



БЕШЛЕЙ

Василь Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу диференціальних рівнянь і теорії функцій Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

АНАЛІТИЧНО-ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ЗАЛИШКАХ НАДНОВИХ ЗІР

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 11 березня 2020 року

Випроміювання, зумовлене прискореними частинками на фронтах ударних хвиль у залишках наднових зір, є джерелом інформації про кінетику частинок, що прискорюються, а також про структуру цих об'єктів. Аналіз спектрів випроміювання – одне з джерел дослідження прискорення частинок. Розвиток спостережної астрономії дав змогу побудувати карти поверхневої яскравості у залишках наднових зір з хорошим розділенням та в широкому діапазоні електромагнітних хвиль: від радіохвиль до високоенергетичних гамма-променів. Наявність цих даних потребує створення моделей карт поверхневої яскравості у залишках наднових зір.

Ключові слова: ударні хвилі, залишки наднових зір, прискорення елементарних частинок, випроміювання прискорених частинок, гамма-промені, карти поверхневої яскравості.

Залишки наднових зір є одним з класів астрофізичних об'єктів, які інтенсивно досліджують упродовж останніх десятиліть. Вони утворюються на кінцевій стадії еволюції зір. Унаслідок вибуху наднових у міжзоряне середовище вивільняється величезна кількість енергії, порівнянна з енергією свічення всіх зір у галактиці або навіть більша за неї.

Наднові зорі, що спалахують, є одними з основних об'єктів для визначення відстані в космології і слугують так званими «стандартними свічками», а їх вибух є джерелом хімічних елементів, важчих за залізо. Внаслідок вивільнення величезної кількості енергії утворюється потужна ударна хвиля, яка рухається в міжзоряному середовищі, підхоплює та іонізує міжзоряний матеріал і стає джерелом прискорених заряджених частинок з енергією, що співмірна або й вища за енергію, отриману у Великому адронному колайдері.

Дослідження ударних хвиль, які генеруються внаслідок локального виділення значної кількості енергії, почали інтенсивно розвиватися у світі в 40–50-х роках минулого століття. Ін-

терес до цієї тематики був зумовлений випробуваннями нового типу озброєння — ядерної, а пізніше і термоядерної зброї. У цей період вивченням руху ударних хвиль, які утворюються під час ядерних вибухів, у різних середовищах займалися в Радянському Союзі та Сполучених Штатах Америки. Математичні методи моделювання руху ударних хвиль, що ґрунтуються на числових розрахунках [1], розробив британський фізик і математик Джеффри Тейлор (Geoffrey Ingram Taylor), який у складі британської делегації брав участь в Мангеттенському проєкті в Лос-Аламосі. Паралельно над цією проблемою в Радянському Союзі працював академік АН СРСР Леонід Іванович Седов, який отримав відомий аналітичний розв'язок задачі про сильний точковий вибух [2].

Дослідження ударних хвиль у зорях в Україні започаткував професор Іван Антонович Климишин, який працював у Львові у 80-х роках минулого століття [3]. Згодом роботи з цього напрямку продовжили професор Богдан Іванович Гнатик та його учень Олег Леонідович Петрук.

Ударні хвилі, утворені в залишках наднових зір, прискорюють елементарні частинки, такі як електрони та протони, за механізмом Фермі [4]. Сутність цього механізму полягає в тому, що заряджені частинки, перетинаючи ударну хвилю, внаслідок різниці швидкостей розсіюючих центрів збільшують свою енергію. Енергія, яку отримує частинка під час одного перетину ударної хвилі, є незначною, але за тривалий час відбувається велика кількість перетинів, і заряджені частинки можуть прискоритися до великих енергій. Спектр розподілу таких частинок отримують розв'язанням кінетичного рівняння параболічного типу [5]. У наближенні тестової частинки, коли частинки не змінюють структури ударної хвилі, їхній спектр має степеневий характер.

Особливістю дослідження таких заряджених частинок є те, що вони, рухаючись від джерела до спостерігача, зазнають впливу галактичного магнітного поля і доволі сильно змінюють орієнтацію свого руху, що унеможливає визначення того, в якому саме об'єкті вони

прискорилися. Проте такі заряджені частинки є джерелами електромагнітного випромінювання, яке ми можемо спостерігати в усьому електромагнітному спектрі випромінювання від радіо- до високоенергетичного гамма-випромінювання. Це випромінювання дозволяє вивчати фізичні процеси в системах, у яких відбувається прискорення.

Є кілька процесів, що зумовлюють випромінювання елементарних заряджених частинок на сильних нерелятивістських ударних хвилях. У радіо- та рентгенівському діапазоні прискорені до високих енергій електрони випромінюють за синхротронним механізмом (випромінювання заряджених електронів, що рухаються по гвинтовій лінії в магнітному полі). Ті самі електрони випромінюють завдяки оберненому комптон-ефекту (ефект розсіяння низькоенергетичних фотонів на високоенергетичних електронах), і довжина хвилі, згенерована таким процесом, потрапляє в гамма-діапазон електромагнітного випромінювання. Конкурентним механізмом випромінювання в гамма-діапазоні до оберненого комптон-ефекту є розпад піонів, що утворюються внаслідок взаємодії високоенергетичного протона з тепловим протоном міжзоряного середовища.

Унаслідок внеску в гамма-випромінювання як електронів, так і протонів ця частина електромагнітного спектру стає інформативною для дослідження частинок на фронтах ударних хвиль.

Протягом останніх 10–15 років гамма-астрономія інтенсивно розвивалася. За цей період було побудовано і введено в експлуатацію кілька великих наземних і космічних гамма-телескопів, зокрема космічну обсерваторію імені Фермі (Fermi Gamma-ray Space Telescope — FGST); наземні черенковські телескопи MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope), H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System), Veritas (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) та ін.

Новим амбітним проєктом, потенціал майбутніх відкриттів якого можна порівняти з Великим адронним колайдером, є проєкт СТА (Cherenkov Telescope Array) — масив нового

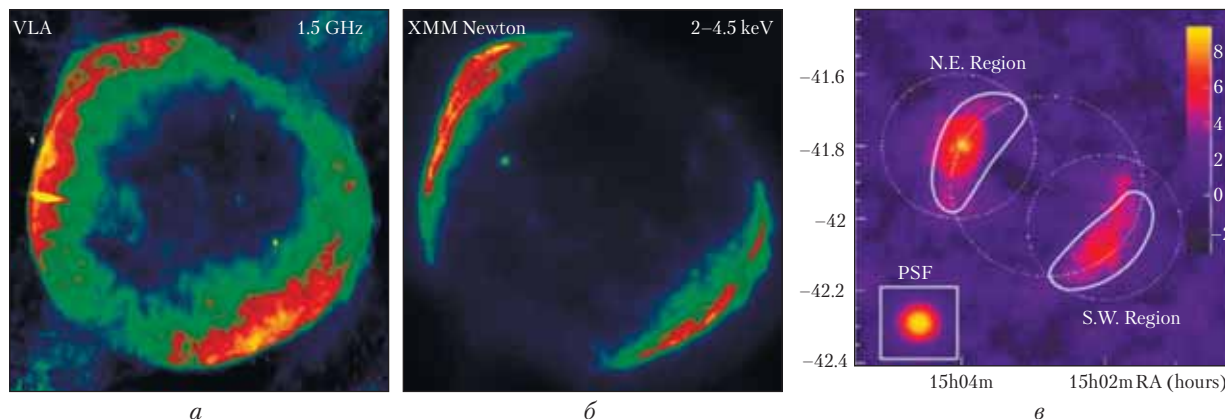


Рис. 1. Карти поверхневої яскравості залишку наднової SN 1006 в радіо- (а), рентгенівському (б) [7] і гамма- (в) [8] діапазонах

покоління черенковських телескопів для дослідження космічного простору в діапазоні гамма-випромінювання, розміщених в обох півкулях, щоб покрити все небо. Перші результати спостережень на ньому планується отримати в 2022 р.

До складу консорціуму входить близько 200 наукових установ з 31 країни світу. Україна приєдналася до проєкту СТА в 2015 р. Нашу країну представляють три установи: Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка та Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Крім спектрів випромінювання, важливим джерелом інформації про прискорення частинок на фронтах ударних хвиль завдяки великій спостережній базі є карти поверхневої яскравості залишків наднових зір. Першу просторово розділену карту в гамма-діапазоні було отримано в 2004 р. [6]. На сьогодні такі карти складаються, як і спектри, на основі даних у всьому електромагнітному діапазоні.

На рис. 1 наведено карти поверхневої яскравості залишку наднової SN 1006 в трьох різних діапазонах: радіо-, рентгенівському та гамма-діапазоні. Як видно з рисунка, розташування лімбів у всіх діапазонах випромінювання є подібним одне до одного. Така подібність у роз-

ташуванні яскравих областей може свідчити про те, що в цьому залишку наднової основний внесок у випромінювання дають електрони. Аналіз карт поверхневої яскравості є додатковим джерелом, яке можна використовувати для дослідження не лише прискорених частинок, а й морфології магнітного поля та розподілу густини навколо залишків наднових зір.

Для побудови карт поверхневої яскравості в радіо-, рентгенівському і гамма-діапазонах ми розробили математичну модель. Побудова такої моделі потребує розв'язання кількох задач. Найперше потрібно розрахувати просторовий розподіл магнітогідродинамічних параметрів плазми (тиск, густина, швидкість, магнітне поле). Потім на основі отриманих розподілів магнітогідродинамічних параметрів слід описати спектр частинок та його еволюцію вниз за течією і обчислити спектри випромінювання, яке вони можуть генерувати. Після проведення таких розрахунків у кожній точці 3D-об'єкта для порівняння зі спостережуваними результатами робимо проєкцію об'єкта на двовимірну небесну площину.

Для розрахунку просторових розподілів магнітогідродинамічних параметрів у загальному випадку необхідно розв'язати систему рівнянь магнітогідродинаміки, що включає в себе радіаційні втрати плазми ([9], формула 1). Розв'язати це рівняння можна лише за допомогою чисельних методів.

Проте для певних наближень, наприклад для точкового вибуху без радіаційних втрат, що описує адіабатичне розширення в залишках наднових зір, це рівняння має аналітичний розв'язок. Для такого підходу ми побудували карти поверхневої яскравості, а також отримали наближені аналітичні формули для розрахунку профілів поверхневої яскравості для випромінювання як електронів, так і протонів [10, 11].

Крім того, запропонований нами підхід використали наші італійські колеги для побудови карт поверхневої яскравості з урахуванням неоднорідного магнітного поля та неоднорідної густини [12]. Для залишку надкової SN 1006 із застосуванням карт поверхневої яскравості було визначено орієнтацію магнітного поля та його градієнта у відповідній області Галактики [13].

Нами проведено тривимірне числове моделювання рівнянь магнітогідродинаміки з урахуванням радіаційних втрат плазми. Розрахунки здійснювали за допомогою числового коду для розв'язання рівнянь магнітогідродинаміки PLUTO [14].

Еволюцію магнітного поля при тривимірному моделюванні залишків наднових зір на ранній стадії еволюції наведено на рис. 2, на якому добре видно особливості розподілу магнітного поля в об'ємі залишків наднових зір. Подібна картина спостерігається і для розподілу густини (рис. 3).

Слід зазначити, що описані розрахунки є ресурсозатратними. Розрахунок 3D-структури розподілу магнітогідродинамічних параметрів з розділенням $1024 \times 1024 \times 1024$ точок потребує майже 200 тис. процесоро-годин та генерує об'єм даних приблизно 20 Тбайтів. Отже, такі розрахунки можна проводити лише на суперкомп'ютерах, оскільки на звичайному персональному комп'ютері розрахунок подібної задачі тривав би понад 10 років.

Надалі отримані дані планується використати для побудови карт поверхневої яскравості залишків наднових зір.

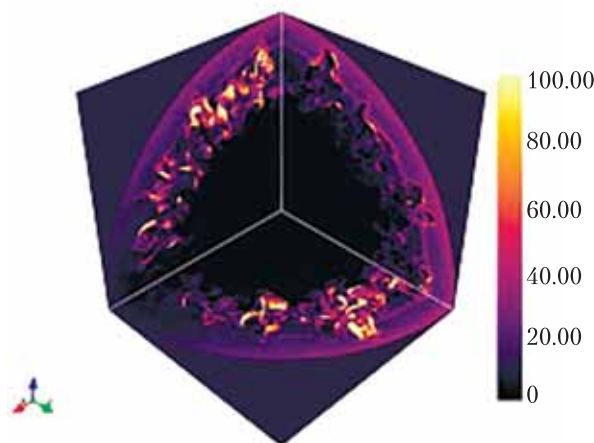


Рис. 2. Тривимірний переріз розподілу напруженості магнітного поля, отриманий при розв'язанні рівнянь магнітогідродинаміки для часу 800 років від вибуху надкової з урахуванням радіаційних втрат на випромінювання

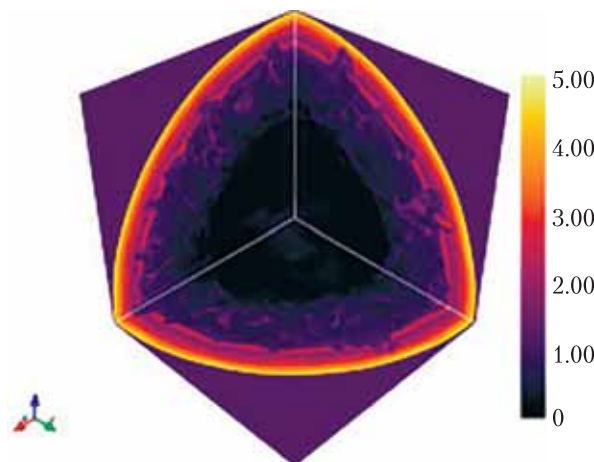


Рис. 3. Тривимірний переріз розподілу густини, отриманий при розв'язанні рівнянь магнітогідродинаміки для часу 800 років від вибуху з урахуванням радіаційних втрат на випромінювання

Автор висловлює щире подяку науковому керівнику, провідному науковому співробітнику Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України доктору фізико-математичних наук Олегу Петруку, а також провідному математику Тарасу Кузьо за допомогу в побудові рис. 2 і рис. 3.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Taylor G. The formation of a blast wave by a very intense explosion I. Theoretical discussion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1950. **201**(1065): 159–174. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0049>
2. Sedov L.I. Propagation of strong shock waves. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1946. **10**: 241–250. [Седов Л. Движение воздуха при сильном взрыве. *ДАН СССР*. 1946. **52**(1): 17.]
3. Клымушын І.А. *Shock waves in star shells*. Moscow: Fizmatgiz, 1984. (in Russian). [Климишин І.А. *Ударные волны в оболочках звезд*. Москва: Физматгиз, 1984.]
4. Jones F.C., Ellison D.C. The plasma physics of shock acceleration. *Space Science Reviews*. 1991. **58**: 259–346. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01206003>
5. Petruk O. Particle acceleration at shocks. Stationary solutions of the kinetic equation. *Journal of Physical Studies*. 2014. **18**(1): 1901(1–18) (in Ukrainian). [Петрук О. Прискорення частинок на ударних хвилях. Стационарні розв'язки кінетичного рівняння. *Журнал фізичних досліджень*. 2014. Т. 18, № 1. С. 1901(1–18).]
6. Aharonian F.A., Akhperjanian A., Aye K. et al. High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant. *Nature*. 2004. **432** (7013): 75–77. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02960>
7. Rothenflug R., Ballet J., Dubner G., Giacani E., Decourchelle A., Ferrando P. Geometry of the non-thermal emission in SN 1006. Azimuthal variations of cosmic-ray acceleration. *Astronomy & Astrophysics*. 2004. **425**(1): 121R. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20047104>
8. Acero F., Aharonian F., Akhperjanian A.G. et al. First detection of VHE γ -rays from SN 1006 by HESS. *Astronomy & Astrophysics*. 2010. **516**: A62. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913916>
9. Petruk O., Kuzyo T., Beshley V. Post-adiabatic supernova remnants in an interstellar magnetic field: parallel and perpendicular shocks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. **456**(3): 2343–2353. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2746>
10. Petruk O., Beshley V., Bocchino F., Orlando S. Some properties of synchrotron radio and inverse-Compton gamma-ray images of supernova remnants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2009. **395**(3): 1467–1475. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14563.x>
11. Beshley V., Petruk O., Hadronic γ -ray images of Sedov supernova remnants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012. **419**(2): 1421–1430. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19799.x>
12. Orlando S., Bocchino F., Reale F., Peres G., Petruk O. On the origin of asymmetries in bilateral supernova remnants. *Astronomy & Astrophysics*. 2007. **470**(3): 927–939. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066045>
13. Bocchino F., Orlando S., Miceli M., Petruk O. Constraints on the local interstellar magnetic field from non-thermal emission of SN1006. *Astronomy & Astrophysics*. 2011. **531**: A129. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016341>
14. Mignone A., Bodo G., Massaglia S., Matsakos T., Tesileanu O., Zanni C., Ferrari A. PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2007. **170**(1): 228. DOI: <https://doi.org/10.1086/513316>

Vasyl V. Beshley

Pidstryhach Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics, NAS Ukraine (Lviv)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2688-0224>

ANALYTICAL-NUMERICAL METHODS OF INVESTIGATION OF PROCESSES IN THE SUPERNOVA REMNANTS

According to the scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, March 11, 2020

Emission caused by particles accelerated on the shock wave in supernova remnants (SNRs) is a source of information about the kinetics of accelerated particles and morphology of objects. Analysis of spectral radiation is one of sources for investigation of particle acceleration. Development of observational astronomy allowed the production of surface brightness distribution maps of SNRs with good resolution in all electromagnetic domains from radio to gamma-rays. The availability of such data requires the construction of models for simulations of the surface brightness distribution maps of SNRs.

Keywords: shock wave, supernova remnants, acceleration of elementary particles, emission of acceleration particles, gamma-rays, maps of the surface brightness distribution.