ГАММА–ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАЛИШКІВ НАДНОВИХ ЗІР

Олег ПЕТРУК

Інститут прикладних проблем механіки та математики
імені Я.С. Підстригача НАН України,
вул. Наукова 3-б, Львів 79060
Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Методія 8, Львів 79005

Редакція отримала статтю 10 травня 2010 р.

Дано короткий огляд історії гамма-астрономії. Наведено дані про спостереження залишків наднових зір у γ-променях, зазначено праці українських учених, присвячені цій проблемі. Із 274 відомих галактичних залишків наднових (ЗН) гамма-випромінювання зафіксовано від 14. Для сучасних засобів спостережень ЗН помітні лише в фотонах з енергіями > 0.1 ГеВ; для них опубліковано карти розподілу поверхневої яскравості. Описано метод побудови прогнозованих зображень ЗН у гамма-діапазоні за його радіо– та рентгенівськими картами. Метод застосовано до ЗН SN 1006.

1. З ІСТОРІЇ ГАММА-АСТРОНОМІЇ

Астрономія – галузь знань, яка має, напевне, найдовшу історію. Проте її специфіка полягає у неможливості поставити прямий експеримент. Відтак усі астрономічні знання сформовані лише завдяки спостереженням. Тому нові можливості спостережень дають значний поштовх цій науці. Для розширення меж пізнання важливим є як розвиток інструментальної бази, так і освоєння нових методів, що дають змогу бачити раніше небачене.

Людство застосовує прилади для спостереження неба з 1609 р. Узявши за основу зорову трубку, на той час відому в Європі, Галілео Галілей створив перші телескопи та здійснив низку важливих відриттів. Проте космічне випромінювання в діапазонах, відмінних від оптичного, відкрили лише на початку XIX ст. коли 1800 р. В. Гершель уперше зареєстрував інфрачервоне випромінювання від Сонця. Дж.Максвелл в 1860-их рр. вказав на те, що небесні об'єкти мають випромінювати у всіх діапазонах електромагнітного спектра. Спостереження у всіх його ділянках стали можливими у XX ст. Так радіовипромінювання космічного походження вперше було детектоване у 30-х рр. минулого століття, ультрафіолетове – в 1946 р. Рентгенівські

PACS numbers: 98.38.Mz; 95.85.Pw

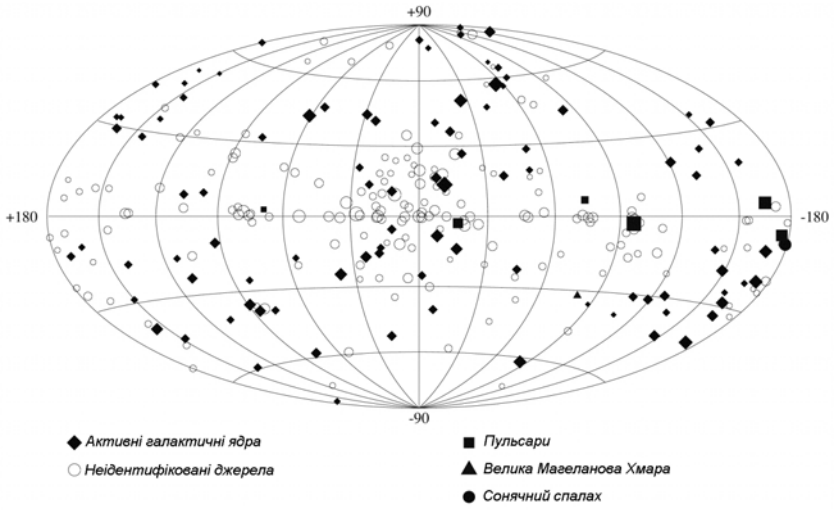

Рис. 1. Джерела з енергією фотонів понад 100 МеВ з третього каталогу EGRET, показані в галактичних координатах (розмір символів залежить від інтенсивності) [12].

та гамма-кванти позаземного походження відкрили відповідно у 1949 і 1961 рр.

Свого часу розуміння того, що діапазон енергій фотонів не обмежується лише видимим оптичним діапазоном, захоплювало вчених. Сьогодні, коли спостереження проводяться практично в усьому електромагнітному спектрі, для розвитку астрономії важливочітко сформувати розуміння того, що фотон – не єдине джерело інформації про Всесвіт. Передбачення і відкриття космічних променів, зусилля для детектування космічних нейтрино, пошуки гравітаційних хвиль, темної матерії та енергії – це ті нові "вікна", які в найближчому майбутньому допоможуть астрономам досліджувати світобудову.

Історія гамма-астрономії (дивись таблицю) налічує півстоліття, найбільш інтенсивно розвиваючись в останні кілька років [1, 2, 3, 4, 5]. У 1958 опубліковано першу статтю на цю тему, де зібрано низку передбачень і вперше вказано на два конкретні астрономічні об'єкти (Крабоподібну туманність і Лебедь А), від яких слід очікувати гамма-випромінювання [6]. Розумінню того, що в космосі повинні генеруватися гамма-фотони, сприяли теоретичні дослідження попередніх десятиліть. Зокрема в 1948-1952 рр. з'явилися статті, які вказували на те, що рух космічних променів у міжзоряному середовищі має супроводжуватися гамма-випромінюванням [7, 8, 9].

У астрономії межа між рентгенівським і гамма-діапазонами міститься в області ~ 30 кеВ ($\lambda_c \sim 4 \times 10^{-9}$cm). Космічне випромінювання з меншими енергіями здебільшого має теплову природу, з вищими – переважно нетеплову. Окрім цього, дзеркала, які викори-

Таблиця 1. Основні віхи в історії гамма-астрономії

1900	Відкриття γ-променів (Поль Віллард)
1948	Стаття Фінберга і Прімакова [7] з передбаченням генерації гамма-фотонів у міжзоряному просторі електронною компонентою космічних променів унаслідок зворотного ефекту Комптона
1952	Стаття Хаякави [8] з передбаченням космічного гамма-фону внаслідок розпадів піонів після взаємодії космічних променів з атомарним воднем МЗС
1952	Стаття Хатчінсона [9] з передбаченням космічного гамма-фону внаслідок нетеплового гальмівного випромінювання релятивістських електронів з МЗС
1952	Перша фіксація черенковського випромінювання від атмосферної зливи
1958	Стаття, від якої починає відлік гамма-астрономія [6]
1959	Пропозиція використовувати спостереження атмосферних злив для фіксації γ-фотонів надвисоких енергій [14]
1960	Перший черенковський телескоп (Крим, Чудаков та ін.).
1961	Відкриття космічного гамма-фону (детектор на супутнику Explorer 11)
1967	Гамма-випромінювання від Галактики (супутник OSO-3)
1967	Спостережено перший гамма-спалах
1972	Спостережено гамма-лінії від спалахів на Сонці (супутник OSO-7)
1975-79	Перші 30 дискретних джерел гамма-променів (супутник COS-B)
1989	Крабоподібна туманність – перше джерело ТеВ γ-випромінювання
1991	Запуск гамма-обсерваторії ім. Комптона
1999	Опубліковано найповніший каталог гамма-джерел EGRET [12], рис. 1
2002	Запущено гамма-супутник “Інтеграл” (м’який гамма-діапазон, $10^4 - 10^7$ еВ)
2003	Початок роботи системи черенковських телескопів H.E.S.S. (жорсткий гамма-діапазон, $10^{11} - 10^{14}$ еВ)
2004	Перша карта неба і об’єкта в гамма-діапазоні (H.E.S.S.)
2008	Запущено орбітальний гамма-телескоп ім. Фермі (гамма-кванти $10^7 - 10^{11}$ еВ)

стовуються для фокусування X-променів, непридатні для фотонів з енергіями, вищими за це значення: довжини хвиль $\lambda < \lambda_c$ менші за типові міжатомні відстані в твердих тілах. Тому зараз проводяться дослідження з використанням кристалів певної структури для фокусування γ-променів [10].

Сьогоднішні спостереження практично повністю перекривають γ-діапазон з енергіями квантів від 30 кеВ до 100 ТеВ. Кванти з такими енергіями цілком поглинає земна атмосфера на висоті 30-50 км. Тому перші спостереження стали можливими, коли детектори були винесені стратосферними аеростатами чи ракетами за її межі. Перший детектор, виведений на орбіту 1961 р., зафіксував 22 гамма-фотони, що прийшли з різних напрямів. 1967 р. детектор на супутнику OSO-3 зафіксував 621 квант з енергіями > 100 МеВ з напрямі галактичної площини [11]. Спостереження 1970–1980 рр. дали змогу довести існування ізотропного космічного гамма-фону, підтвердити теоретичне передбачення про те, що Сонце випромінює гамма-кванти, та вказати на кілька точкових джерел гамма-випромінювання, найяскравішим серед яких є Крабоподібна туманність. Відтоді виведено на орбіту декілька гамма-телескопів, які створили важливу експериментальну базу.

Сьогодні відомо близько 300 джерел (рис. 1), серед яких є наднові та їх залишки, пульсари, нейтронні зорі, галактичні ядра, галактики та їх скупчення [12]. Очевидно найбільш вражаючим відкриттям гамма-астрономії є цілком новий клас астрономічних явищ – гамма-спалахи тривалістю в частки секунди. Перший гамма-спалах зафіксував близько сорока років тому американський військовий супутник. Його створили, щоб мати змогу спостерігати в гамма-діапазоні за ядерними випробуваннями, які могли проводити в СРСР. Натомість доведено принципову річ: більшість гамма-спалахів надходили з далекого космосу та не мали жодного стосунку до військових програм. Тому відповідні дані розсекретили.

Донедавна просторове розділення усіх гамма-телескопів, також і "Інтегралу", який працює сьогодні, не було достатнім для створення карт гамма-джерел. Першим космічним гамма-телескопом із роздільною здатністю менше одного градуса став телескоп ім. Е.Фермі. Він був виведений на орбіту в червні 2008 р. За підсумками роботи трьох місяців 2009 р. опублікована карта неба в гамма-променях з енергіями понад 300 МеВ (рис. 2) [13].

За методами детектування високоенергетичних квантів, гамма-діапазон поділяється на три основні інтервали: $\sim 10^4 - 10^7$ еВ (м'яке гамма-випромінювання), $\sim 10^7 - 10^{11}$ еВ та $\sim 10^{11} - 10^{14}$ еВ (гамма-випромінювання надвисоких енергій). Спостереження сьогодні здійснюються у кожному з цих інтервалів (див. таблицю). Гамма-промені з енергіями до 10 ГеВ фіксуються безпосередньо, навколоземними гамма-обсерваторіями. Проте навіть найяскравіші джерела продукують таку малу кількість фотонів з енергіями порядку ТеВ, що супутникові спостереження не мають сенсу, – за обмежених розмірів супутника витримки стають співмірні з часом його життя. Тому виникла ідея використовувати наземні спостереження для фіксації γ-фотонів надвисоких енергій [14]. Для цього застосовують черенковські телескопи. Принцип їх роботи базується на фіксації черенковського випромінювання, яке породжується електронами й позитронами, що

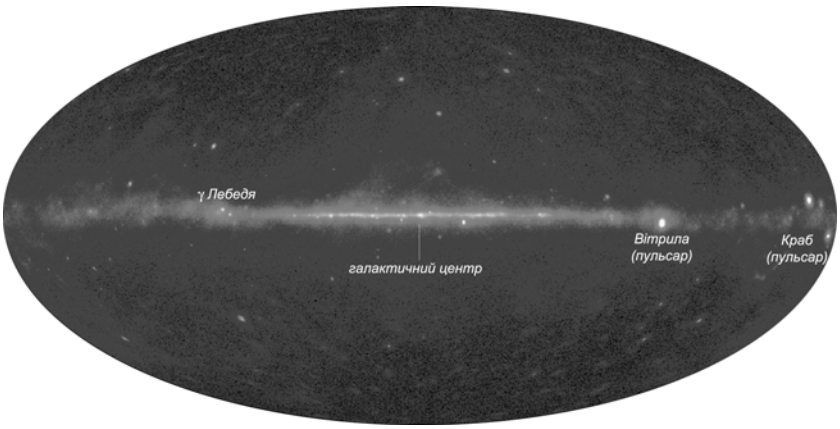

Рис. 2. Карта неба в гамма-променях з енергією > 300 МеВ, побудована за даними спостережень телескопа ім. Е.Фермі; галактичні координати [13].

рухаються в атмосфері зі швидкістю, вищою за швидкість світла в цьому середовищі. Злива цих частинок утворюється внаслідок поглинання земною атмосферою первинного гамма-фотона. Перший черенковський телескоп змонтовано в Криму (рис. 3). Експеримент тривав 4 роки, не давши, однак, значущого результату. Проте експериментатори розв'язали низку важливих інструментальних проблем, заклавши базу для майбутнього розвитку цієї методики. Відтак черенковські телескопи вдосконалювалися, і 1989 р. було повідомлено про перше джерело (Крабоподібну туманність), від якого було спостережено ТеВ-не гамма-випромінювання [15]. 2004 р. опубліковано перші результати спостережень стереоскопічної системи черенковських телескопів H.E.S.S. (рис. 4). Роздільна здатність цієї системи становить кілька кутових мінут. Побудована H.E.S.S. карта залишку наднової (ЗН) RX 1713.7-3946 була першою картою космічного об'єкта в гамма-променях. Це значне досягнення було оприлюднене 2004 р. в журналі "Nature" [16] та започаткувало зображувальну гамма-астрономію. Близьким за характеристиками до H.E.S.S. є черенковський телескоп MAGIC, який спостерігає небо над північною півкулею.

2. ЗАЛИШКИ НАДНОВИХ ЗІР В ГАММА-ДІАПАЗОНІ

Гамма-випромінювання ЗН є ключовою компонентою у вивченні процесів, які відбуваються довкола сильних нерелятивістських ударних хвиль, а саме: динаміки і структури ударної хвилі, поведінки магнітного поля, мікрофізики заряджених частинок включно з їх інжекцією та прискоренням. Спостереження в цьому діапазоні показують, що заряджені частинки справді прискорюються до найвищих енергій, які спостерігаються в галактичних космічних променях.

Рис. 3. Перший черенковський телескоп. Крим, 1960–1965 рр. [2]

Рис. 4. Один із черенковських телескопів стереоскопічної системи H.E.S.S. (світлина М.Дирди, Намібія, травень 2009).

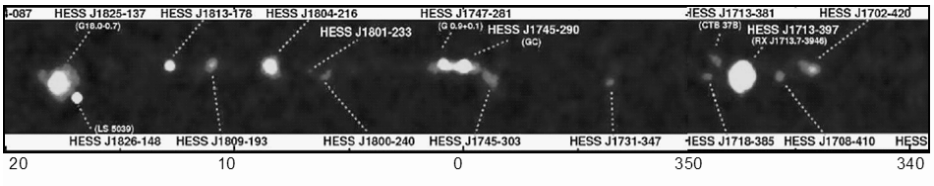

Рис. 5. Ділянка неба в околі галактичного центру, побудована за даними спостережень телескопа H.E.S.S. (гамма-промені з енергією понад 0.3 ТеВ, галактичні координати) [http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/].

З історією спостережень ЗН в гамма-діапазоні можна ознайомитися в [17, 18, 3]. Протягом років було відомо лише про потоки від кількох ЗН. Справжнього поштовху цій галузі астрофізики надала 2004 р. обсерваторія H.E.S.S. ЗН від початку стали пріоритетними об'єктами спостережень у цьому експерименті. Результати спостережень ЗН почали публікувати вже з 2004 р. Огляд неба, здійснений групою H.E.S.S. [19], дав змогу знайти більшість джерел, які випромінюють у гамма-діапазоні надвисоких енергій. На рис. 5 показано фрагмент карти неба, побудованої за даними H.E.S.S. Більшість джерел тут – залишки наднових зір.

Експерименти H.E.S.S., MAGIC і Фермі вперше надали можливість одержувати карти астрофізичних об'єктів у гамма-діапазоні. Проте лише деякі ЗН здатні випромінювати γ-промені. Чутливість теперішніх γ-телескопів дає змогу спостерігати лише частину таких ЗН. Наприклад, систематичний пошук ЗН у архівних даних супутника "Інтеграл" не увінчався успіхом. Із 274 ЗН у нашій Галактиці [20] сьогодні відомо лише 14 ЗН з відомими картами розподілу яскравості в γ-променях з енергіями понад 0.1 ГеВ, а саме: RX J1713.7-3946 [21, 22], Vela Jr. [23, 24], SN 1006 [25] (рис. 6), RCW86 [26], IC443 [27], W28 [28],

CTB 37B [29], G0.9+0.1 [30], MSH 15-52 [31], Kes 75 (H.E.S.S. SoM/October 2008), HESS J1731-347 (H.E.S.S. SoM/March 2009), HESS J1813-178 [32], CTB 37A [33], W51C [34]. Усе це – результати, опубліковані в 2005-2009 рр. Деякі ЗН відкрили в ТеВ діапазоні, а потім підтверджені в радіо- та інших ділянках електромагнітного спектра (HESS J1813-178, HESS J1731-347).

Фізичні процеси в пульсарах можуть зумовлювати γ-випромінювання від ЗН G0.9+0.1, MSH 15-52 і Kes 75, тоді як у інших залишках γ-промені, найімовірніше, породжені частинками, прискореними на ударних хвилях оболонок ЗН.

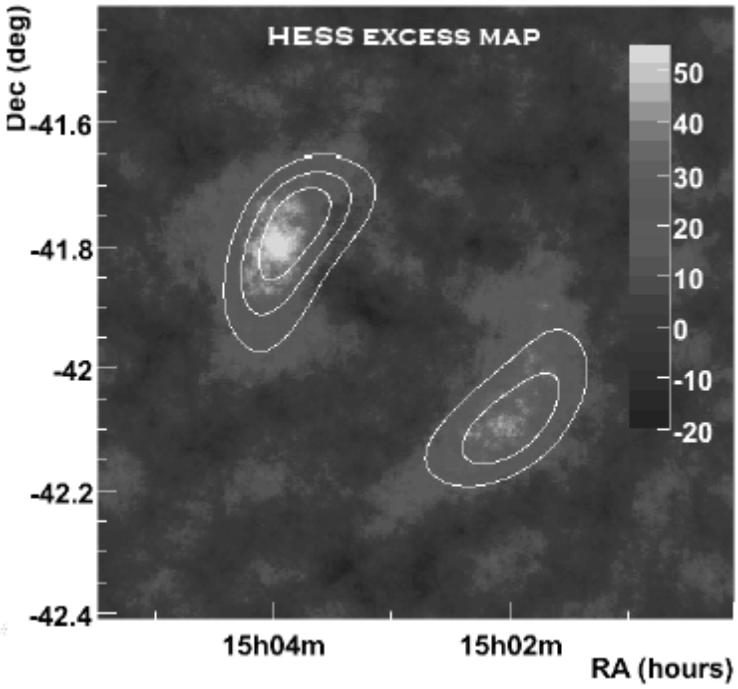

Рис. 6. H.E.S.S. карта ЗН SN 1006 [25]. Дані на лютий 2009 р.

Назагал є декілька фізичних процесів, унаслідок яких в астрофізичних умовах народжуються γ-промені [35, 36, 1]. Плазма, нагріта до температур $> 10^8$ K (наприклад в поблизу чорних дір), здатна випромінювати теплові фотони в м'якому гамма-діапазоні. Проте гамма-промені переважно є наслідком взаємодії елементарних частинок з релятивістськими енергіями. Тому гамма-випромінювання є унікальним джерелом інформації про низку процесів і об'єктів у Всесвіті. Так, релятивістські електрони випромінюють γ-промені під час електромагнітної взаємодії з ядрами, фотонами чи магнітним полем. Відповідні процеси відомі як нетеплове гальмівне випромінювання, зворотний Комптон-ефект та синхротронне випромінювання від-

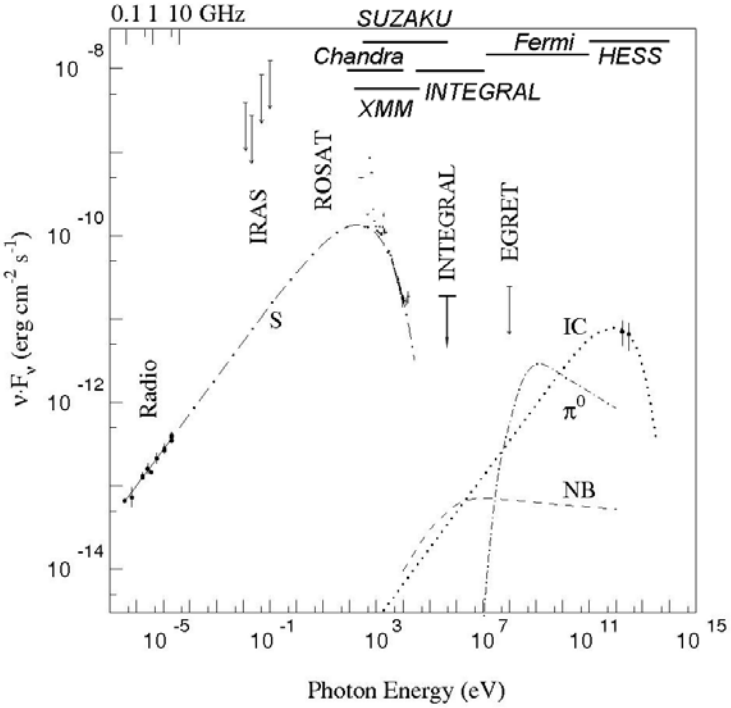

Рис. 7. Типовий спектр ЗН на прикладі SN 1006 [37]: експериментальні дані та розрахунок процесів випромінювання для однієї з моделей ЗН. У верхній частині рисунка показано діапазони, в яких працюють сучасні рентгенівські та гамма-обсерваторії.

повідно. Ядерні взаємодії протонів з енергіями понад ~ 1.2 ГеВ продукують вторинні нестабільні частинки, піони і мезони; γ-фотони виникають унаслідок розпадів деяких з цих частинок, в основному π^o піонів. Спектр випромінювання тоді має характерний максимум в околі 70 МеВ (що відповідає половині маси спокою π^o). Усі ці теплові й нетеплові процеси зумовлюють неперервний γ-спектр. Є також процеси, внаслідок яких виникають γ-кванти дискретних енергій. Це відбувається переважно при переході атомного ядра зі збудженого стану в основний. Анігіляція електронів і позитронів призводить або до неперервного спектра або ж до гамма-лінії на 0.511 МеВ.

Суттєвими для ЗН є лише γ-випромінювання внаслідок зворотного ефекту Комптона (IC) або розпаду піонів (рис. 7). Значно менш інтенсивнішим, проте, ймовірно також важливим за певних обставин, є нетеплове гальмівне випромінювання (NB). Виокремимо ще одну властивість гамма-випромінювання ЗН. Оскільки чутливість сучасних засобів спостережень досягає $\sim 10^{-13}$ ерг см$^{-2}$ с$^{-1}$, то, як бачимо з рис. 7, сьогодні ЗН можуть бути детектовані лише в жорсткій ділянці спектра, > 0.1 ГеВ. Тут проводять спостереження обсерваторії ім.

Фермі й H.E.S.S.

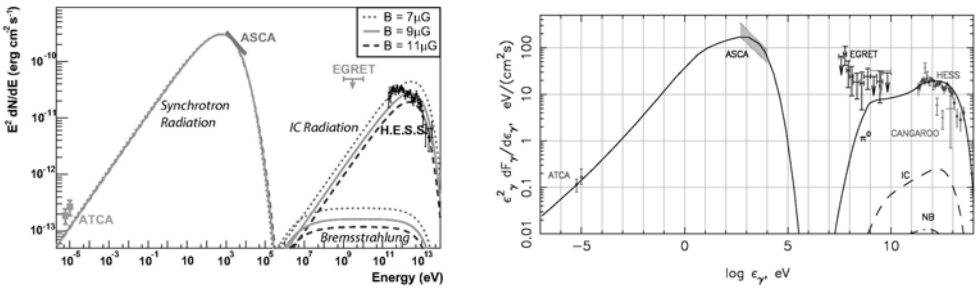

Рис. 8. Всехвильові спектри RX J1713.7-3946 для двох альтернативних моделей ЗН [21, 38].

Аналіз всехвильового спектра (від радіо- до жорсткого γ-випромінювання) ЗН дає змогу обмежити параметри моделі, проте залишає відкритим запитання про природу жорсткого гамма-випромінювання, адже зумовлювати його можуть або електрони, або протони. Наприклад, на рис. 8 показано спектр RX J1713.7-3946 [21, 38]. Як бачимо, гамма-спектр в області енергій > 0.1 ТеВ може бути пояснений як випромінюванням внаслідок зворотнього Комптон-ефекту (ліворуч), так і завдяки піонним розпадам (праворуч), залежно від базових припущень моделі. Така картина характерна для всіх ЗН, від яких зафіксовано випромінювання в діапазоні > 0.1 ТеВ. Виглядає, що ключовими в цьому плані можуть бути спостереження обсерваторії ім. Фермі, оскільки в діапазон, у якому вона проводить спостереження, потрапляє максимум у гамма-спектрі, який повинен бути за протонного механізму породження γ-променів (70 МеВ). У жовтні 2009 р. з'явилося повідомлення про перше детектування обсерваторією Фермі γ-випромінювання від ЗН, а саме від W51C, у діапазоні 100 МеВ – 100 ГеВ [34]. Розрахунки показують, що хоча за наслідками моделювання спектра перевагу найімовірніше має піонний механізм, відкидати можливість домінування зворотнього ефекту Комптона чи нетеплового гальмівного випромінювання в гамма-спектрі W51C все ж не можна.

Оскільки спектральний аналіз не може однозначно надати перевагу якомусь механізму випромінювання, важливо використовувати інші експериментальні дані, зокрема, поверхневий розподіл яскравості. Адронні γ-промені виникають в областях розміщення протонів-мішеней. Досить висока концентрація таких протонів, як, наприклад, у молекулярних хмарах, – необхідна умова для інтенсивного ТеВ-ного гамма-випромінювання від протонних зіткнень. Тому очікується, що поверхневий розподіл яскравості наслідуватиме розподіл структур з підвищеною концентрацією мішеней, а не областей, де відбувається прискорення первинних протонів. Відтак у ЗН, від яких очікуються суттєві потоки адронного гамма-випромінювання, розподіл яскравості назагал не повинен бути подібним до розподілу в радіо- чи рентгенівському діапазоні. Прикладами таких ЗН є IC443, W28, CTB 37A чи CTB 37B.

Натомість карти ЗН у жорсткому гамма-, рентгенівському і радіодіапазонах добре корелюють у випадках ЗН RX J1713.7-3946, Vela Jr., SN 1006 й можливо RCW86. Тому імовірно, що гамма-промені "підсвічують" ті ж структури, які зумовлюють радіо- та рентгенівське випромінювання. В такому сценарії електрони з енергіями в десятки ТеВ можуть бути відповідальними як за синхротронне рентгенівське випромінювання, так і за ТеВ-ні гамма-фотони, народжені внаслідок зворотного ефекту Комптона.

В Україні γ-випромінювання ЗН досліджується групою Б.Гнатика (Київ) та у Львові. Прискорення частинок ударними хвилями ЗН є найперспективнішою гіпотезою для пояснення природи галактичних космічних променів аж до енергій $10^{14}-10^{15}$ еВ. Досі однак немає прямого експериментального підтвердження того, що протони справді прискорюються в ЗН. Праці Б.Гнатика та його учнів присвячені дослідженню умов і моделюванню ЗН, у яких протони повинні були б бути основним джерелом γ-випромінювання ЗН. Зокрема ця група вперше запропонувала модель перехідної, постадіабатичної, фази в еволюції ЗН та показала, що такі ЗН можуть продукувати значні потоки адронних гамма-променів [39, 40, 41]. Модель застосована до ЗН Vela Jr. [42] і W43.

Натомість львівська група досліджує електронне γ-випромінювання з метою використання карт поверхневої яскравості ЗН для аналізу поведінки релятивістських електронів та магнітного поля в околі ударних хвиль ЗН. Гамма-зображення ЗН можна моделювати, починаючи з базових принципів: визначати еволюцію ударної хвилі і магнітогідродинамічну картину об'єкта, поведінку релятивістських частинок (електронів і протонів) на ударній хвилі та в об'ємі ЗН, і, наостанок, врахувавши процеси випромінювання, синтезувати зображення. У такому підході вдається показати залежність властивостей випромінювання від параметрів моделі та вказати на спостережувані тести для теоретичних гіпотез. Такий підхід реалізовано нами в [43].

Можливим також є інший підхід, без магнітогідродинамічного моделювання. Цей метод запропонований нами в [44]. У ньому робиться мінімальна кількість теоретичних припущень, а гамма-зображення ЗН передбачається на основі його радіо та рентгенівських карт. Метод базується на тому, що поверхневий розподіл синхротронного випромінювання містить інформацію про розподіл та властивості релятивістських електронів, які відповідальні також за ТеВ-не γ-випромінювання ЗН. Розглянемо метод на прикладі ЗН SN 1006 р.

3. МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ГАММА-ЗОБРАЖЕННЯ ЗН

Зображення SN 1006, одержане H.E.S.S. (рис. 6), виявляє добру кореляцію з рентгенівською та радіокартою ЗН (рис. 9). Чи справді така кореляція може бути аргументом на користь того, що γ-випромінювання ЗН зумовлене електронами? У цьому розділі запропоновано метод генерації прогнозованого γ-зображення ЗН за його радіо- та рентгенівськими картами за припущення, що ТеВ-ні гамма-промені зумовлені зворотним ефектом Комптона на фотонах мікрохвильового фону.

Радіо- і нетеплове рентгенівське випромінювання містить інфор-

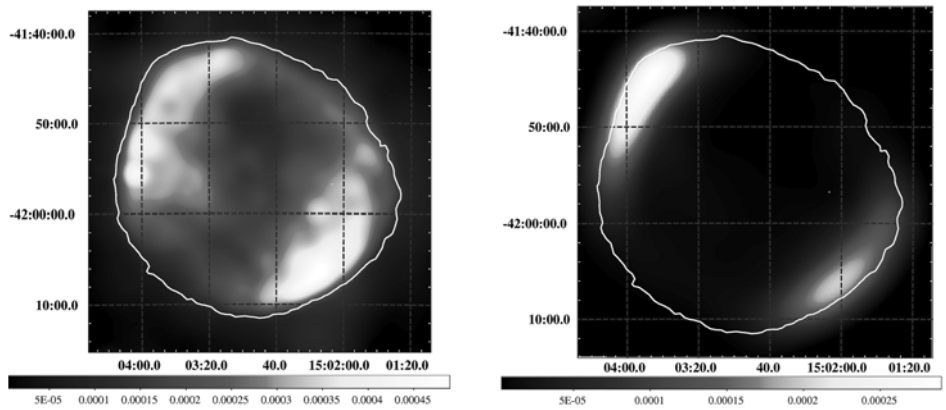

Рис. 9. Радіозображення SN 1006 на $\lambda \sim 20$ см. Кольорова шкала – в одиницях Ян бім$^{-1}$ (ліворуч). Рентгенівське зображення SN 1006 в діапазоні $2 - 4.5$ кеВ. Розмір пікселя $8''$. Шкала кольору в одиницях MOS1 відліки с$^{-1}$ піксель$^{-1}$ (праворуч). Обидва зображення згладжені ґаусіаном з $\sigma = 2'$.

мацію про прискорені електрони, їх розподіл у ЗН, максимальні енергії та ін. У пропонованому методі більшість властивостей, необхідних для генерації гамма-зображення, одержуємо з даних радіо- і рентгенівських спостережень. Винятком є розподіл магнітного поля: за відсутності експериментальної інформації про нього розглядаються два випадки його можливої конфігурації.

Нехай енергетичний спектр електронів має вигляд

$$N(E) = KE^{-s} \exp(-E/E_{\max}), \tag{1}$$

де $N(E)$ – концентрація електронів з енергією E; $E_{\max}$ – максимальна енергія прискорених електронів; K – нормування і $s-$ показник спектру. Випромінювальна здатність унаслідок синхротронного випромінювання чи зворотного Комптон-ефекту

$$q(\varepsilon) = \int dEN(E)p(E, \varepsilon, [B]), \tag{2}$$

де p – спектральний розподіл випромінювання одного електрона; ε – енергія згенерованих фотонів. Від напруженості магнітного поля B залежить лише синхротронне випромінювання.

У радіодіапазоні

$$q_{\text{r}} \propto \nu_{\text{r}}^{-(s-1)/2} KB^{(s+1)/2}. \tag{3}$$

Апроксимація чисельно проінтегрованої випромінювальної здатності (2) зі спектром електронів (1) для γ-фотонів з енергіями $1TeV$ має такий вигляд:

$$q_{\text{ic}} \propto K \exp\left(-\beta_{\text{ic}} E_{\max}^{-0.75}\right), \tag{4}$$

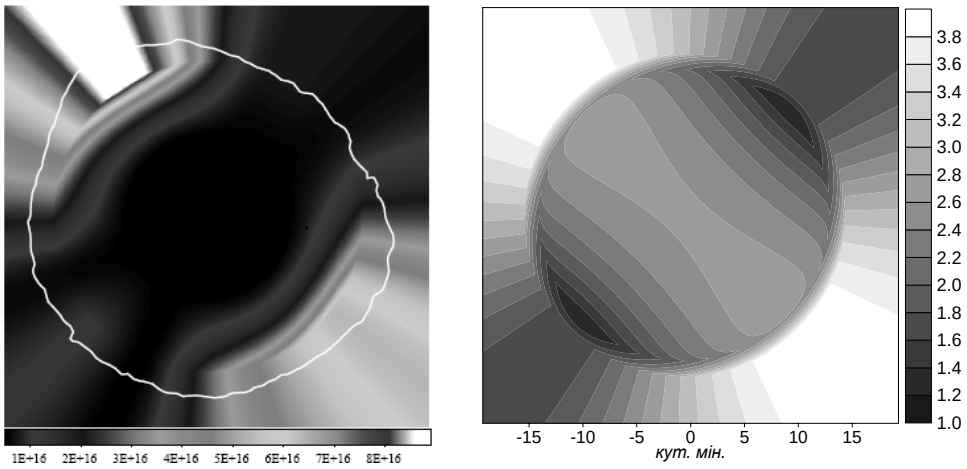

Рис. 10. Карта $\nu_{\rm break}$ (ліворуч, шкала кольору в Гц) і карта ефективного магнітного поля для моделі МП1 (праворуч, шкала в одиницях $B_{\rm o}$). Ця карта повертається довкола центра на $90^{\rm o}$ для іншого сценарію, моделі МП2.

де $\beta_{\rm ic} = 15$ для $2 \le s \le 2.5$ і $\beta_{\rm ic} = 15 + 2(2 - s)$ для $1.8 \le s < 2$. Похибка апроксимації менша за 25 % для $E_{\rm max} \ge q0.3TeV$; апроксимація враховує ефект Кляйна–Нішини.

Відношення між максимальною енергією і частотою $\nu_{\rm break}$ задається виразом

$$E_{\rm max} = c_1^{-1/2} \nu_{\rm break}^{1/2} B^{-1/2}, \tag{5}$$

де c_1 – відома стала. Підставивши в (4) цей вираз і K з (3), отримаємо

$$q_{\rm ic} \propto q_{\rm r} B^{-(s+1)/2} \exp\left[-\beta_{\rm ic}\left(\frac{c_1 B}{\nu_{\rm break}}\right)^{0.75/2}\right]. \tag{6}$$

Цей вираз показує зв'язок між випромінювальними здатностями в радіо- і γ-діапазоні на 1 ТеВ та подає ідею методу. Справді, цей вираз можна використати в кожній малій області ("пікселі") радіозображення для генерації карти ЗН у γ-променях.

Для застосування (6) потрібні: первинне зображення, тобто карта розподілу синхротронної радіо яскравості, розподіл $\nu_{\rm break}$ і розподіл ефективного магнітного поля по поверхні ЗН. Використаємо радіозображення SN 1006 на $\lambda \sim 20$ см (рис. 9), одержане на основі архівних даних радіоінтерферометра VLA та радіотелескопа Паркса [45]. Рентгенівське зображення в діапазоні 2.0–4.5 кеВ одержане в [46] за даними телескопа XMM-Newton і показане на рис. 9. Карта $\nu_{\rm break}$, отримана за даними цього ж телескопа методами просторово-розділеної спектроскопії, показана на рис. 10 [46]. Цей же ж спектральний аналіз

показує, що найприйнятнішою величиною для спектрального індексу є $s = 2$.

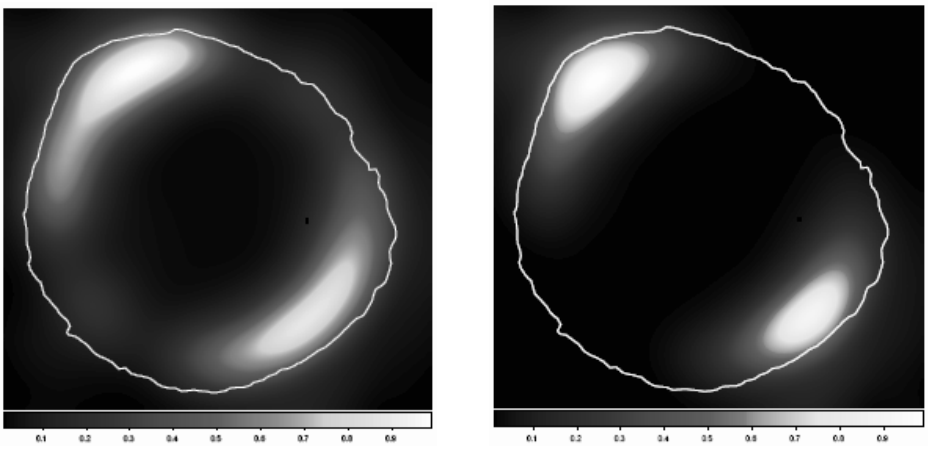

Рис. 11. Прогнозована морфологія ЗН SN 1006 у γ-променях з енергією 1 ТеВ, для моделі МП1 (ліворуч) і для моделі МП2 (праворуч). Зображення згладжено ґаусіаном з $\sigma = 2'$ з метою наблизитися до розділення H.E.S.S.

Розглянемо дві моделі магнітного поля. SN 1006 – досить симетричний, майже сферичної форми об'єкт. Тому в процесі моделювання магнітного поля вважається, що ЗН є сферичним, із радіусом, що дорівнює середньому радіусу SN 1006. Модель враховує еволюцію поля за фронтом ударної хвилі й те, що його компресія на ударній хвилі залежить від кута між міжзоряним полем і нормаллю до поверхні розриву [47]. Після того як знайдено тривимірний розподіл магнітного поля в ЗН, карта ефективного магнітного поля будується усередненням поля вздовж променя зору. Розглядаються дві можливі конфігурації однорідного міжзоряного магнітного поля, а саме: МП1 – паралельно лінії, яка проходить між двома радіомаксимумами (рис. 10) і МП2 – вздовж лінії, яка перетинає максимуми яскравості. Покладемо, що напруженість міжзоряного магнітного поля дорівнює $B_{\rm o} = 10\mu G$, кут між міжзоряним полем і променем зору становить $70^{\rm o}$ [45].

Одержані таким чином γ-зображення SN 1006 показано на рис. 11. Як бачимо, вони дуже подібні до карти, оприлюдненої групою H.E.S.S., (див. рис. 6 [25]). Окрім цього, вони відтворюють структуру, видиму в радіо- і рентгенівському діапазонах: дві яскраві симетричні арки (рис. 9). Важливо, що різниця в моделях магнітного поля не змінює розташування максимумів у гамма-діапазоні. Це підтверджує гіпотезу про те, що кореляцію між гамма-, радіо- і рентгенівськими картами SN 1006 можна розглядати як пряме підтвердження того, що γ-промені від цього ЗН мають електронне походження.

ЛІТЕРАТУРА

[1] *Aharonian F.* Very High Energy Cosmic Gamma Radiation. World Scientific, 2003. 495 p.

[2] *Weekes T.* Very High Energy Gamma-Ray Astronomy. IOP Publishing, 2003. 237 p.

[3] *Aharonian F., Buckley J., Kifune T. and Sinnis G.* High energy astrophysics with ground-based gamma ray detectors. Rep. Prog. Phys. 2008 **71**, art.n. 096901. 1–56.

[4] *Pinkau K.* The early days of gamma-ray astronomy. A&A Suppl. 1996, **120**. 43–47.

[5] *Pinkau K.* History of gamma-ray telescopes and astronomy. Experimental Astronomy. 2009 **25**. 157–171.

[6] *Morrison P.* On Gamma-Ray Astronomy. Il nuovo cimento. 1958 **VII**, n.6. 858–865.

[7] *Feenberg E., Primakoff H.* Interaction of Cosmic-Ray Primaries with Sunlight and Starlight. Phys. Rev. 1948 **73**, n.5. 449–469.

[8] *Hayakawa S.* Propagation of the Cosmic Radiation through Intersteller Space. Prog. Theor. Phys. 1952 **8**, n.5. 571–57.

[9] *Hutchinson G. W.* On the possible relation of galactic radio noise to cosmic rays. Phil. Magazine Ser. 7. 1952 **43**, n.343. 847–852.

[10] *von Ballmoos P.* (Ed.) Focusing Telescopes in Nuclear Astrophysics. Experimental Astronomy. 2005 **20**, nn.1–3.

[11] *Clark G. W., Garmire G. P., Kraushaar W. L.* Observation of High-Energy Cosmic Gamma Rays. Ap.J. 1968 **153**. L203–L207.

[12] *Hartman R. C. et al.* The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources . Ap. J. Suppl. 1999 **123**. 79–202.

[13] *Abdo A. et al.* Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-ray Source List. Ap. J.Suppl. 2009 **183**. 46–66.

[14] *Cocconi G.* An air shower telescope and the detection of 10^{12} eV photon sources. Proceedings of 1959 ICRC. **2**. 309.

[15] *Weekes T. C. et al.* Observation of TeV gamma rays from the Crab nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique. Ap. J. 1989 **342**. 379–395.

[16] *Aharonian F. et al.* High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant. Nature. 2004 **432**. 75–77.

[17] *Catanese M., Weekes T.* Very High Energy Gamma-Ray Astronomy. PASP. 1999 **111**. 1193–1222.

[18] *Funk S.* VHE Gamma-ray supernova remnants. Advances in Space Research. 2008 **41**. 464–472.

[19] *Aharonian et al.* The H.E.S.S. Survey of the Inner Galaxy in Very High Energy Gamma Rays. Ap. J. 2006 **636**. 777–797.

[20] *Green D. A.* 2009. "A Catalogue of Galactic Supernova Remnants (2009 March version)", Astrophysics Group, Cavendish Laboratory, Cambridge, United Kingdom (available at http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/).

[21] *Aharonian F. et al.* A detailed spectral and morphological study of the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946 with HESS. A&A. 2006 **449**. 223–242.

[22] *Aharonian F. et al.* Primary particle acceleration above 100 TeV in the shell-type supernova remnant RX J1713.7-3946 with deep HESS observations. A&A. 2007 **464**. 235–243.

[23] *Aharonian F. et al.* Detection of TeV γ-ray emission from the shell-type supernova remnant RX J0852.0-4622 with HESS. A&A. 2005 **437**. L7–L10.

[24] *Aharonian F. et al.* H.E.S.S. Observations of the Supernova Remnant RX J0852.0-4622: Shell-Type Morphology and Spectrum of a Widely Extended Very High Energy Gamma-Ray Source. Ap. J. 2007 **661**. 236–249.

[25] *Acero F. et al.* First detection of VHE γ-rays from SN 1006 by HESS. A&A. 2010. **516**, № 62. 1-7.

[26] *Aharonian F. et al.* Discovery of Gamma-Ray Emission From the Shell-Type Supernova Remnant RCW 86 With Hess. Ap. J. 2009 **692**. 1500–1505.

[27] *Albert J. et al.* Discovery of Very High Energy Gamma Radiation from IC 443 with the MAGIC Telescope. Ap. J. 2007 **664**. L87–L90.

[28] *Aharonian F. et al.* Discovery of very high energy gamma-ray emission coincident with molecular clouds in the W 28 (G6.4-0.1) field. A&A. 2008 **481**. 401–410.

[29] *Aharonian F. et al.* Chandra and HESS observations of the supernova remnant CTB 37B. A&A. 2008 **486**. 829–836.

[30] *Aharonian F. et al.* Very high energy gamma rays from the composite SNR G 0.9+0.1. A&A. 2005 **432**. L25–L29.

[31] *Aharonian F. et al.* Discovery of extended VHE gamma-ray emission from the asymmetric pulsar wind nebula in MSH 15-52 with HESS. A&A. 2005 **435**. L17–L20.

[32] *Brogan C. et al.* Discovery of a Radio Supernova Remnant and Nonthermal X-Rays Coincident with the TeV Source HESS J1813-178. Ap. J. 2005 **629** L105–L108.

[33] *Aharonian F. et al.* Discovery of a VHE gamma-ray source coincident with the supernova remnant CTB 37A. A&A. 2008 **490**. 685–693.

[34] *Abdo A.* Fermi-LAT Discovery of Extended Gamma-ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W51C. Ap.J.L. 2009 **706**. L1-L6. astro-ph/0910.0908.

[35] *Гинзбург В.* Теоретическая физика и астрофизика. Дополнительные главы. М.: Наука, 1987. 488 с.

[36] *Schlickeiser R.* Cosmic Ray Astrophysics. Springer, 2002. 519 p.

[37] *Allen G., Petre R., Gotthelf E.* X-ray synchrotron emission from 10-100 TeV cosmic-ray electrons in the supernova remnants SN 1006. Proceedings of 2001 ICRC **6**. 2440–2443.

[38] *Berezhko E. G., & Völk H. J.* Theory of cosmic ray production in the supernova remnant RX J1713.7-3946. A&A. 2006 **451**. 981–990.

[39] *Гнатик Б.І., Петрук О.Л., Тележинський І.О.* Перехід залишків Наднових з адіабатичної до радіаційної стадії еволюції. Аналітичний опис. Кінематика і фізика небес. тіл. 2007 **23**, № 4. 195–206.

[40] *Telezhinsky I., Hnatyk B.* High Energy Signatures of POST Adiabatic Supernova Remnants. Mod. Phys. Lett. A. 2007 **22** n.35. 2617–2629.

[41] *Гнатик Б., Тележинський І.* Гамма-випромінювання постадіабатичних залишків Наднових. Журн. фізичних досліджень. 2007 **11** № 3. 343–349.

[42] *Telezhinsky I.* A new model for Vela Jr. Supernova Remnant. Astroparticle Physics. 2009 **31** n.6. 431–436.

[43] *Petruk O., Beshley V., Bocchino F., & Orlando S.* Some properties of synchrotron radio and inverse-Compton gamma-ray images of supernova remnants. MNRAS. 2009 **395**. 1467–1475.

[44] *Petruk O., Bocchino F., M. Miceli, et al.* Predicted gamma-ray image of SN 1006 due to inverse Compton emission. MNRAS. 2009 **399**. 157–165.

[45] *Petruk O., Dubner G., Castelletti G. et al.* Aspect angle for interstellar magnetic field in SN 1006. MNRAS. 2009 **393**. 1034–1040.

[46] *Miceli M., Bocchino F., Iakubovskyi D. et al.* Thermal emission, shock modification, and X-ray emitting ejecta in SN 1006. A&A. 2009 **501**. 239–249.

[47] *Reynolds S. P.* Models of Synchrotron X-Rays from Shell Supernova Remnants. Ap. J. 1998 **493**. 375–396.

[48] *Ksenofontov L. T., Berezhko E. G., Völk H. J.* Dependence of the gamma-ray emission from SN 1006 on the astronomical parameters. A&A. 2005 **443**. 973–980.

GAMMA-RAY EMISSION OF SUPERNOVA REMNANTS

Oleh PETRUK

Pidstryhach Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics,
Ukrainian National Academy of Sciences,
3 b Naukova Str., Lviv 79060

Astronomical Observatory, Lviv National University
8 Kyrylo and Mefodiy Str., Lviv 79005

History of gamma-ray astronomy is shortly reviewed. Information on the observations of supernova remnants in gamma-rays as well as on the studies of ukrainian scientists in this field is presented. Gamma-ray emission is detected from 14 out of 274 supernova remnants in our Galaxy. These objects are visible for modern means of observations in photons with energies > 0.1 GeV only; maps of their surface brightness distribution are published. A method of synthesizing the redicted gamma-ray image of a supernova remnant from its radio and X-ray maps is described and applied to a supernova remnant SN1006.