанні з необхідністю розрахунку тривимірного розподілу параметрів течії й еволюції спектру КП, вимагає надзвичайних обчислювальних ресурсів. З метою здійснення детального тривимірного моделювання електронного γ -випромінювання від ЗН в підрозділі 3.3 нами виведено аналітичну апроксимацію для спектрального розподілу енергії випромінювання електрона з γ -фактором в полі чорнотільних фотонів з температурою T :

$$p(\gamma, \varepsilon) = \frac{2e^4 kT}{\pi \hbar^3 c^2} \gamma^{-2} \times \frac{\pi^2}{6} \eta_c \left(\exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\eta_o}{\eta_c} \right)^{1/2} \right] + \right. \\ \left. + 2\eta_o \exp \left[-\frac{5}{7} \left(\frac{\eta_o}{\eta_c} \right)^{0.7} \right] \right) \exp \left[-\frac{2\eta_o}{3\eta_c} \right], \quad (2)$$

параметри η_c, η_o є відомими функціями γ і енергії ε випроміненого гамма-фотона; усі інші позначення мають загальноприйняте значення. Основною ідеєю використаного підходу є розділення вихідного інтегралу, який описує випромінювальну здатність електронів, на два незалежні доданки, які можуть бути промасштабовані. Ця властивість забезпечує високу точність апроксимації у широкому діапазоні параметрів, від границі Томпсона до режиму Кляйна–Нішини. А саме, апроксимація (2) є точною в наближенні Томпсона та відтворює детальні розрахунки з максимальною похибкою до 30% в діапазоні параметрів, які дають помітний вклад у випромінювання.

Зіткнення прискорених протонів з тепловими протонами повинно мати наслідком народження і розпад нейтральних піонів, а відтак, адронне γ -випромінювання. Слід очікувати, що таке випромінювання буде домінуючим у спектрах ЗН за умов, коли концентрація протонів-мішеней буде високою. Такі умови природньо виникають у ЗН, які взаємодіють з молекулярними хмарами. Саме тому модель теплових рентгенівських композитів, запропонована в підрозділі 2.1, дає підстави очікувати, що такі ЗН будуть джерелами протонного γ -випромінювання. В підрозділі 3.4 розглянуто детально картину взаємодії УХ з хмарою та здійснено відповідні оцінки γ -потоків на прикладі залишка MSH 11–61A.

Розділ 4 присвячений теоретичному моделюванню та аналізу розподілу поверхневої яскравості адиабатичних ЗН, яка формується внаслідок випромінювання прискорених електронів. Синтезовано карти ЗН в радіо-, рентгенівському та γ -діапазонах. З метою виявлення ступеня

впливу факторів, пов'язаних з процесами прискорення електронів та властивостями магнітного поля, спершу розглянуто ЗН в однорідному середовищі та однорідному магнітному полі. Причини асиметрій в розподілі яскравості виявлено шляхом моделювання нетеплового випромінювання ЗН в неоднорідних середовищах і магнітних полях.

В підрозділі 4.1 синтезовано синхротронні радіо-, рентгенівські та гама-карти адіабатичних ЗН в однорідних МЗС і МП. Нетеплові карти розраховано за різних припущень про залежність ефективності інжекції і максимальної енергії електронів від косини УХ, а також для різних орієнтацій міжзоряного МП відносно спостерігача. Підсумуємо виявлені властивості нетеплових карт ЗН.

a) Азимутальні зміни рентгенівської та гама-яскравості зумовлені в основному змінами ζ , σ_B і E_{\max} , а радіояскравості – лише ζ і σ_B . Вища напруженість B МП зумовлює підняття яскравості в рентгенівському і її зменшення в γ -діапазоні. Справді, вище МП зумовлює суттєвіші радіаційні втрати випромінюючих електронів (а отже, зменшення їх кількості) й, відтак, до падіння яскравості внаслідок зворотного Комптон-ефекту. На противагу, синхротронне випромінювання в цих областях посилюється, оскільки воно пропорційне до $B^{3/2}$. Радіальні профілі яскравості залежать від роду параметрів. Вони є дуже чутливими до адіабатичного індексу: $\gamma < 5/3$ зумовлює вищу компресію плазми, вищий градієнт густини та МП вниз за течією, вищі радіаційні втрати, й тому профілі стають радіально-тоншими. Товщина профілів в радіодіапазоні залежить від індекса b , який наближено описує еволюцію ефективності інжекції $\zeta \propto V^{-b}$, де V – швидкість УХ; чим вище значення b (тобто тим меншою була ефективність інжекції в попередні моменти часу), тим радіально-вужчими є лімби на радіокартах. Товщина в рентгенівському діапазоні залежить від ступеня компресії магнітного поля ударною хвилею: вона тим менша, чим вищою є фактор компресії σ_B (й відтак, напруженість магнітного поля).

b) У випадку, якщо максимальна енергія та ефективність інжекції не змінюються по поверхні ЗН, поведінка азимутальних розподілів яскравості є протилежною в радіо- і гама-діапазонах: яскраві радіоарки (в областях підвищеного МП) відповідають затемненим областям в гамадіапазоні, – всупереч тому, що спостерігається в SN 1006. Поверхневі варіації E_{\max} і ζ можуть до певної міри подавити цей ефект; для цього вони повинні зростати в напрямку посилення МП.

В підрозділі 4.2 виведено наближені аналітичні формули для азимутальних та радіальних розподілів яскравості оболонкових ЗН внаслідок випромінювання релятивістських електронів. Вони наочно по-

казують ступінь впливу різних факторів на візерунки розподілів. Нехай на фронті УХ формується спектр прискорених електронів $N(E) = KE^{-s(E)} \exp[-(E/E_{\max})^\alpha]$, зміни фактора компресії магнітного поля, ефективності інжекції та максимальної енергії електронів від кута Θ_0 між зовнішнім магнітним полем та нормаллю до УХ відтворюються відповідно функціями $\sigma_B(\Theta_0)$, $\varsigma(\Theta_0)$ і $\mathcal{F}(\Theta_0)$. Тоді азимутальний (за кутом φ) та радіальний (за відстанню ϱ) розподіли радіояскравості наближено описуються як

$$S_r(\varphi, \varrho) \propto \varsigma(\varphi) \sigma_B(\varphi)^{(s+1)/2} I_r(\varrho),$$

рентгенівська яскравість описується наближено як

$$S_x(\varphi, \varrho) \propto \varsigma(\varphi) \sigma_B(\varphi)^{(s+1)/2} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon_m(\varphi)}{\mathcal{F}(\varphi)}\right)^\alpha\right] I_x(\varphi, \varrho),$$

яскравість в гама-діапазоні внаслідок зворотного Комптон-ефекту в основному визначається такими факторами

$$S_{ic}(\varphi, \varrho) \propto \varsigma(\varphi) \exp\left[-\left(\frac{\epsilon_m}{\mathcal{F}(\varphi)}\right)^\alpha\right] I_{ic}(\varphi, \varrho),$$

де $\epsilon_m = E_m/E_{\max}$, E_m – енергія електронів, які дають максимальний вклад у випромінювання на частоті, для якої побудована карта яскравості, орієнтація міжзоряного магнітного поля відносно спостерігача враховується кутом ϕ_0 між магнітним полем і променем зору, а кут φ в правих частинах формул розраховується як $\cos \varphi \approx \cos \Theta_0 / \sin \phi_0$. Вирази для I_r , I_x , I_{ic} наведено в дисертаційній роботі, вони відтворюють проекційний ефект внаслідок зростання концентрації з наближенням до фронту УХ і залежать від кількох факторів (b , γ та ін.). Поблизу УХ, ці формули достатньо точно повторюють чисельні розрахунки й відтворюють усі властивості розподілу яскравості, описані вище. Тому вони можуть бути зручним засобом для швидкого аналізу нетеплових карт ЗН.

В підрозділах 4.3 і 4.4 досліджено роль неоднорідностей міжзоряних середовища і магнітного поля у формуванні різного типу асиметрій в поверхневому розподілі нетеплової яскравості ЗН. Асиметрії в розподілі радіояскравості виникають, якщо промінь зору не є паралельним до градієнта густини середовища чи магнітного поля. Виділено параметри, які є зручними для опису асиметрій, а саме: азимутальна відстань між двома максимумами та відношення максимумів яскравості в двох арках. Вони забезпечують діагностику властивостей МП та КП при порівнянні моделей зі спостереженнями. ЗН з двома арками різної яскравості

пояснюються градієнтом густини МЗС, чи, більш вірогідно, градієнтом міжзоряного МП, який має компонент, перпендикулярний до радіоарок. ЗН зі збіжними арками пояснюються компонентом градієнта між двома арками (рис. 3). Неоднорідність зовнішнього МП зумовлює асиметрії також в рентгенівському та гама-діапазонах. Ступінь асиметрії залежить від деталей прискорення електронів та відрізняється в різних діапазонах. Найчутливішими є зображення ЗН в рентгенівських фотонах, а найменше градієнт поля помітний в γ -променях.

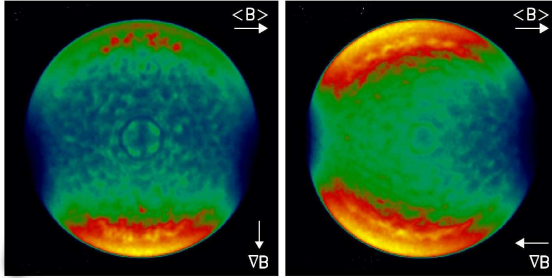


Рис. 3. Карти радіояскравості ЗН в неоднорідному магнітному полі для моделі з ізотропною інжекцією та незначним контрастом E_{\max} по поверхні ЗН. Вектори поля і його градієнта лежать в площині проекції, їх напрямки вказані на рисунку.

Моделювання нетеплового випромінювання ЗН, яке базується на певних теоретичних припущеннях, є важливою складовою вивчення поведінки КП в околі сильних беззіткнювальних нерелятивістських УХ. Суттєвим також є інший напрям досліджень, а саме: аналіз експериментальних даних, модельно-незалежні методи тестування гіпотез та оцінки параметрів за використання результатів спостережень.

Розділ 5 присвячений експериментальним методам вивчення властивостей КП в конкретному ЗН, а саме в залишку SN 1006.

Результати його спостережень в жорсткому гама-діапазоні системою черенковських телескопів HESS були опубліковані в [82]. В підрозділі 5.1 описано спостереження SN 1006 в радіо- і рентгенівському діапазонах.

Нову радіокарту SN 1006 одержано на основі обробки архівних даних з телескопів VLA і Parkes. Зображення відтворює випромінювання усіх просторових структур з кутовим масштабом від кількох кутових секунд до 15 кутових мінут (рис. 4).

Проведено обробку спостережень SN 1006 рентгенівською обсерваторією XMM-Newton. Здійснено просторово-розділений спектральний

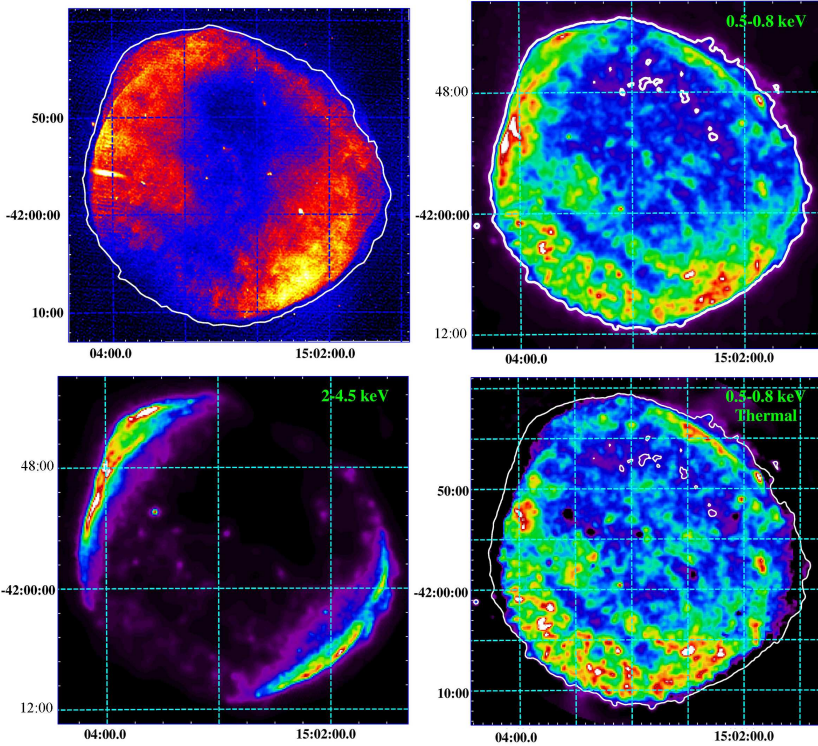


Рис. 4. Зображення SN 1006 в радіодіапазоні на частоті 1.5 ГГц (зверху ліворуч), в рентгенівському з енергіями фотонів 0.5–0.8 кеВ (зверху праворуч) та 2–4.5 кеВ (знизу ліворуч). “Чисте” теплове зображення SN 1006 в діапазоні 0.5–0.8 кеВ показано знизу праворуч.

аналіз ряду регіонів, що покривають увесь край ЗН. Виявлено азимутальні розподіли ряду параметрів, які будуть використані для вивчення властивостей електронів, прискорених в ЗН, та магнітного поля. Одержано карти SN 1006 в рентгенівських променях з різними енергіями (рис. 4). Зображення відрізняються суттєво, що свідчить про відмінне походження рентгенівського випромінювання: в м’якому діапазоні домінує теплове випромінювання, а в жорсткому – синхротронне випромінювання релятивістських електронів. Результати застосовано до створення “чистого” теплового зображення SN 1006 в діапазоні 0.5–0.8 кеВ (шляхом видалення вкладу нетеплового компонента). Це зображення

(рис. 4) значно відрізняється від вихідного зображення в цьому діапазоні, особливо поблизу яскравих арок, що свідчить про помітний вклад випромінювання прискорених електронів навіть в області м'якого рентгену. Цей факт є важливим для вивчення розподілу матеріалу, який зумовлює теплове випромінювання, зокрема структури речовини зорі, яка була викинута під час спалаху наднової.

В подальших підрозділах (підрозділи 5.2–5.3) запропоновано новий метод моделювання розподілу поверхневої яскравості ЗН в гама-діапазоні на основі його радіо- та рентгенівської карт та розроблено новий метод визначення тривимірної орієнтації міжзоряного МП; обидва методи застосовано для SN 1006. Наприкінці (підрозділ 5.4), за використання спостережуваних даних в радіо-, рентгенівському та γ -діапазонах, накладено обмеження на властивості КП і МП в SN 1006.

Розташування яскравих та темних областей в жорстких рентгенівських і γ -променях добре корелює в RX J1713.7-3946, Vela Jr., SN 1006. Тому можливо, що γ -випромінювання в цих ЗН “відслідковує” ті ж структури, що зумовлюють синхротронне випромінювання електронів. За такого сценарію, електрони з енергіями в десятки й сотні TeV можуть бути відповідальними як за рентгенівське (синхротрон), так і за γ -випромінювання (зворотний Комптон-ефект). В підрозділі 5.2 ця можливість досліджується шляхом розробки та застосування модельно-незалежного методу побудови гама-зображення, яке матиме залишок, якщо в γ -діапазоні домінуватиме випромінювання релятивістських електронів через зворотний Комптон-ефект. Метод використовує радіокарту ЗН та результати просторово-розділеної рентгенівської спектроскопії (з метою виявлення властивостей просторового розподілу релятивістських електронів). Карта SN 1006, побудована за використання методу, добре корелює з зображенням, одержаним HESS [82]. Отже, подібність карт в радіо-, жорсткому рентгенівському та гама-діапазонах може розглядатися як свідчення того, що γ -випромінювання SN 1006, яке спостерегла система HESS, є лептонного походження.

Розподіл радіояскравості ЗН залежить від кута ϕ_0 між магнітним полем і променем зору. Цю властивість використано в підрозділі 5.3 для розробки нового методу, який дозволяє визначити тривимірну орієнтацію міжзоряного магнітного поля. В основі методу є порівняння теоретичних та експериментальних азимутальних розподілів поверхневої яскравості в радіодіапазоні. Метод застосовано до радіокарти SN 1006 (рис. 5). Оскільки не відомо, як змінюється ефективність інжекції по поверхні ЗН, розглянуто три моделі інжекції. Знайдено, що спостережувані дані найкраще узгоджуються з такими кутами: $\phi_0 = 70^\circ \pm 4.2^\circ$ у

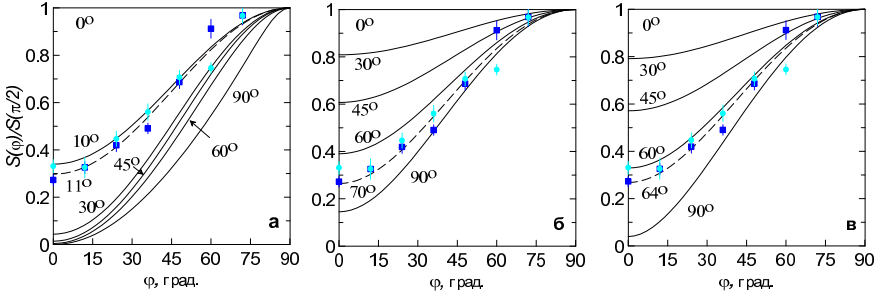


Рис. 5. Азимутальний розподіл радіояскравості в SN 1006. Теоретичні розрахунки показано лініями для різних кутів ϕ_0 та трьох моделей інжекції: квазі-паралельної (а), ізотропної (б) та квазі-перпендикулярної (в). Дані спостережень показано з похибками в межах 1σ .

випадку ізотропної інжекції, $\phi_0 = 64^\circ \pm 2.8^\circ$ для квазі-перпендикулярної та $\phi_0 = 11^\circ \pm 0.8^\circ$ для квазі-паралельної інжекції. В останньому випадку SN 1006 повинен бути яскравим в центрі проекції, що суперечить спостереженням. Отже, наш аналіз заперечує можливість реалізації квазі-паралельного сценарію в цьому ЗН.

В підрозділі 5.4 представлено новий підхід до порівняння моделей зі спостереженнями. Просторові розподіли характеристик випромінювання SN 1006 використовуються для накладання обмежень на кінетику електронного компонента КП і на властивості МП. Радіальні профілі яскравості в радіодіапазоні використано для накладання обмежень на можливі значення еволюційного параметра b ($\varepsilon \propto V^{-b}$): $-1 \leq b \leq 0$. Азимутальний розподіл частоти обрізання рентгенівського спектру дозволив визначити модель максимальної енергії електронів: 1) вона фіксується обмеженим часом прискорення; 2) відношенням середньої довжини вільного пробігу до ларморового радіуса електрона $\eta = 1.5$; 3) на паралельних ділянках УХ $E_{\max} = 7$ TeV; 4) вона є вищою в 3.25 рази на перпендикулярних ділянках. Радіальні профілі яскравості в жорсткому рентгенівському діапазоні узгоджуються з ефективним магнітним полем в SN 1006 в $32 \mu\text{Gs}$, що добре узгоджується з оцінками в “лептонній” моделі з [82]. Одержано вирази для радіо-, рентгенівського та гама-спектрів випромінювання від усього ЗН у формі, що вказує, які параметри відповідають за форму, а які за амплітуду спектрів. Показано, що розроблена модель забезпечує також узгодження розрахованих спектрів зі спостереженнями.

Розділ 6 є продовженням “експериментальної” частини роботи. Як-

що в попередньому розділі накладалися обмеження на моделі прискорення КП шляхом аналізу індивідуального ЗН, то тут застосовуються методи статистичного аналізу вибірок ЗН в нашій та близьких галактиках. Такий підхід дозволяє виявити закономірності поведінки КП в ЗН, які є типовими у більшості випадків.

Інтенсивність синхротронного радіовипромінювання залежить від напруженості магнітного поля та кількості прискорених електронів. Однак, про механізми, які зумовлюють турбулентне посилення та/або компресію МП та інжекцію електронів в УХ, мало що відомо. З точки зору спостережень, відомою є так звана “ $(\Sigma - D)$ -залежність”, власне емпірична кореляція між розмірами ЗН (D) та їх радіояскравістю (Σ). Відомими є кілька спроб (остання – [83]) пояснити залежність $\Sigma - D$ як усереднений еволюційний трек “типового” ЗН. В підрозділі 6.1 наводяться аргументи, які заперечують це твердження. Беркгуїзен [84] виявила статистично значимі кореляції між Σ й D і густиною МЗС (n_o): менші (і яскравіші) ЗН, як правило, знаходяться в густіших середовищах (кореляція між n_o і D була відома вже кількома роками раніше; див. рис. 4 в [85]). Отже, кореляції між Σ , D і n_o є радше наслідком ефекту еволюції залишків в різних зовнішніх умовах. Спільним ефектом цих кореляцій є чіткий тренд n_o вздовж $(\Sigma - D)$ -залежності (рис. 6).

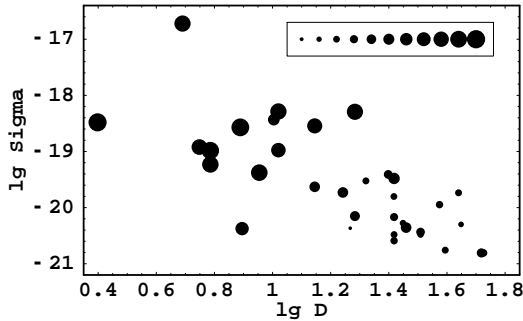


Рис. 6. Розподіл ЗН в просторі параметрів $\lg D - \lg \Sigma$ (D вимірюється в пк, Σ – в $\text{Вт м}^{-2} \text{Гц}^{-1} \text{стер}^{-1}$). Розміри крапок пропорційні до $\lg n_o$, в легенді вказано порядок розмірів, які відповідають зміні $\lg n_o$ від -1.5 до 1.0 , з кроком 0.25 (n_o вимірюється в см^{-3}). Тут і далі представлено ЗН з вибірки [84].

Метою розділу є показати, що традиційна $(\Sigma - D)$ -залежність відкриває лише незначну частину інформації, яка міститься в даних. Додаткові висновки можна зробити, аналізуючи розподіли в тривимірному просторі параметрів $\Sigma - D - n_o$.

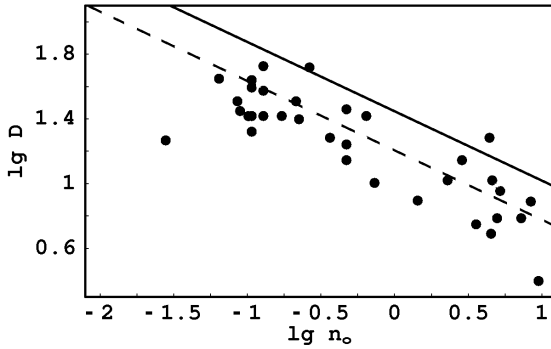


Рис. 7. Розподіл ЗН в просторі $\lg n_o - \lg D$. Кореляційну залежність показано штрихованою лінією. Теоретичну пряму, яка відповідає закінченню адіабатичної стадії, показано суцільною лінією.

В підрозділі 6.2 описуються основні підходи, які використовуються далі для статистичного аналізу вибірок ЗН. Показано також, що більшість видимих в радіодіапазоні ЗН невдовзі завершать адіабатичну стадію еволюції, і що ЗН перестають випромінювати в радіодіапазоні в епоху, близьку до кінця адіабатичної стадії. Справді, кореляція між D і n_o , знайдена в [84], близька до $D \simeq 0.54 D_{tr}$, де $D_{tr} = D(t_{tr}) \propto n_o^{-0.4}$ – теоретичний вираз для діаметра ЗН наприкінці адіабатичної стадії; важливо, що відношення D/D_{tr} не залежить від n_o . Це видно також з рис. 7, де дані Беркгуйзен [84] показано разом з залежністю $D_{tr}(n_o)$.

В підрозділі 6.3 тестуються моделі синхротронного випромінювання з певними припущеннями про поведінку магнітного поля і прискорених електронів. Розглянемо параметризацію

$$\Sigma(D, n_o) \propto D^p n_o^q, \quad D < D_2.$$

Параметри p і q можуть бути одержані незалежно з вибірки ЗН шляхом застосування лінійної регресії; таким чином було побудовано рис. 8. На рисунку також нанесено точки, які відповідають двом моделям поведінки КП і МП в ЗН: “Model A” означає випадок, коли частка енергії, яка передається до КП і МП від УХ є постійною (коли МП спершу турбулентно посилюється, а потім компресується УХ [83]); “Model B” відповідає випадку, коли постійною є лише частка енергії, яка передається КП, а МП є постійним (тобто лише компресується). Модель А суперечить даним спостережень.

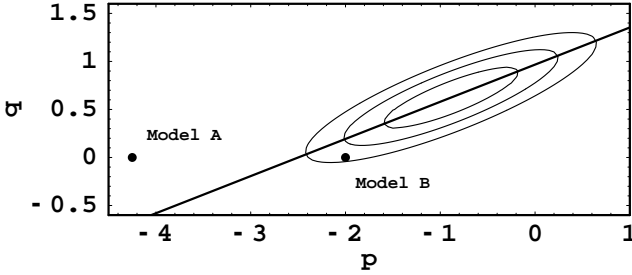


Рис. 8. Довірчі рівні (для 1, 2 і 3σ) в просторі параметрів $p-q$. Лінія показує напрям максимального розкиду. Показано також два теоретичні передбачення: “Model A” $(-17/4, 0)$ і “Model B” $(-2, 0)$.

Висновки з підрозділів 6.2 і 6.3 підтверджуються в підрозділі 6.4 аналізом незалежної вибірки ЗН, а саме ЗН з галактики М33.

В підрозділі 6.5 аналізується кумулятивний розподіл кількості ЗН з розміром, меншим за даний діаметр (залежність $N-\lg D$); традиційне пояснення природи цього розподілу породжує парадокс. Для Магелланових Хмар було одержано майже лінійний розподіл ($N \propto D^{1.2}$) для ЗН з діаметрами аж до 40 пк. Лінійний розподіл звичайно розглядався як свідчення того, що ЗН знаходяться на стадії вільного розлітання. Однак, якщо діаметр ЗН складає 40 пк, нагребена маса складає $\sim (1000/n_0) M_{\odot}$. Отже, такі ЗН повинні були вже давно перейти в адіабатичну стадію, а тому достатньо сильно сповільнитися. Шлях розв’язку цього парадокса природньо виникає в нашому підході: кумулятивний розподіл ЗН за розмірами визначається не законом руху УХ, а статистичним розподілом густин МЗС, в яких розвиваються залишки. Це наочно продемонстровано на рис. 9.

В додатках наведено проміжні математичні виведення, результати яких використано в основній частині дисертації. Так, в додатках А і В отримано наближені розподіли параметрів, які описують еволюцію потоку та популяції прискорених електронів за фронтом сильної адіабатичної ударної хвилі, яка поширюється в середовищах зі степеневим (додаток А) і однорідним (додаток В) розподілами густини. Dodatok C присвячено виведенню та аналізу меж застосування наближених формул, які описують азимутальний та радіальний розподіли поверхневої яскравості адіабатичного ЗН в однорідному середовищі; аналіз факторів, які є визначальними у формуванні розподілів яскравості в радіо-, рентгенівському та гама-діапазонах, проведено на основі цих формул

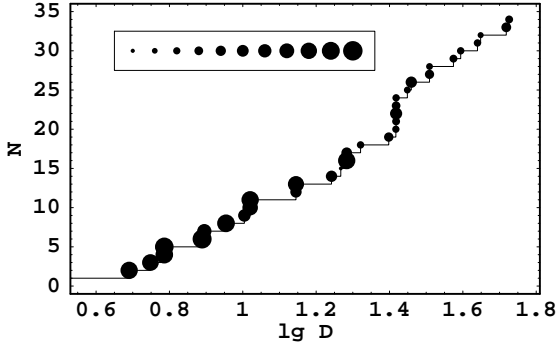


Рис. 9. Кумулятивний розподіл ЗН за діаметрами. Розмір крапок пропорційний $\lg n_0$ для останнього ЗН, який увійшов в кумулятив. Розміри відповідають густинам середовищ так само, як на рис. 6.

в розділі 4.2. В додатку D наведено методику та відповідні теоретичні виведення, необхідні для розрахунку інтегралу, який описує радіаційні втрати популяції високоенергетичних електронів вниз за течією після проходження нею ударної хвилі, що рухається в середовищі з неоднорідним розподілом густини та/або напруженості магнітного поля; інтеграл використовується для синтезу карт поверхневої яскравості ЗН в неоднорідних середовищах і полях (підрозділ 4.4). Додатки E і F присвячені виведенню повних виразів, які описують розподіл яскравості (додаток E) і спектр (додаток F) адіабатичного ЗН в однорідному середовищі, зумовлені синхротронним випромінюванням і зворотним ефектом Комптона; вирази застосовано до аналізу даних спостережень залишка наднової SN 1006 в підрозділі 5.4.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є підсумком дослідження властивостей прискорення космічних променів на прямих ударних хвилях в оболонкових залишках наднових зір. Вона містить як теоретичне моделювання, так і аналіз спостережуваних даних. Структурно робота спершу розв'язує ряд задач динаміки УХ в неоднорідних середовищах та кінетики заряджених часток в околі за фронтом УХ, відтак проводиться моделювання нетеплового випромінювання релятивістських електронів в ЗН. Порівняння моделей зі спостереженнями проводиться на прикладі залишка наднової 1006 року та шляхом статистичного аналізу вибірок ЗН

в нашій та сусідніх галактиках.

Робота започатковує новий напрям аналізу карт розподілу поверхневої яскравості залишків наднових зір; в ній розроблено ряд нових методів моделювання еволюції і випромінювання КП в ЗН.

Основні результати досліджень, представлених у дисертації, такі:

1. Радіокарта ЗН та результати просторової рентгенівської спектроскопії містять інформацію про розподіл релятивістських електронів і магнітного поля в ЗН. Ця інформація може бути використана для передбачення зображення ЗН в гама-діапазоні внаслідок випромінювання електронів шляхом зворотного ефекту Комптона. Згенеровані таким чином зображення SN 1006 співпадають з картою, одержаною під час спостережень системи черенковських телескопів HESS. Цей факт свідчить на користь ідеї про те, що гама-випромінювання SN 1006 є електронним за своєю природою.
2. Карты яскравості ЗН внаслідок нетеплового випромінювання є важливим джерелом інформації для теоретичного і експериментального вивчення властивостей космічних променів і магнітного поля в ЗН. Теоретичні карти розподілу поверхневої яскравості ЗН внаслідок електронного випромінювання в радіо-, рентгенівському та в гама-діапазоні виявляють, що визначальними факторами формування азимутального розподілу яскравості є залежності ефективності інжекції, максимальної енергії та компресії магнітного поля від кута між напрямком руху УХ та вектором напруженості магнітного поля; а радіального розподілу – часова еволюція ефективності інжекції, напруженість магнітного поля та адіабатична стала.
3. Неоднорідне середовище і/або неоднорідне магнітне поле зумовлюють асиметрію в розподілі поверхневої яскравості ЗН в радіо-, рентгенівському та гама-діапазонах. ЗН з двома бічними арками різної яскравості зумовлені градієнтом густини МЗС або, більш імовірно, градієнтом міжзоряного МП, перпендикулярним до арок. Збіжні арки виникають, коли градієнт є паралельним до них. Ступінь асиметрії морфології залежить від властивостей інжекції та прискорення електронів; він є різним у різних діапазонах. На загал, найчутливішою до градієнта міжзоряного МП є синхротронна рентгенівська яскравість. Роль градієнта міжзоряного МП найменш помітною є в гама-діапазоні.
4. Аналіз даних спостережень ЗН повинен містити не лише опрацьовані спектри, а й карт яскравості в різних діапазонах. Зокрема, азимутальний розподіл радіояскравості дозволяє визначити кут між між-

зоряним МП і напрямком на спостерігача, а також накласти обмеження на модель електронної інжекції; у випадку SN 1006 цей кут складає 70° , а ефективність інжекції не повинна залежати від кута між зовнішнім МП і нормаллю до УХ. Азимутальний розподіл частоти обрізання спектру, який одержується зі просторово-розділеного спектрального аналізу рентгенівських даних, визначає модель максимальної енергії електронів; у випадку SN 1006 максимальна енергія обмежена часом прискорення часток, а відношення середньої довжини вільного пробігу електронів до їх ларморового радіуса 1.5. На паралельних ділянках УХ максимальна енергія складає 7 TeV; вона є більшою в 3.3 рази на перпендикулярних УХ. Товщина радіально-го профілю рентгенівської яскравості узгоджується з напруженістю МП в 50 μGs . Середня напруженість МП в SN 1006 складає 32 μGs , що добре узгоджується з оцінками, проведеними колаборацією HESS в рамках “лептонної” моделі γ -випромінювання цього ЗН.

5. Типова картина еволюції ЗН складається з трьох стадій, які описуються відмінними моделями: вільного розлітання, адіабатичної та радіаційної. В роботі виявлено необхідність введення додаткової стадії, перехідної між адіабатичною та радіаційною, оскільки властивості “пост-адіабатичної” УХ не можуть бути адекватно описані ані в рамках адіабатичного, ані радіаційного сценаріїв. Тривалість перехідної фази складає близько 70% віку ЗН на момент, коли порушення умов адіабатичності починає суттєво впливати на динаміку УХ. Показано, що тривалість фази практично не залежить від градієнта густини оточуючого середовища, якщо УХ поширюється в сторону наростання густини. Розроблено наближені аналітичні методи гідродинамічного опису динаміки УХ та течії за фронтом протягом перехідної та радіаційної фаз, для УХ, яка поширюється в середовищі з неоднорідним розподілом густини. Знайдено аналітичні розв’язки системи диференціальних рівнянь, які описують рух радіаційної УХ в однорідному середовищі чи середовищі зі степеневим розподілом густини.
6. Теплові рентгенівські композити, клас ЗН з підвищеною яскравістю центральної частини ЗН внаслідок теплового рентгенівського випромінювання та оболонко-подібним розподілом радіояскравості, можуть бути пояснені як ефект проєкції дво- чи тривимірного оболонкового ЗН, який розвивається в неоднорідному середовищі з масштабом неоднорідності ≤ 10 пк. Такі умови найчастіше трапляються у випадках зіткнень ЗН з молекулярними хмарами, тому теплові рентгенівські композити є перспективними кандидатами для спостережень гама-випромінювання внаслідок зіткнень прискорених протонів

- з протонами-мішенями в хмарах.
7. Ефективність інжекції електронів в процес прискорення Фермі I роду (частка прискорених електронів) залежить від рівня теплової рівноваги між електронами та протонами в плазмі після її проходження через фронт УХ та є наслідком двох конкуруючих процесів: електрони з вищою температурою мають більше шансів повернутися назад до фронту УХ, щоб перетнути його, проте вищий рівень турбулентності, який призвів до вищої температури, перешкоджає цим електронам перетнути фронт й відтак розпочати прискорення.
 8. Середня поверхнева яскравість Σ , радіус R і концентрація середовища n в оболонкових ЗН корелюють між собою. Кореляція між першими двома характеристиками є відомою (Σ - D)-залежністю. Аналіз кореляцій в трьох вказаних координатах показує, що залежність Σ - D є наслідком еволюції ЗН в різних умовах, а не еволюційним треком "типового" ЗН. Статистичний аналіз вибірок ЗН показує, що ЗН перестають випромінювати в радіодіапазоні в епоху, близьку до кінця адіабатичної стадії; що моделі синхротронного випромінювання з припущеннями про те, що частка енергії, яка передається від УХ до КП і МП, є постійною, не підтверджуються даними; що нахил кумулятивного розподілу ЗН за розмірами визначається не законом руху УХ, а розподілом густин МЗС, в яких розвиваються ЗН.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Petruk O. X-ray emission of the remnants of aspherical supernova explosions / Petruk O. // Кинематика и физика небесных тел. Дополнок. – 2000. – № 3. – С. 132-135.
2. Petruk O. Approximations of the self-similar solution for a blastwave in a medium with power-law density variation / Petruk O. // Astr. & Aph. – 2000. – V. 357. – P. 686-696.
3. Petruk O. Thermal X-ray composites as an effect of projection / Petruk O. // Astr. & Aph. – 2001. – V. 371. – P. 267-273.
4. Petruk O. X-rays from Supernova Remnants in 3-D: Models and Effects / Petruk O. // Astr. Society of Pacific Conf. Proc. – 2001. – V. 251. – P. 266-267.
5. Petruk O. Model for synchrotron X-rays from shell supernova remnants in nonuniform interstellar medium and nonuniform magnetic field / Petruk O. // J. Phys. Studies. – 2002. – V. 6, No. 4. – P. 455-461.

6. Berezhinsky V. Spectra of ultra high energy cosmic rays from astrophysical sources. Uniform extragalactic magnetic field / Berezhinsky V., Grigoriyeva S., Petruk O. // Вісник Київського національного університету. *Астрономія*. – 2003. – Т. 40. – С. 60-63.
7. Bandiera R. Analytic solutions for the evolution of radiative supernova remnants / Bandiera R., Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 2004. – V. 419. – P. 419-423.
8. Petruk O. On the transition of the adiabatic supernova remnant to the radiative stage in a nonuniform interstellar medium / Petruk O. // *J. Phys. Studies*. – 2005. – V. 9, No. 4. – P. 364–373.
9. Petruk O. Influence of thermalisation on electron injection in supernova remnant shocks / Petruk O., Bandiera R. // *J. Phys. Studies*. – 2006. – V. 10. – P. 66-73.
10. Petruk O. The artificial broadening of the high-energy end of electron spectrum in supernova remnants / Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 2006. – V. 460. – P. 375-379.
11. Петрук О. Синхротронне та теплове випромінювання залишків наднових зір в рентгенівському діапазоні. Слабкі радіаційні втрати електронів / Петрук О., Бешлей В. // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2007. – Т. 23, № 1. – С. 25-39.
12. Гнатик Б. Перехід залишків Наднових з адіабатичної до радіаційної стадії еволюції. Аналітичний опис / Гнатик Б., Петрук О., Тележинський І. // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2007. – Т. 23, № 4. – С. 195-206.
13. Orlando S. On the origin of asymmetries in bilateral supernova remnants / Orlando S., Bocchino F., Reale F., Peres G., Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 2007. – V. 470. – P. 927-939.
14. Петрук О. Синхротронне випромінювання залишків наднових зір в рентгенівському діапазоні. Експоненційне обрізання спектру електронів / Петрук О., Бешлей В. // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2008. – Т. 24, № 3. – С. 216-230.
15. Petruk O. Approximation of the radiation power of electrons due to the inverse-Compton process in the black-body photon field / Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 2008. – V. 499. – P. 643-648.
16. Petruk O. Some properties of synchrotron radio and inverse-Compton gamma-ray images of supernova remnants / Petruk O., Beshley V., Bocchino F., Orlando S. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2009. – V. 395. – P. 1467-1475.
17. Petruk O. Aspect angle for interstellar magnetic field in SN 1006 / Petruk O., Dubner G., Castelletti G., Bocchino F., Iakubovskiy D., Kirsch M.,

- Miceli M., Orlando S., Telezhinsky I. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2009. – V. 393. – P. 1034-1040.
18. Miceli M. Thermal emission, shock modification, and X-ray emitting ejecta in SN 1006 / Miceli M., Bocchino F., Iakubovskiy D., Orlando S., Telezhinsky I., Kirsch M., Petruk O., Dubner G., Castelletti G. // *Astr. & Aph.* – 2009. – V. 501. – P. 239-249.
 19. Petruk O. Predicted γ -ray image of SN 1006 due to inverse Compton emission / Petruk O., Bocchino F., Miceli M., Dubner G., Castelletti G., Orlando S., Iakubovskiy D., Telezhinsky I. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2009. – V. 399. – P. 157-165.
 20. Bandiera R. A statistical approach to radio emission from shell-type SNRs. I. Basic ideas, techniques, and first results / Bandiera R., Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 2010. – V. 509. – id. A34 (9 p.).
 21. Orlando S. Effects of non-uniform interstellar magnetic field on synchrotron X-ray and inverse-Compton γ -ray morphology of supernova remnants / Orlando S., Petruk O., Bocchino F., Miceli M. // *Astr. & Aph.* – 2011. – V. 526. – id. A129 (15 p.)
 22. Petruk O. Observational constraints on the modeling of SN1006 [Електронний ресурс] / Petruk O., Beshley V., Bocchino F., Miceli M., Orlando S. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2010. – accepted. – 15 p. – <http://arxiv.org/pdf/1012.4586v1>.
 23. Petruk O. Radio, X-ray and gamma-ray surface brightness profiles as powerful diagnostic tools for non-thermal SNR shells [Електронний ресурс] / Petruk O., Orlando S., Beshley V., Bocchino F. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2010. – accepted. – 15 p. – <http://arxiv.org/pdf/1012.4579v1>.
 24. Гнатик Б. Повний опис точкового вибуху в неоднорідному середовищі в рамках радіаційної газодинаміки / Гнатик Б., Петрук О. // *Математичні методи та фізико-механічні поля.* – 2002. – Т. 45, № 4. – С. 53-60.
 25. Petruk O. A New Model for the Thermal X-ray Composites and the Neutral Pion Decay Gamma-Rays from Supernova Remnants / Petruk O. // *Astrophysical Sources of High Energy Particles and Radiation* / Eds. Wefel J., Shapiro M., Stanev T. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 93-100.
 26. Петрук О. Рух радіативної ударної хвилі в середовищі з неоднорідним розподілом густини / Петрук О. // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур* / *Наук. збірник в 2 тт.* – Т. 2. – Львів, 2006. – С. 142-144.
 27. Петрук О. Рух радіативної ударної хвилі під дією газу з ненульовою масою / Петрук О. // *Сучасні проблеми механіки та математики* / *Наук. збірник в 3 тт.* – Львів, 2008. – Т. 3. – С. 144-146.

Тези конференцій

28. Petruk O. X-rays from supernova remnants in 3-D: models and effects / Petruk O. // International Conference “New Century in X-ray Astronomy” (Yokohama, Japan, 6-8 March 2001). Abstracts. – P. 39.
29. Березінський В. Математичні підходи в моделюванні поширення космічних променів надвисоких енергій / Березінський В., Шардоне П., Грігор’єва С., Петрук О. // Конференція “Нові підходи до розв’язку диференціальних рівнянь” (Дрогобич, 1–5 жовтня 2001). Тези. – С. 13.
30. Петрук О. Синхротронне рентгенівське випромінювання несферичних залишків наднових зір / Петрук О. // Конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвячена пам’яті Б. Бабія (Львів, 1–5 квітня 2002). Тези. – С. 67.
31. Березінський В. Поширення космічних променів надвисоких енергій у локальному надскоупченні галактик / Березінський В., Шардоне П., Грігор’єва С., Петрук О. // Конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвячена пам’яті Б. Бабія (Львів, 1–5 квітня 2002). Тези. – С. 14.
32. Petruk O. Electron injection on the shocks of Supernova Remnants / Petruk O., Bandiera R. // 35-th COSPAR Scientific Assembly (Paris, France 18–25 July 2004). Abstracts. – P. 1090.
33. Berezinsky V. Spectra of UHECRs from Astrophysical Sources: Overdensity in Distribution of Luminous Matter and Extragalactic Magnetic Fields / Berezinsky V., Grigorieva S., Petruk O. // Міжнародна конференція “Астрофізика та космологія після Гамова” (Одеса, 8–14 серпня 2004). Тези. – С.105.
34. Petruk O. Electron Injection and Acceleration on the Shocks of Supernova Remnants / Petruk O., Bandiera R. // Міжнародна конференція “Астрофізика та космологія після Гамова” (Одеса, 8–14 серпня 2004). Тези. – С. 112.
35. Петрук О. Аналітичні розв’язки задач інжекції та прискорення космічних променів нерелятивістськими ударними хвилями / Петрук О. // Конференція ім.В.Я.Скоробогатька (Дрогобич, 27 вересня – 1 жовтня 2004). Тези. – С. 172.
36. Telezhinsky I. Galactic supernova remnant survey with INTEGRAL / Telezhinsky I., Hnatyk B., Petruk O. // VI Міжнародна Конференція “Релятивістська астрофізика, гравітація, космологія” (Київ, 24–26 травня 2006). Тези. – С. 20.
37. Elyiv A. Extragalactic magnetic field and distribution of UHECR sources on the basis of IRAS PSCz catalogue / Elyiv A., Petruk O., Hnatyk B.

- // VI Міжнародна Конференція “Релятивістська астрофізика, гравітація, космологія” (Київ, 24–26 травня 2006). Тези. – С. 20.
38. Elyiv A. Spectrum of turbulence of the extragalactic magnetic field and IRAS PSCz catalogue / Elyiv A., Petruk O., Hnatyk B. // IAU XXVI-th General Assembly. Joint Discussion 1: Cosmic Particle Acceleration (Prague, Czech Republic, 16–17 August, 2006). Abstract Book. – P. 254.
 39. Beshley V. Geometry of electron injection and synchrotron maps of supernova remnants / Beshley V., Petruk O. // Четверта наукова конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (Львів, 19–21 жовтня 2006). Тези. – С. 65.
 40. Petruk O. Dependence of the electron injection efficiency on the shock velocity in supernova remnants: limitations from observations / Petruk O. // Четверта наукова конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (Львів, 19–21 жовтня 2006). Тези. – С. 83.
 41. Orlando S. Supernova remnants in nonuniform medium and nonuniform magnetic field: synchrotron morphology and prospects for microphysics / Orlando S., Vocchino F., Petruk O. // VII Міжнародна Конференція “Релятивістська астрофізика, гравітація, космологія” (Київ, 23–25 травня 2007). Тези. – С. 12.
 42. Orlando S. On the origin of asymmetries in bilateral supernova remnants / Orlando S., Vocchino F., Reale F., Peres G., Petruk O. // A Workshop On the Future of Supernova Remnant Research “Endpoints and Interactions” (Honolulu, Hawaii, May 24–25, 2007). Programme and Abstracts. – P. 14.
 43. Петрук О. Моделювання залишків наднових зір в середовищі з неоднорідними магнітним полем та густиною. Спостережувані обмеження на кінетику заряджених часток / Петрук О., Орландо С., Боккіно Ф. // Міжнародна математична конференція ім.В.Я.Скоробогатька (Дрогобич, 24–28 вересня 2007). Тези. – С. 223.
 44. Petruk O. Approximation of the gamma-ray emissivity due to inverse-Compton process and gamma-ray images of supernova remnants / Petruk O., Beshley V. // 8-th Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, 21–23 May, 2008). Book of Abstracts. – P. 24.
 45. Petruk O. X-ray emission of the shock of SN 1006. Constraints on electron kinetics / Petruk O., Telezhinsky I., Iakubovskiy D., Kirsch M., Dubner G., Castelletti G., Vocchino F., Miceli M. // International Conference “The X-ray Universe” (Granada, Spain, 27–30 May 2008). Abstract Book. – P. 69.
 46. Vocchino F. The outer shock of SN 1006 / Vocchino F., Telezhinsky I., Iakubovskiy D., Kirsch M., Dubner G., Castelletti G., Petruk O., Mi-

- celi M. // 37th COSPAR Scientific Assembly (Montreal, Canada, 13–20 July 2008). Abstract CD [Електронний ресурс]. – id. E13-0008-08 (1 p.).
47. Bandiera R. On the origin of some empirical relations in supernova remnant samples / Bandiera R., Petruk O. // 37th COSPAR Scientific Assembly (Montreal, Canada, 13–20 July 2008). Abstract CD [Електронний ресурс]. – id. E13-0026-08 (1 p.).
 48. Петрук О. Властивості розподілу поверхневої яскравості залишків наднових в радіо, рентгенівському і гама діапазонах / Петрук О., Бешлей В. // П'ята наукова конференція пам'яті Б.Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (Львів, 6–8 жовтня 2008). Тези. – С. 67-68.
 49. Beshley V. Nonthermal images of supernova remnants / Beshley V., Petruk O. // 9-th Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, May 27–29, 2009). Book of Abstracts. – P. 20.
 50. Petruk O. Leptonic origin of the gamma-ray image of SN 1006 / Petruk O., Bocchino F., Miceli M., Dubner G., Castelletti G., Orlando S., Iakubovskiy D., Telezhinsky I. // 9-th Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, May 27–29, 2009). Book of Abstracts. – P. 24.
 51. Beshley V. Very-high energy gamma-ray images of supernova remnants due to inverse-Compton scattering / Beshley V., Petruk O. // 4-th International Conference “Astrophysics and Cosmology after Gamow: recent progress and new horizons” (Odessa, 17–23 August, 2009). Program and Abstracts. – P. 25.
 52. Orlando S. Effects of non-uniform interstellar magnetic field on synchrotron and inverse compton emission of SNRs / Orlando S., Petruk O., Bocchino F., Miceli M. // Conference “Chandra’s First Decade of Discovery” (Boston, USA, 22–25 September, 2009). Abstracts. – id. 173 (1 p.).
 53. Beshley V. Nonthermal images of supernova remnants / Beshley V., Petruk O., Orlando S., Bocchino F. // 10-th Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, May 25-27, 2010). Book of Abstracts. – P. 104–105.
 54. Beshley V. A classical picture of SN 1006 / Beshley V., Petruk O. // 10-th Annual International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, 25–27 May, 2010). Book of Abstracts. – P. 104.
 55. Orlando S. On the origin of non-thermal emission of SN1006 / Orlando S., Bocchino F., Petruk O., Miceli M. // 38th COSPAR Scientific Assembly

(Bremen, Germany, 18–25 July 2010). Abstract CD [Електронний ресурс]. – id. E19-0059-10 (1 p.).

56. Bandiera R. Exploring the statistics of shell-type supernova remnants and getting insights on their physics / Bandiera R., Petruk O. // 38th COSPAR Scientific Assembly (Bremen, Germany, 18–25 July 2010). Abstract CD [Електронний ресурс]. – id. E19-0070-10 (1 p.).

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

57. Hillas A. M. Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? / Hillas A. M. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2005. – V. 31. – P. R95–R131
58. Drury L.O’C. Test of galactic cosmic-ray source models – Working Group Report / Drury L. O’C., Ellison D. E., Aharonian F. A. et al. // Space Sci. Rev. – 2001. – V. 99. – P. 329–352.
59. Status and Perspective of Astroparticle Physics in Europe / Astroparticle Physics European Coordination, Peer Review Committee [Електронний ресурс]. – 2008. – 145 p. – www.aspera-eu.com/images/stories/files/Roadmap.pdf
60. Koyama K. Evidence for Shock Acceleration of High-Energy Electrons in the Supernova Remnant SN 1006 / Koyama K., Petre R., Gotthelf E. V. et al. // Nature. – 1995. – V. 378. – P. 255–258.
61. Reynolds S. P. Maximum Energies of Shock-accelerated Electrons in Young Shell Supernova Remnants / Reynolds S. P., Keohane J. W. // Aph. J. – 1999. – V. 525. – P. 368–374.
62. Hendrick S. Maximum Energies of Shock-accelerated Electrons in Large Magellanic Cloud Supernova Remnants / Hendrick S., Reynolds S. // Aph. J. – 2001. – V. 559. – P. 903–908.
63. Green D. A. A Catalogue of Galactic Supernova Remnants / Green D. A. [Електронний ресурс]. – Cambridge: Mullard Radio Astronomy Observatory, 2009. – <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>.
64. Torres D. F. Supernova remnants and γ -ray sources / Torres D. F., Romero G. E., Dame T. M. et al. // Phys. Rep. – 2003. – V. 382. – P. 303–380.
65. Funk S. VHE Gamma-ray supernova remnants / Funk S. // Adv. Space Res. – 2008. – V. 41. – P. 464–472.
66. Abdo A. A. Fermi/Large area telescope bright gamma-ray source list / Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al. // Aph. J. Suppl. – 2009. – V. 183. – P. 46–66.

67. Drury L. O'C. Current status of shock acceleration theory / Drury L. O'C. // *J. Korean Astr. Society.* – 2004. – V. 37. – P. 393–398.
68. Bykov A. M. Shocks and particle acceleration in SNRs: theoretical aspects / Bykov A. M. // *Adv. Space Res.* – 2004. – V. 33, No 4. – P. 366–375.
69. Lembege B. Selected problems in collisionless-shock physics / Lembege B., Giacalone J., Scholer M. et al. // *Space Sci. Rev.* – 2004. – V. 110. – P. 161–226.
70. Berezhko E. G. Gamma-ray astronomy and cosmic ray origin problem / Berezhko E. G. // *Adv. Space Res.* – 2005. – V. 35. – P. 1031–1040.
71. Reynolds S. Supernova Remnants at High Energy / Reynolds S. P. // *Ann. Rev. Astr. Aph.* – 2008. – V. 46. – P. 89–126.
72. Bocchino F. High Resolution X-ray Observations of Supernova Remnants / Bocchino F. // *Chin. J. Astr. Aph. Suppl.* – 2003. – V. 3. – P. 329–340.
73. Weisskopf M. C. Six Years of Chandra Observations of Supernova Remnants / Weisskopf M. C., Hughes J. P. // *Astrophysics Update 2* / Ed. J. W. Mason. – Heidelberg: Springer Verlag. – 2006. – P. 55–75 [препринт astro-ph/0511327].
74. Aharonian F. High energy astrophysics with ground-based gamma ray detectors / Aharonian F., Buckley J., Kifune T., Sinnis G. // *Rep. Prog. Phys.* – 2008. – V. 71. – id. 096901 (56 p.).
75. Hinton J. A. Teraelectronvolt Astronomy / Hinton J. A., Hofmann W. // *Ann. Rev. Astr. Aph.* – 2009. – V. 47. – P. 523–565.
76. Schure K. M. An MHD study of SN 1006 and determination of the ambient magnetic field direction / Schure K. M., Achterberg A., Keppens R., Vink J. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2010. – V. 406. – P. 2633–435
77. Badenes C. On the size distribution of supernova remnants in the Magellanic Clouds / Badenes C., Maoz D., Draine B. // *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* – 2010. – V. 407. – P. 1301–1313
78. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Седов Л. И. – Москва: Наука. – 1977. – 438 с.
79. Hnatyk B. Evolution of supernova remnants in the interstellar medium with a large-scale density gradient. I. General properties of the morphological evolution and X-ray emission / Hnatyk B., Petruk O. // *Astr. & Aph.* – 1999. – V. 344. – P. 295–309.
80. Blondin J. Transition to the radiative phase in supernova remnants / Blondin J., Wright E., Borkowski K., Reynolds S. // *Aph. J.* – 1998. – V. 500. – P. 342–354.
81. Cioffi D. F. Dynamics of radiative supernova remnants / Cioffi D. F., McKee C. F. Bertschinger E. // *Aph. J.* – 1988. – V. 334. – P. 252–265.

82. Acero F. First detection of VHE γ -rays from SN 1006 by HESS / Acero F., Aharonian F., Akhperjanian A. G. et al. // *Astr. & Aph.* – 2010. – V. 516. – id. A62 (7 p.).
83. Berezhko E. G. The theory of synchrotron emission from supernova remnants / Berezhko E. G., Völk H. J. // *Astr. & Aph.* – 2004. – V. 427. – P. 525–536.
84. Berkhuijsen E. M. Properties of supernova remnants at known distances I. Surface brightness and radio spectral index / Berkhuijsen E. M. // *Astr. & Aph.* – 1986. – V. 166. – P. 257–270.
85. McKee C. F. A theory of the interstellar medium – Three components regulated by supernova explosions in an inhomogeneous substrate / McKee C. F., Ostriker J. P. // *Aph. J.* – 1977. – V. 218. – P. 148–169.

АНОТАЦІЯ

Петрук О. Л. Прискорення космічних променів в оболонкових залишках наднових зір. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2010.

Дисертація присвячена розробці методів моделювання еволюції сильних нерелятивістських ударних хвиль в неоднорідних середовищах і полях, методів опису кінетики заряджених релятивістських часток в їх околі, розрахункам нетеплового випромінювання космічних променів в оболонкових залишках наднових зір (ЗН) і аналізу відповідних експериментальних даних. В роботі розв'язано ряд задач динаміки космічних променів і ударних хвиль в неоднорідних середовищах і магнітних полях.

Показано, що в типовому сценарії еволюції ЗН між адіабатичною та радіаційною стадіями слід виділяти додаткову пост-адіабатичну фазу, тривалість якої є співмірною з тривалістю адіабатичної. Розроблено наближені аналітичні методи опису динаміки ударної хвилі і течії за нею протягом пост-адіабатичної та радіаційної стадій. Розроблено нову модель інжекції електронів в процес прискорення Фермі I роду на паралельній ударній хвилі; вона дозволяє отримати розподіл інжекттованих часток за імпульсами та показує, що ефективність інжекції залежить від рівня теплової рівноваги між електронами і протонами.

Започатковано новий напрям синтезу та аналізу карт розподілу поверхневої яскравості ЗН внаслідок випромінювання прискорених часток в радіо-, рентгенівському та гама-діапазонах та використання карт до

накладання обмежень на властивості магнітного поля і космічних променів в цих об'єктах.

Проведено моделювання нетеплового радіо-, рентгенівського і гамма-випромінювання адіабатичних ЗН в однорідних та неоднорідних середовищах і полях. Виявлено основні фактори, які визначають азимутальні та радіальні зміни поверхневої яскравості ЗН у цих діапазонах. Зокрема, азимутальний профіль яскравості формується внаслідок змін ефективності інжекції і максимальної енергії електронів, а також компресії/посилення магнітного поля ударною хвилею. Неоднорідності міжзоряного середовища і/або магнітного поля зумовлюють певні типи асиметрій в розподілі яскравості ЗН. Так, залишки з двома арками різної яскравості пояснюються наявністю компоненти градієнта густини середовища або, більш імовірно, густини зовнішнього магнітного поля, перпендикулярної до арок. Збіжність арок зумовлена наявністю компоненти градієнта, паралельної до них. Ступінь асиметрії залежить від деталей динаміки космічних променів та є різною в радіо-, рентгенівському і гамма-діапазонах; найчутливішим до ролі градієнта магнітного поля є рентгенівський діапазон, відтак ступінь асиметрії зображень ЗН є в ньому найвищою.

Проведено аналіз радіо- та рентгенівських спостережень ЗН 1006 року, внаслідок якого одержано радіокарту залишка, його теплове і нетеплове зображення в рентгенівському діапазоні, а також азимутальний розподіл його спектральних характеристик.

Розроблено новий модельно-незалежний метод прогнозування карт ЗН в гамма-діапазоні за його радіокартою і результатами простороворозділеної рентгенівської спектроскопії. Метод застосовано до ЗН 1006 року; передбачена карта яскравості в гамма-променях співпадає з даними спостережень, що є новим аргументом на користь лептонної природи гамма-випромінювання цього ЗН.

Розроблено новий метод визначення тривимірної орієнтації міжзоряного магнітного поля в околі ЗН за його радіокартою та запропоновано нову методологію використання зображень цих об'єктів для визначення властивостей космічних променів та магнітного поля. Аналіз проведено на прикладі залишка надвової 1006 року. Показано, що кут між міжзоряним магнітним полем та напрямком на спостерігача складає 70° . Визначено, що максимальна енергія електронів обмежена часом прискорення, при цьому відношення середньої довжини вільного пробігу частки до її ларморового радіуса складає 1.5. Максимальна енергія електронів в області паралельної ударної хвилі рівна 7 TeV; там, де ударна хвиля є перпендикулярною, вона є вищою в 3.3 рази. Радіальний профіль

яскравості в рентгенівському діапазоні узгоджується з напруженістю магнітного поля в прифронтовій області $50 \mu\text{Гс}$. Середня напруженість поля в SN 1006 складає $32 \mu\text{Гс}$, що узгоджується з іншими оцінками.

Запропоновано новий підхід до статистичного аналізу вибірок залишків наднових; він базується на використанні, окрім традиційних діаметра D і радіосвітності Σ ЗН, також концентрації міжзоряного середовища, оціненої за використання даних з рентгенівського діапазону. Показано, що $(\Sigma - D)$ -залежність не може бути еволюційним треком “типового” ЗН, а є наслідком еволюції багатьох ЗН в суттєво різних умовах; що моделі, в яких вважається, що частки енергії, які переходять від ударної хвилі до космічних променів і магнітного поля є постійними, не узгоджуються з даними спостережень; що кумулятивний розподіл ЗН за розміром не має відношення до закону руху ударної хвилі, а зумовлений лише густинами середовищ, в яких еволюціонують ЗН.

Ключові слова: космічні промені, залишки наднових зір, нетеплове випромінювання, магніто-гідродинамічне моделювання, наближені аналітичні та чисельні методи.

АННОТАЦІЯ

Петрук О. Л. Ускорение космических лучей в оболочечных остатках сверхновых звезд. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2010.

Диссертация посвящена разработке методов моделирования эволюции сильных нерелятивистских ударных волн в неоднородных средах и полях, кинетики заряженных релятивистских частиц около них, расчетам нетеплового излучения космических лучей в оболочечных остатках сверхновых звезд и анализу соответствующих экспериментальных данных. В работе решен ряд задач динамики космических лучей и ударных волн, основано новое направление синтеза и анализа карт распределения поверхностной яркости остатков сверхновых звезд и их использования для наложения ограничений на свойства магнитного поля и космических лучей в этих объектах. Проведено моделирование нетеплового радио-, рентгеновского и гамма-излучения адиабатических остатков сверхновых в однородных и неоднородных средах и полях, разработан: новый метод прогнозирования карт остатка в гамма-диапазоне по его радио-карте и результатам пространственно-распределенной рентгеновской спектроскопии; новый метод определения трехмерной ориентации

межзвездного магнитного поля вблизи остатка сверхновой; новая методология использования карт остатков для определения свойств космических лучей и магнитного поля в этих объектах. Сравнение теоретических моделей с наблюдениями проведено на примере остатка сверхновой 1006 года и путем статистического анализа выборок остатков в нашей и соседних галактиках.

Ключевые слова: космические лучи, остатки сверхновых звезд, не-тепловое излучение, магнито-гидродинамическое моделирование, приближенные аналитические и численные методы.

ABSTRACT

Petruk O. Acceleration of cosmic rays in shell-like supernova remnants. – Manuscript.

Doctor degree thesis. Speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2010.

Methods for modeling the evolution of the strong nonrelativistic shocks in nonuniform media and fields as well as of kinetics of charged relativistic particles in its vicinity are developed; they are applied to calculations of the non-thermal emission of cosmic rays in the shell-like supernova remnants and for analysis of relevant experimental data. A number of tasks in dynamics of cosmic rays and strong shocks are solved; a new direction of studies is initiated, namely, synthesis and analysis of surface brightness maps of supernova remnants, their use to put constraints on properties of cosmic rays and magnetic field in these objects. Nonthermal radio, X-ray and gamma-ray emission of adiabatic supernova remnants in the uniform and nonuniform ambient media and fields is modeled. A new method to predict gamma-ray image of a remnant from its radio map and results of the spatially resolved X-ray spectroscopy is developed; a new method to determine the three-dimensional orientation of the interstellar magnetic field around supernova remnant is proposed; a new methodology for analysis of surface brightness maps of remnants is suggested and used for determination of properties of cosmic rays and magnetic field in these objects. Theoretical models are compared with observations on examples of the supernova remnant of 1006 A.D. and samples of remnants in our and neighbouring galaxies.

Key words: cosmic rays, supernova remnants, non-thermal emission, magneto-hydrodynamic modeling, approximate analytical and numerical methods.