

Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0826U000144

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 20-01-2026

Статус: Захищена

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:



II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Патрій Мар'яна Василівна

2. Mariana V. Patrii

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-3226-3118

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 104

Назва наукової спеціальності: Фізика та астрономія

Галузь / галузі знань: природничі науки

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Фізика та астрономія

Дата захисту: 13-02-2026

Спеціальність за освітою: Фізика та астрономія

Місце роботи здобувача: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 11541

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 41.17, 41.23, 41.25

Тема дисертації:

1. Динаміка високотемпературної плазми в залишках наднових зір: спостережувані аспекти.
2. High-temperature plasma dynamics in supernova remnants: observable aspects.

Реферат:

1. Дисертаційне дослідження спрямоване на аналіз даних рентгенівських спостережень залишків наднових (ЗН) та вивчення динаміки високотемпературної плазми цих об'єктів на основі їхніх спостережуваних характеристик. В рамках роботи проведено детальний просторово розділений спектральний аналіз рентгенівського випромінювання для кількох молодих ЗН за даними спостережень космічної рентгенівської обсерваторії Chandra високої роздільної здатності. Обробку та спектральне моделювання даних виконано з використанням програмних пакетів CIAO, Sherpa та SAOImage-DS9, забезпечивши комплексний аналіз спостережень. Вперше досліджено характеристики випромінювання і структуру різних компонент плазми в цих об'єктах. Такий підхід дає змогу прослідкувати просторові зміни властивостей зоряного викиду та виявляти локальні особливості фізичних умов, що можуть відігравати важливу роль у загальній динаміці залишку, а також реконструювати внутрішню структуру зорі-попередника і умови вибуху наднової. Проведено аналіз даних спостережень ЗН Тихо Браге (SN 1572) та Йоганна Кеплера (SN 1604), які належать до класу молодих ЗН типу Ia і є ключовими об'єктами для дослідження механізмів вибуху і властивостей

зоряного викиду. Для ЗН Тихо створено мапи для діапазонів енергій фотонів, які відповідають випромінюванню в двох найяскравіших рентгенівських лініях: кремнію (Si) та сірки (S). Отримано і проаналізовано спектральні компоненти теплового та синхротронного випромінювання з малих регіонів по всій поверхні об'єкта. За доплерівськими зсувами побудовано 2D розподіли швидкостей уздовж променя зору для плазми, збагаченої Si та S, які демонструють значну анізотропію зоряного викиду. Наші результати вперше вказують на відмінності в динаміці різних компонент плазми та підтверджують неізотропний характер вибуху наднової та можливе відхилення від ідеалізованої шаруватої структури зорі-попередника. Для ЗН Кеплера основна увага приділена доплерівським картам швидкостей рентгенівських ліній випромінювання Si, S та Fe. Вперше показано, що ЗН Кеплера демонструє виразну асиметрію в розширенні різних складових підплазми - у компонентах зоряного викиду, багатих на Fe, присутнє переважно синє зміщення, а багаті на Si демонструють складнішу кінематику. Це може свідчити про перемішування елементів в зорі та асферичність її вибуху та про особливості взаємодії ударної хвилі та зоряного викиду з міжзоряним середовищем. На основі рентгенівських та радіо спостережень вперше побудовано карту максимальних енергій електронів у залишку Тихо. На основі поєднання рентгенівських і радіоспостережень показано, що вони досягають 8pTeV , а середнє значення становить $2.6\text{p}\pm 0.9\text{pTeV}$. Ці оцінки важливі для моделювання прискорення частинок і порівняння з теоретичними прогнозами максимальних енергій електронів в молодих ЗН. Досліджено еволюцію рентгенівського та гамма-випромінювання від молодих оболонкових ЗН - SN1987A, Cas A, Тихо та SN1006. Вперше продемонстровано, що потоки випромінювання від ЗН Тихо та Cas A на двадцятирічному масштабі часу залишаються стабільними. Натомість в дуже молодому залишку SN1987A помітне суттєве зростання рентгенівської яскравості. Отримані результати дозволяють виділити характерні відмінності чи подібності у різних типах випромінювання та між різними об'єктами й оцінити еволюційні особливості залишків різних типів. У роботі показано значущість молодих ЗН у контексті дослідження природи анізотропності вибухів наднових і взаємодії викинутої зоряної речовини й УХ із міжзоряним середовищем. Комплексний просторово-розділений спектральний аналіз різних об'єктів дозволив виявити як спільні риси еволюції залишків, так і відмінності, пов'язані зі структурою зорі-попередника, зі специфікою вибуху та структурою навколишнього середовища. Результати роботи вказують на відхилення внутрішньої структури зорі-попередника від класичної шаруватої моделі внаслідок перемішування шарів до вибуху або на несиметричність самого вибуху наднової. Отримано нову інформацію про високоенергетичні процеси, що супроводжують еволюцію ЗН. Показано значення просторово-розділеної рентгенівської спектроскопії для вивчення фізики вибухів наднових, природи зір-попередників та механізмів виникнення асиметрій у їх залишках.

2. The thesis is focused on the analysis of X-ray observations of supernova remnants (SNRs) and the study of the dynamics of their high-temperature plasma based on observable characteristics. A detailed spatially resolved spectral analysis of X-ray emission was performed for several young SNRs using high-resolution observations from the Chandra X-ray Observatory. Data processing and spectral modeling were performed using the CIAO, Sherpa, and SAOImage-DS9 software packages, providing a comprehensive analysis of the observations. The emission properties and plasma structure of different components in these remnants were systematically investigated for the first time. This approach allows tracing spatial variations in the properties of stellar ejecta and identifying local physical conditions that play an important role in the overall remnant dynamics, as well as reconstructing the internal structure of the progenitor star and the conditions of the supernova explosion. The observational data analysis was performed for Tycho's SNR (SN 1572) and Kepler's SNR (SN 1604), which belong to the class of young Type Ia SNRs and serve as key objects for studying explosion mechanisms and the properties of stellar ejecta. For Tycho's SNR, maps were constructed in photon energy ranges corresponding to the two brightest X-ray emission lines of silicon (Si) and sulfur (S). Thermal and synchrotron emission components were extracted and analyzed from small regions across the entire remnant. Based on Doppler shifts, two-dimensional velocity distributions along the line of sight were obtained for Si- and S-rich plasma, revealing significant anisotropy in the ejecta. Our results for the first time indicate differences in the dynamics of various plasma components and confirm the non-isotropic nature of the supernova explosion, as well as a possible deviation from the idealized layered structure of

the progenitor star. For Kepler's SNR, the main focus is placed on Doppler velocity maps of the X-ray emission lines of Si, S, and Fe. It is shown for the first time that Kepler's SNR exhibits a pronounced asymmetry in the expansion of different plasma components: the Fe-rich ejecta are predominantly blueshifted, while the Si-rich components display more complex kinematics. This may indicate mixing of elements within the progenitor star, the asphericity of the explosion, and specific features of the interaction between the shock, stellar ejecta, and the interstellar medium. Based on X-ray and radio observations, a map of the maximum energies of electrons in Tycho's SNR was constructed for the first time. By combining X-ray and radio data, it was shown that electrons in this remnant reach energies up to 8 TeV, with an average value of 2.6 ± 0.9 TeV. These estimates are important for modeling particle acceleration and for comparison with theoretical predictions of the maximum electron energies in young SNRs. The evolution of X-ray and gamma-ray emission from young shell-type SNRs - SN 1987A, Cassiopeia A, Tycho, and SN 1006 - was investigated. For the first time, it was demonstrated that the emission fluxes from Tycho's SNR and Cassiopeia A remain stable on a twenty-year timescale. In contrast, a significant increase in X-ray brightness is observed in the very young remnant SN 1987A. The obtained results make it possible to identify characteristic similarities and differences in various types of emission among different objects and to assess the evolutionary properties of remnants of different types.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Не застосовується

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- 1. Patrii M., Petruk O. Spatially resolved X-ray spectra of the remnant of Kepler supernova. *Journal of Physical Studies*, 19 May, (2025) 29(2), 2901. (Scopus, Q3). <https://doi.org/10.30970/jps.29.2901>
- 2. Petruk O., Patrii M., Kuzyo T., Baldyniuk A., Marchenko V., Beshley V. Three-dimensional velocity fields in the silicon-and sulfur-rich ejecta in the remnant of Tycho supernova. *Journal of Physical Studies*, 6 Mar., (2025) 29(1), 1901. (Scopus, Q3). <https://doi.org/10.30970/jps.29.1901>
- 3. Petruk O., Kuzyo T., Patrii M., Chomiuk L., Arias M., Miceli M., Orlando S., Bocchino F. Evidence of Gradients of Density and Magnetic Field in the Remnant of Tycho's Supernova. *The Astrophysical Journal*, 26 Aug., (2024) 972(1), 63. (Scopus, Q1). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad62ff>
- 4. Petruk O., Beshley V., Marchenko V., Patrii M. GeV light curves of young supernova remnants. *Journal of Physical Studies*, 18 Sep., (2020) 24(3), 3903. (Scopus, Q4). <https://doi.org/10.30970/jps.24.3903>
- 5. M. Patrii, O. Petruk. Spatially resolved X-ray spectral analysis of Si-, S-, and Fe-rich ejecta components in the Kepler supernova remnant // Book of Abstracts. International Conference in part of the Science Day in Ukraine dedicated to the 180th anniversary of the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, and to the 120th anniversary of the birth of Professor Serhiy Vsekhsvjatsky, p. 41, 27-30 May, 2025. - Kyiv, Ukraine.
- 6. O. Petruk, T. Kuzyo, M. Patrii. Deciphering the properties of turbulence in the ejecta of young supernova remnants // Workshop "Exploring Supernova Remnants Physics in the Lab", 3-7 March, 2025. - Leiden, Lorentz Center, the Netherlands.
- 7. M. Patrii, O. Petruk. X-ray spectral analysis of Si-, S- and Fe-rich ejecta components in the remnant of Kepler supernova // Різдвяні дискусії 2024. Програма і тези доповідей. ст. 14. 26-28 грудня, 2024. - Львів.
- 8. T. Kuzyo, O. Petruk, M. Patrii. The analysis of ejecta structure in Tycho's and Kepler's SNRs // Різдвяні дискусії 2024. Програма і тези доповідей. ст. 7. 26-28 грудня, 2024. - Львів.

- 9. M. Patrii, O. Petruk. Spatially resolved X-ray spectra of the remnant of Kepler supernova // Abstracts Book. Current Problems in Astronomy and Astrophysics. p. 97. 23-26 september, 2024. - Lviv.
- 10. O. Petruk, T. Kuzyo, M. Patrii, M. Miceli, S. Orlando, F. Bocchino. Density and magnetic field gradients in Tycho SNR // Supernova remnants III: An odyssey in space after stellar death. p. 19. 9-15 June. 2024. - Chania, Greece.
- 11. М. Патрій. Властивості еволюції рентгенівських зображень залишка SN1987A // Програма звітної наукової конференції університету за 2022 рік. ст. 117. 6-7 лютого, 2023. - Львів.
- 12. M. Patrii. Dopplerography of the Tycho supernovae remnant // Abstracts of Participants. RAC International Summer School 2022. X-rays and Neutrons for a Sustainable Future. Advanced Materials, Climate Crisis, Human Health. p. 38. 14-21 Aug. 2022. - Varberg, Sweden.
- 13. M. Patrii, O. Petruk. Dopplerography of the Tycho supernova remnant // Program and abstracts. Workshop on current problems in physics. p. 14-15. 25-27 october, 2021. - Lviv.
- 14. M. Patrii, O. Petruk. Doppler maps of the Tycho Brahe supernova remnant // Program and abstracts. Astronomy at Lviv University. p. 112-113. 14 -17 september, 2021. - Lviv.
- 15. O. Petruk, V. Marchenko, T. Kuzyo, M. Patrii, Toward a reconstruction of 3-D morphology of Tycho SNR // Astronomy and Space Physics in the Kyiv University, International conference. Book of Abstracts. p. 27. 27 - 29 may, 2020. - Kyiv.
- 16. В. Бешлей, О. Петрук, В. Марченко, М. Патрій, Криві блиску в гамма- діапазоні молодих залишків наднових // Різдваїні дискусії 2020. Тези доповідей. Журнал фізичних досліджень, 2020, т.24, N.1, id.1998-6. <https://physics.lnu.edu.ua/jps/2020/1/pdf/1998-12.pdf>. 9-10 січня 2020. - Львів.
- 17. М. Патрій. Чисельне моделювання спектрів залишку наднової Тихо // Конференція молодих учених 'Підстригачівські читання - 2019', 27 -29 травня 2019 р. - Львів.
- 18. M. Patrii, O. Petruk. Analysis of the structure of Tycho SNR as from observations of Chandra Observatory // Abstracts. International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics 'HEUREKA-2019'. 14-16 may, 2019. - Lviv.
- 19. M. Patrii, O. Petruk, T. Kuzyo. Evolution of the structure of Tycho SNR as from observations in the X-ray range // Abstracts. 26th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. 22-27 april, 2019. - Kyiv.
- 20. M. Patrii, D. Koval, V. M. Firman. Protection of personnel in the conditions of work at the laser ranging station of the Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv // Collection of scientific materials of the XXV International scientific-practical Internet conference el-conf.com.ua. Scientific results of 2018. Part 6. 17 december, 2018. - Vinnitsa.
- 21. M. Patrii, O. Petruk. Role of the magnetic field in the interaction of a strong shock with accretion disk // Abstracts. International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics 'HEUREKA-2018'. 15-17 may, 2018. - Lviv.
- 22. M. Patrii, O. Petruk, T. Kuzyo. MHD simulations of the interaction of the strong shock with accretion disk // Abstracts. 25th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. 23-28 april, 2018. - Kyiv.
- 23. М. Патрій, О. Петрук. Математичне моделювання еволюції інжекції електронів у залишку наднової SN1987A // Конференція молодих учених 'Підстригачівські читання - 2017', 23-25 травня 2017 р. - Львів.
- 24. M. Patrii, O. Petruk. Evolution of electron injection efficiency in SN1987A // Abstracts. International Conference of Students and Young Scientists on Theoretical and Experimental Physics 'HEUREKA-2017'. 16-18 may, 2017. - Lviv.
- 25. M. Patrii, O. Petruk. Evolution of electron injection efficiency in SN1987A. // Abstracts. 24th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. 24-29 april, 2017. - Kyiv.

Наукова (науково-технічна) продукція: методи, теорії, гіпотези

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: № 0121U100058, № 0123U101836

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Петрук Олег Леонідович
2. Oleh L. Petruk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, член-кор. НАН України, 01.03.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-3487-0349

Додаткова інформація: Web of Science Researcher ID: J-6607-2017; Scopus Author ID: 15136809700;
<https://scholar.google.com/citations?user=AECRvfUAAAAJ&hl=uk&oi=ao>

Повне найменування юридичної особи: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 03534430

Місцезнаходження: вул. Наукова, Львів, 79060, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Василенко Анатолій Андрійович
2. Anatolii A. Vasylenko

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.03.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-2644-7241

Додаткова інформація: Web of Science Researcher ID: EDT-4895-2022; Scopus Author ID: 57218919909;
<https://scholar.google.com.ua/citations?user=o7PXNFkAAAAJ&hl=uk>

Повне найменування юридичної особи: Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05417360

Місцезнаходження: вул. Академіка Заболотного, Київ, 03143, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Задорожна Лідія Володимирівна

2. Lidiia V. Zadorozhna

Кваліфікація: к. ф.-м. н., 01.04.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-3337-9753

Додаткова інформація: Web of Science Researcher ID: AAS-8444-2020; Scopus Author ID: 35097958900;
<https://scholar.google.com/citations?user=LlxjuuAAAAAJ&hl=uk>

Повне найменування юридичної особи: Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Код за ЄДРПОУ: 02070944

Місцезнаходження: вул. Володимирська, Київ, 01033, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Новосядлий Богдан Степанович

2. Bohdan S. Novosyadlyi

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, член-кор. НАН України, 01.03.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-1621-0873

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 14058507400; Web of Science Researcher ID: L-5225-2017;
<https://scholar.google.com/citations?user=z5RF9gIAAAAAJ&hl=uk>

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Кулініч Юрій Анатолійович

2. Yurii A. Kulinich

Кваліфікація: к. ф.-м. н., с.д., 01.03.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0001-9958-0946

Додаткова інформація: Web of Science Researcher ID: L-5872-2017; Scopus Author ID: 55436722500;
<https://scholar.google.com/citations?user=fG9fd3gAAAAJ&hl=uk>

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
голови ради**

Мелех Богдан Ярославович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові
головуючого на засіданні**

Мелех Богдан Ярославович

**Відповідальний за підготовку
облікових документів**

Жак Ольга Володимирівна

Реєстратор

Юрченко Тетяна Анатоліївна

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є
відповідальним за реєстрацію наукової
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна