

УДК 524.1; 524.5; 539.1

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2024.70.42-49>

Анастасія СОКАРЕВА, студ.

ORCID ID: 0009-0001-0098-2310

e-mail: sokareva.a1@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Богдан ГНАТИК, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-8311-0907

e-mail: bhnatyk@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

НЕТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗАЛИШКІВ НАДНОВИХ І ПУЛЬСАРНО-ВІТРОВИХ ТУМАННОСТЕЙ В ОКОЛІ МАГНЕТАРА SGR1900+14

Вступ. Високоенергетичні процеси в міжзоряному середовищі (МЗС) нашої Галактики супроводжуються прискоренням малої частки ядер та електронів до ультрарелятивістських швидкостей. Прискорені частинки – космічні промені – генерують нетеплове випромінювання. Зокрема, електрони – синхротронне й обернене комптонівське випромінювання (лептонний механізм), протони та важчі ядра – високоенергетичне гама-випромінювання внаслідок непружних зіткнень з атомами МЗС, в яких народжуються, зокрема й піони, що швидко розпадаються на два гама-фотони (адронний механізм). Потенційними прискорювачами Галактичних космічних променів є залишки Наднових і пульсарно-вітрові туманності. В роботі проведено моделювання гама-випромінювання неототоженого протяжного джерела 4FGL J1908.6+0915e в межах адронного та лептонного механізмів гама-випромінювання залишків Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762, G043.070+0.558 та їхніх пульсарно-вітрових туманностей, що позиційно збігаються із джерелом 4FGL J1908.6+0915e на карті неба.

Методи. Для моделювання нетеплового випромінювання (від радіо- до гама-діапазону) джерела 4FGL J1908.6+0915e спостережуваний спектр гама-випромінювання, отриманий гама-телескопами космічного (Fermi-LAT) та наземного базування (H.E.S.S., HAWC), апроксимовано степеневим законом з експоненціальним обрізанням. Для розрахунку модельних спектрів використано програмний код NAIMA (Zabalza, 2016). Характеристики потенційних джерел гама-випромінювання – залишків Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762 і G043.070+0.558 – визначали з відповідності модельних спектрів до апроксимованого спостережуваного спектра.

Результати. Показано, що спостережуваний спектральний потік гама-випромінювання джерела 4FGL J1908.6+0915e може забезпечити кожен із залишків Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762 і G043.070+0.558 чи їхній сумарний вклад. Причому внаслідок відносної близькості цих залишків до Землі (3-5 кпк) необхідна енергія спалаху цих Наднових відповідає типовій енергії Галактичних Наднових – близько 10^{51} ерг.

Висновки. Неототожене протяжне джерело 4FGL J1908.6+0915e позиційно збігається з положенням магнетара SGR1900+14 на карті неба. В роботі Hnatyk et al. (2022) показано, що воно може бути проявом залишку Наднової чи магнетарно-вітрової туманності, пов'язаних із магнетаром. Але необхідні енергії Наднової, пов'язаної з народженням магнетара, виявляються екстремально великими – порядку 10^{52} ерг унаслідок великої відстані до магнетара, що становить близько 12.5 кпк. Такі Наднові (їх називають Гіперновими) – рідкісні явища в Галактиці. В цій роботі ми показали, що інші залишки Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762 і G043.070+0.558, які також збігаються з джерелом 4FGL J1908.6+0915e на карті неба, але розміщені на ближчих відстанях – 3-5 кпк, можуть забезпечити його спостережуваний спектральний потік уже за типових енергій залишків Наднових – близько 10^{51} ерг.

Ключові слова: космічні промені, залишки Наднових, пульсари, магнетари, пульсарно-вітрові туманності, нетеплове випромінювання.

Вступ

Однією з найважливіших нерозв'язаних проблем астрофізики високих енергій вже довгий час залишається визначення астрофізичних джерел і механізмів прискорення космічних променів – як галактичних (з енергіями до 10^{17} – 10^{18} eV), так і позагалактичних (з енергіями понад 10^{20} eV) (Kotera, & Olinto, 2011; Blasi, 2013; Berezhinsky, 2014; Kotera, Amato, & Blasi, 2015; Alves Batista et al., 2019). В нашій Галактиці головними потенційними джерелами космічних променів вважають залишки Наднових зір, області зореутворення та пульсарно-вітрові туманності – астрофізичні об'єкти, в яких присутні потоки плазми з ударними хвилями, оскільки саме ударні хвилі вважають найефективнішим прискорювачем частинок до ультрарелятивістських швидкостей (Hillas, 2005; Ioka, & Meszaros, 2010; Bykov et al., 2020; Morlino et al., 2021). Механізм прискорення космічних променів на фронтах ударних хвиль у цьому разі може з'явитися не тільки в потоках космічних променів, але й у потоках гама-випромінювання високих ($E > 100$ MeV) і дуже високих ($E > 100$ GeV) енергій, а також у потоках нейтрино. Гама- та нейтринне випромінювання генерується в адронному сценарії – за протон-протонних зіткнень протонів космічних променів із протонами-мішенями оточуючої плазми, що приводить до народження π -мезонів та їхнього подальшого розпаду на фотони (π^0 -мезони) та на нейтрино ($\pi^{\pm}$ -мезони). Прискорені релятивістські електрони, у свою чергу, генеруватимуть у лептонному сценарії всехвищове нетеплове випромінювання – синхротронне (головно, від радіо- до рентгенівського діапазону) й обернене комптонівське розсіяння фонових фотонів – головн, від рентгенівського до мультиTeVного гама-діапазону (Stecker, 1977; Aharonian, 2004; Fox, Kashiyama, & Meszaros, 2013; Cristofari et al., 2018; Cherenkov Telescope Array Consortium et al., 2019; Fang, & Murase, 2021). Тому пошук галактичних Певатронів – прискорювачів космічних променів до Певних енергій ($E > 10^{15}$ eV) – здійснюється на космічних (Fermi-LAT) і наземних детекторах гама-випромінювання дуже високих енергій (MAGIC, H.E.S.S., CTAO, HAWC, LHAASO та ін.).

Можливим проявом галактичного Певатрона є неототожене протяжне джерело гама-випромінювання 4FGL J1908.6+0915e (Abdollahi et al., 2020), на карті неба на нього накладається кілька потенційних прискорювачів космічних променів: залишок Наднової G42.8+0.6, магнетар SGR1900+14 (Hnatyk et al., 2022) та нещодавно виявлені кандидати в залишки Наднових G043.023+0.762 і G043.070+0.558 (Dokara et al., 2021). В роботі Hnatyk et al. (2022) показано, що це джерело може бути проявом залишку Наднової, спалах якої привів до утворення магнетара

SGR1900+14, або проявом магнетарно-вітрової туманності, породженої магнетаром. Причому велика очікувана відстань до магнетара (12.5 кпк) вимагає екстремально високої енергії спалаху Наднової – порядку 10^{52} ерг, характерної для підкласу Наднових – Гіпернових (Ioka, & Meszaros, 2010; Fox, Kashiyama, & Meszaros, 2013). 2013). Низька частота спалахів Гіпернових в нашій Галактиці залишається головною проблемою магнетарної моделі гама-випромінювання неототоженого джерела 4FGL J1908.6+0915e.

В нашій роботі розглянуто альтернативну модель джерела 4FGL J1908.6+0915e, в якій спостережуваний потік гама-випромінювання є результатом сумарного вкладу згаданих вище залишку Наднової G42.8+0.6 і кандидатів у залишки Наднових G043.023+0.762 і G043.070+0.558. Внаслідок суттєво меншої відстані до цих залишків (3–5 кпк), очікувані енергії спалахів відповідних Наднових будуть близькими до типових значень – порядку 10^{51} ерг.

Методи

Як уже зазначено вище, в гама-діапазоні магнетар оточений протяжним гама-джерелом із четвертого каталогу місії Fermi-LAT 4FGL J1908.6+0915e з координатами $RA = 287^{\circ}.16$, $Dec = 9^{\circ}.26$ ($l = 43^{\circ}.1249$, $b = 0^{\circ}.4301$), та радіусом $\Theta_{HE} = 0.^{\circ}6$, однак із невеликою статистичною значущістю 6.586σ (Ballet et al., 2023; Abdollahi et al., 2022). Диференціальний потік гама-випромінювання джерела в діапазоні 50 MeV – 1 TeV апроксимується степеневим законом

$$F_{ph} = F_{ph}(E_0)(E/E_0)^{-\Gamma}, \quad (1)$$

з енергією $E_0 = 4.195$ Гев, нормувальним потоком $F_{ph}(E_0) = (1.2765 \pm 0.1790) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ Мев}^{-1}$ і фотонним індексом $\Gamma = 2.2014 \pm 0.0843$.

Порівняння цього спектрального потоку з даними H.E.S.S. та HAWC в мультиТевній області показує, що продовження цього спектра в мультиТевну область до енергій порядку $E \lesssim 50$ TeV потребує введення експоненціального обрізання

$$F_{ph} = F_{ph}(E_0)(E/E_0)^{-\Gamma} \exp(-E/E_{cut}), \quad (2)$$

з енергією обрізання $E_{cut} = 30$ TeV, що забезпечує узгодженість апроксимаційного спектра з даними спостережень HAWC точкового неототоженого джерела 3HWC J1907+085 (Albert et al., 2020). Тому запишемо його у формі, яку використовуватимемо для представлення даних спостережень:

$$\begin{aligned} E^2 dN/dE &= \\ &= (2.06 \pm 0.39) \times 10^{-9} (E/4.54 \text{ Гев})^{-0.23 \pm 0.098} \exp(-E/30000 \text{ Гев}) \text{ Гев см}^{-2} \text{ с}^{-1} = \\ &= (2.91 \pm 0.55) \times 10^{-9} (E/1 \text{ Гев})^{-0.23 \pm 0.098} \exp(-E/30000 \text{ Гев}) \text{ Гев см}^{-2} \text{ с}^{-1} = \\ &= (0.59 \pm 0.11) \times 10^{-9} (E/1 \text{ TeV})^{-0.23 \pm 0.098} \exp(-E/30 \text{ TeV}) \text{ Гев см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 2–6 ця апроксимація сукупності спостережних даних щодо гама-спектра околу магнетара представлена цим степеневим спектром з експоненційним обрізанням і з 1-сигма-діапазоном похибок (так звана батерфляка). У подальшому моделюванні гама-потоків від залишків Наднових і пульсарно-вітрових туманностей вважатимемо цей спектр за експериментальний, так що модельні спектри повинні узгоджуватись із цим спостережуваним спектром.

В роботі ми моделюємо спостережуваний спектр як результат спільної дії кількох джерел (конкретні вклади кожного джерела – одна із задач нашого дослідження): залишків Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762 і G043.070+0.558, а також потенційних пов'язаних із цими залишками пульсарно-вітрових туманностей. В залишках Наднових і пульсарно-вітрових туманностях гама-випромінювання генерується присутніми в них космічними променями. Протони та ядра (надалі обмежимося тільки протонами як домінуючим за кількістю компонентом) генерують гама-випромінювання внаслідок непружних зіткнень з ядрами МЗС і газу всередині залишків із подальшим розпадом на фотони π^0 -мезонів, що народжуються під час зіткнень. Спектральний потік гама-випромінювання визначається спектром космічних променів, який зазвичай також приймається у вигляді степеневого спектра з експоненційним обрізанням. Причому і протони ($i = p$), й електрони ($i = e$) матимуть подібні спектри, які різняться тільки нормувальними потоками й енергіями обрізання:

$$N_i(E_i) = N_{0,i}(E_i/E_{0,i})^{-\Gamma_{cr,i}} \exp(-E_i/E_{cut,i}), \quad (4)$$

де $E_{0,i}$ – енергія, на якій визначається нормування спектра $N_{0,i}$; амплітуди протонного й електронного спектрів пов'язані співвідношенням $N_{0,e}(E) = K_{ep} N_{0,p}(E)$; $\Gamma_{cr,i}$ та $E_{cut,i}$ – спектральні індекси й енергії обрізання i -го компонента.

У випадку пульсарно-вітрових туманностей нетеплове випромінювання генерується, головно, ультрарелятивістськими електрон-позитронними парами, які складають основу пульсарних вітрів і додатково прискорюються на фронті пограничної ударної хвилі, між якою і "згребеним" МЗС міститься пульсарно-вітрова туманність. Енергетичний спектр лептонних e^+e^- космічних променів також описують наведеним вище степеневим спектром з експоненційним обрізанням. Оскільки в пульсарно-вітрових туманностях наявне магнітне поле, релятивістські лептони генеруватимуть тут нетеплове синхротронне випромінювання в радіо-рентгенівському діапазоні. Та основна енергія висвічуватиметься у високоенергетичному гама-діапазоні внаслідок оберненого комптонівського розсіяння фоновного електромагнітного випромінювання. В залишках Наднових і пульсарно-вітрових туманностях основними компо-

нентами фонового випромінювання є реліктове, інфрачервоне й оптичне. Сумарний спектр гама-випромінювання складатиметься з оберненого комптонівського розсіяння фотонів цих трьох діапазонів.

Хоча в залишках Наднових основна енергія прискорених космічних променів припадає на протони ($K_{ep} \leq 0.02$), релятивістські електрони в них також генерують синхротронне випромінювання в магнітних полях залишків і гама-випромінювання внаслідок оберненого комптонівського розсіяння зазначених вище компонентів фонового електромагнітного випромінювання.

В роботі Hnatyk et al. (2022) показано, що неототожене протяжне джерело гама-випромінювання 4FGL J1908.6+0915e може бути проявом залишку Надрової чи магнетарно-вітрової туманності, пов'язаних із магнетаром SGR1900+14. Положення магнетара проектується на небі на положення 4FGL J1908.6+0915e (рис. 1), сам магнетар – нейтронна зоря з магнітним полем $B_s = 4.3 \cdot 10^{14}$ Гс і характеристичним віком $\tau_c \approx 2.4$ кілороки – не виявляє ознак залишку Надрової чи пов'язаної з ним магнетарно-вітрової туманності в радіодіапазоні. Але гама-джерело 4FGL J1908.6+0915e може бути цим першим проявом залишку Надрової чи магнетарно-вітрової туманності, враховуючи велику відстань до магнетара $d_{mag} = 12.5$ кпк. Необхідні параметри залишку Надрової чи магнетарно-вітрової туманності в магнетарній моделі гама-випромінювання, розрахованої в роботі Hnatyk et al. (2022), зображено на рис. 2 разом із спектральним розподілом спостережуваного гама-випромінювання, розрахованим за допомогою пакета NAIMA (Zabalza, 2016). Виявлено, що необхідні енергії Надрової, пов'язаної з народженням магнетара, є екстремально великими – порядку 10^{52} ерг унаслідок великої відстані до магнетара. Такі Наднові – їх називають Гіперновими – рідкісні явища в Галактиці. В цій роботі ми моделюємо пакетом NAIMA спостережуване гама-випромінювання джерела 4FGL J1908.6+0915e потоками від інших залишків Наднових G42.8+0.6, G043.023+0.762 і G043.070+0.558, які також збігаються із джерелом 4FGL J1908.6+0915e на карті неба, але містяться на ближчих відстанях (табл. 1) і можуть забезпечити його спостережуваний спектральний потік уже для типових енергій залишків Наднових – близько 10^{51} ерг.

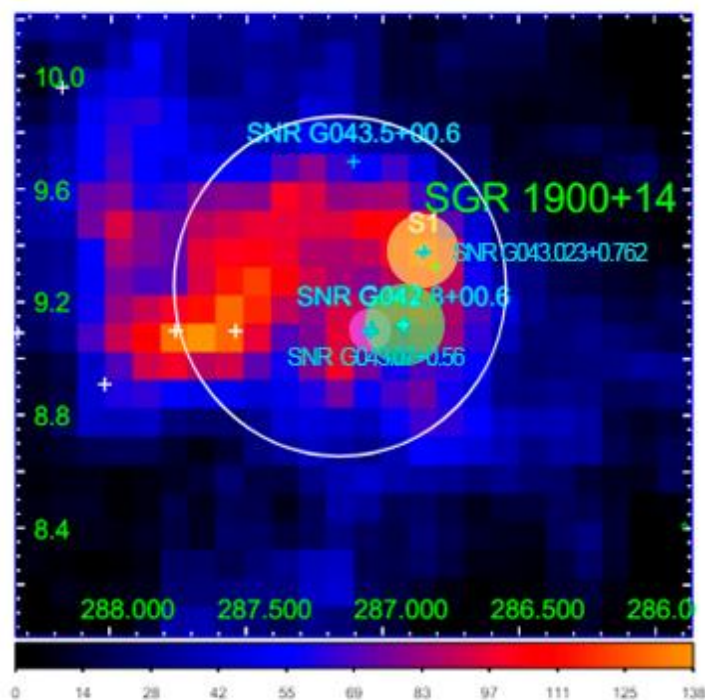


Рис. 1. Карта гама-неба в околі магнетара за даними Fermi-LAT (Jian Li et al., 2017) із нанесеними положеннями 4FGL J1908.6+0915e (біле коло), магнетара SGR1900+14 (зелений хрестик) і залишків Наднових: G42.8+0.6 (зелений круг), G043.023+0.76 (помаранчевий круг) і G043.070+0.558 (фіолетовий круг)

Таблиця 1

Параметри досліджуваних потенціальних гама-джерел

Назва	Координати				Розмір ЗН чи ПВТ	Відстань, кпк
	Екваторіальні		Галактичні			
Протяжне гама-джерело 4FGL J1908.6+0915e	287°.16	9°.26	43°.12	0°.43	0°.6	—
Магнетар SGR 1900+14	286°.81	9°.33	43°.02	0°.77	—	12.5
SNR G42.8+0.6	282°.98	9°.18	42°.80	0°.60	6'.9	4.2
SNR G043.023+0.762	286°.85	9°.31	43°.02	0°.73	6'.5	3.8
SNR G043.070+0.558	287°.02	9°.27	43°.07	0°.58	2'.1	2.7

Результати

Як зазначено вище, спостережуваний потік гама-випромінювання від околиць магнетара за даними космічної місії Fermi-LAT (протяжне неідентифіковане джерело 4FGL J1908.6+0915e) та наземної гама-обсерваторії HAWC (точкове неототожене джерело 3HWC J1907+085) в роботі Hnatyk et al. (2022) змодельовано як результат гама-випромінювання залишку Наднової та пульсарно-вітрової туманності в ньому, які утворились після спалаху Наднової, що породила і магнетар. Причому і залишок Наднової, і магнетарно-вітрова туманність як окремі джерела можуть пояснити спостережуваний гама-потік. На рис. 2 показано спектри гама-випромінювання залишку Наднової (ліворуч) і пульсарно-вітрової туманності (праворуч) для параметрів, відтворених в дослідженні Hnatyk et al. (2022), та їх порівняння з оновленими даними спостережень. Для спектрів космічних променів – адронів і лептонів – у формулі (4) основними параметрами є нормування спектра $N_{0,i}(E_{0,i})$, спектральні індекси $\Gamma_{cr,i}$ та енергії обрізання i -го компонента $E_{cut,i}$. Параметрами, які характеризують фізичні умови в області генерування випромінювання, є середня концентрація ядер (головно, протонів $n_H \approx 10 \text{ cm}^{-3}$), що беруть участь у протон-протонних зіткненнях (адронний механізм генерування гама-випромінювання, головнo, в залишках Наднових), індукція магнітного поля $B = (1,5) \text{ мкГс}$, що визначає рівень синхротронного випромінювання, температури $T = (2.7, 107, 7906) \text{ К}$ та густини енергії $w = (0.27, 1.19, 1.92) \text{ eВ cm}^{-3}$ трьох основних компонентів фоновго випромінювання – реліктового, інфрачервоного й оптичного діапазонів, які визначають рівень гама-випромінювання внаслідок оберненого комптонівського розсіяння фотонів фону релятивістськими лептонами (лептонний механізм гама-випромінювання (головно, в пульсарно-вітрових туманностях)).

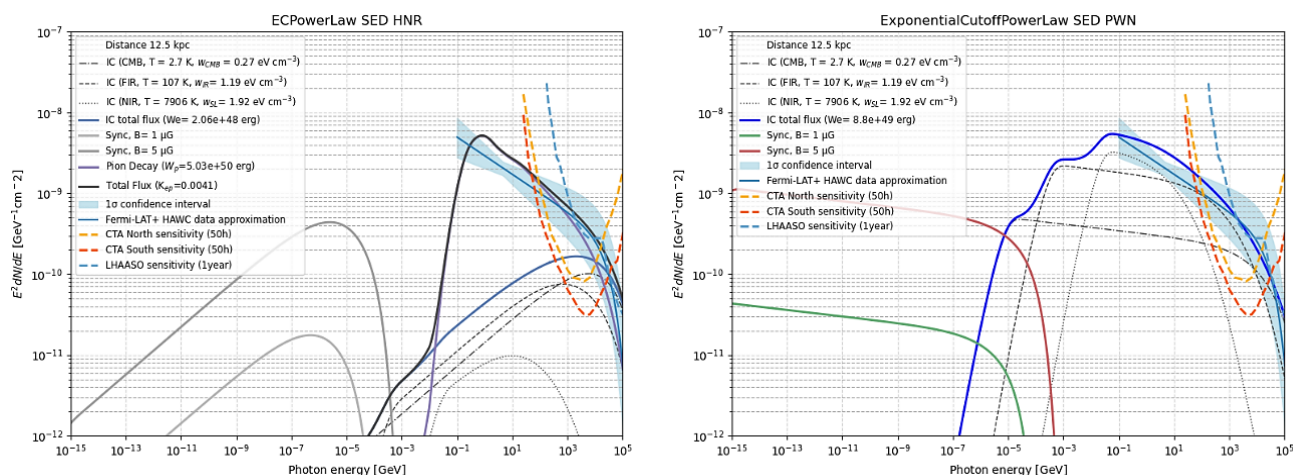


Рис. 2. Всехвильові спектри випромінювання пов'язаних із магнетаром залишку Наднової (ліворуч) та пульсарно-вітрової туманності (праворуч) для наведених параметрів моделі

Основною особливістю розрахованих пов'язаних із магнетаром моделей є велике значення необхідної енергії космічних променів – $W_p \approx 5 \cdot 10^{50}$ ерг для протонів та $W_e \approx (3-5) \cdot 10^{50}$ ерг для лептонів. Такі енергії можливі тільки в дуже енергетичних Наднових – Гіпернових з енергією спалаху порядку $W_{SN} \approx 10^{52}$ ерг. Таку енергію може забезпечити новонароджений мілісекундний магнетар з оберальною енергією порядку 10^{52} ерг. Однак Гіпернові – рідкісне явище, за оцінками в нашій Галактиці існують один-два залишки Гіпернових. Водночас в околі магнетара містяться та проєктуються на протяжне джерело 4FGL J1908.6+0915e три залишки Наднових. Ми проводимо їх моделювання як потенційних джерел спостережуваного гама-випромінювання.

Результати моделювання нетеплового випромінювання залишку Наднової G42.8+0.6 і можливої пульсарно-вітрової туманності в ньому за допомогою програмного коду NAIMA зображено на рис. 3. Основний результат – спостережуваний спектр від залишку Наднової G42.8+0.6 – можна пояснити випромінюванням залишку за енергії залишку, яка відповідає типовим значенням для галактичних Наднових – $W_{SN} \approx 10^{51}$ ерг. Відповідно і параметри пульсарно-вітрової туманності також близькі до середніх Галактичних значень $W_{PWN} \approx 10^{49}$ ерг.

На рис. 4 та 5 показано результати моделювання нетеплового випромінювання залишків Наднових (точніше, кандидатів у залишки) та їхніх потенційних пульсарно-вітрових туманностей: SNR G043.023+0.762 та SNR G043.070+0.558 (магнетар SGR 1900+14 проєктується майже на центр цього залишку, хоча відстані до них різні, див. табл. 1). Відповідно до наведених на рис. 4 та 5 параметрів, і в цьому випадку спостережувані спектри пояснюються типовими значеннями енергій залишків і пульсарно-вітрових туманностей.

Імовірнішим є випадок, коли спостережуваний спектр гама-випромінювання включає вклади всіх трьох залишків Наднових у різних пропорціях. Зокрема, з рис. 1 видно, що сумарна дія трьох залишків природно пояснює західну (праву) половину протяжного джерела 4FGL J1908.6+0915e. На рис. 6 показано результати моделювання

нетеплового випромінювання від двох залишків Наднових G043.023+0.762 та G043.070+0.558 (з вкладом по 50 % загального потоку від кожного, ліворуч) та від трьох залишків Наднових G043.023+0.762, G043.070+0.558 та G42.8+0.6 (з вкладом по 33.3 % загального потоку від кожного, праворуч). В обох випадках, вимоги до енергетики кожного джерела тільки послаблюються.

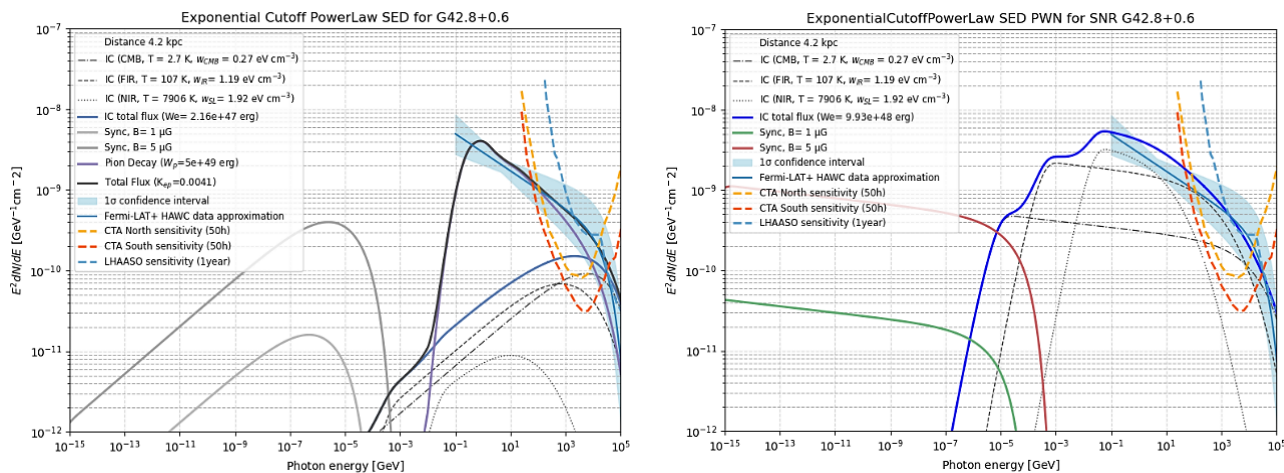


Рис. 3. Всехвильові спектри випромінювання залишку Наднової G42.8+0.6 (ліворуч) та його пульсарно-вітрової туманності (праворуч) для наведених параметрів моделі

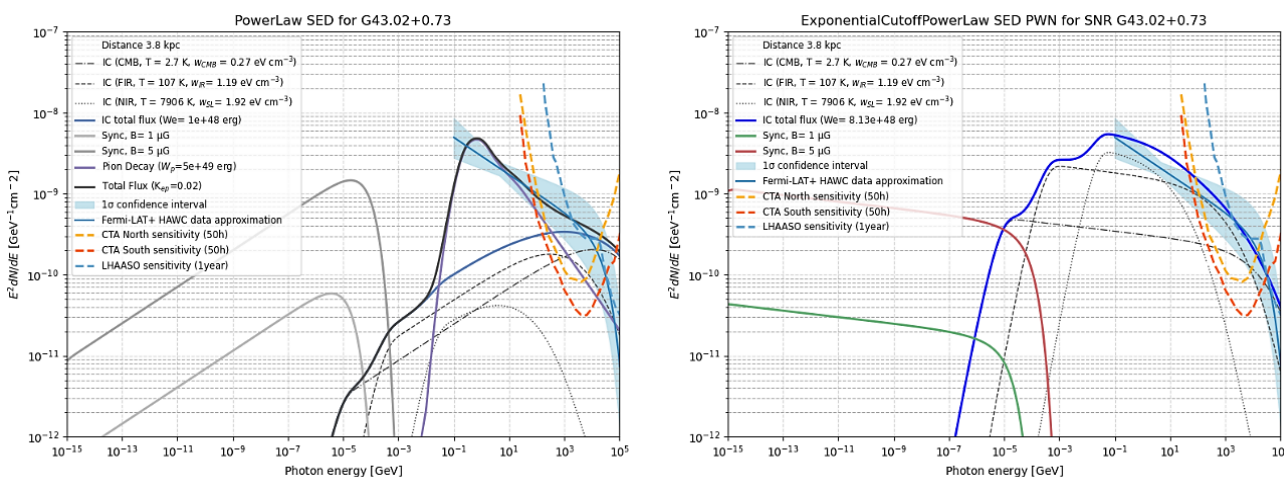


Рис. 4. Всехвильові спектри випромінювання залишку Наднової SNR G043.02+0.762 (ліворуч) та його пульсарно-вітрової туманності (праворуч) для наведених параметрів моделі

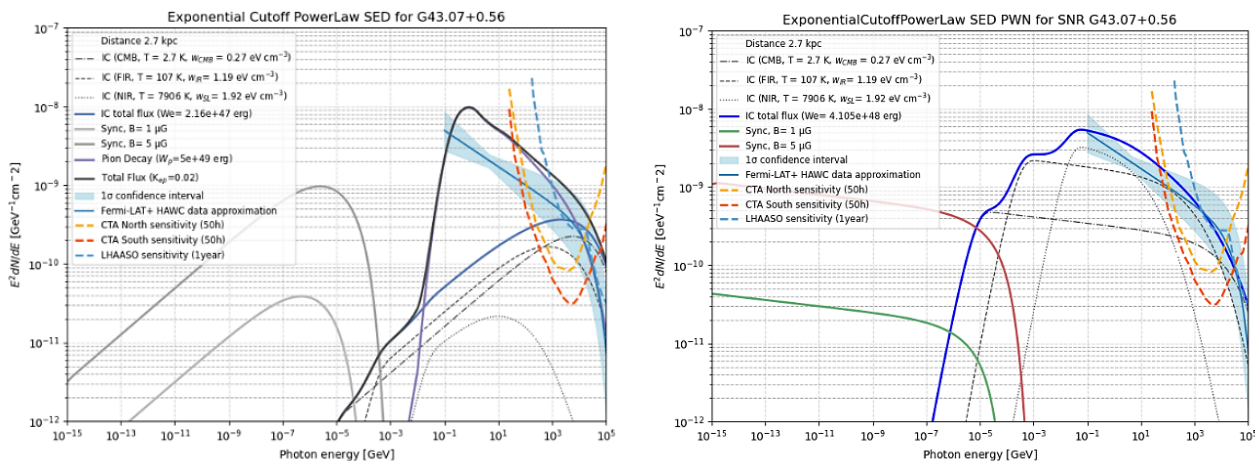


Рис. 5. Всехвильові спектри випромінювання залишку Наднової SNR G043.070+0.558 (ліворуч) та його пульсарно-вітрової туманності (праворуч) для наведених параметрів моделі

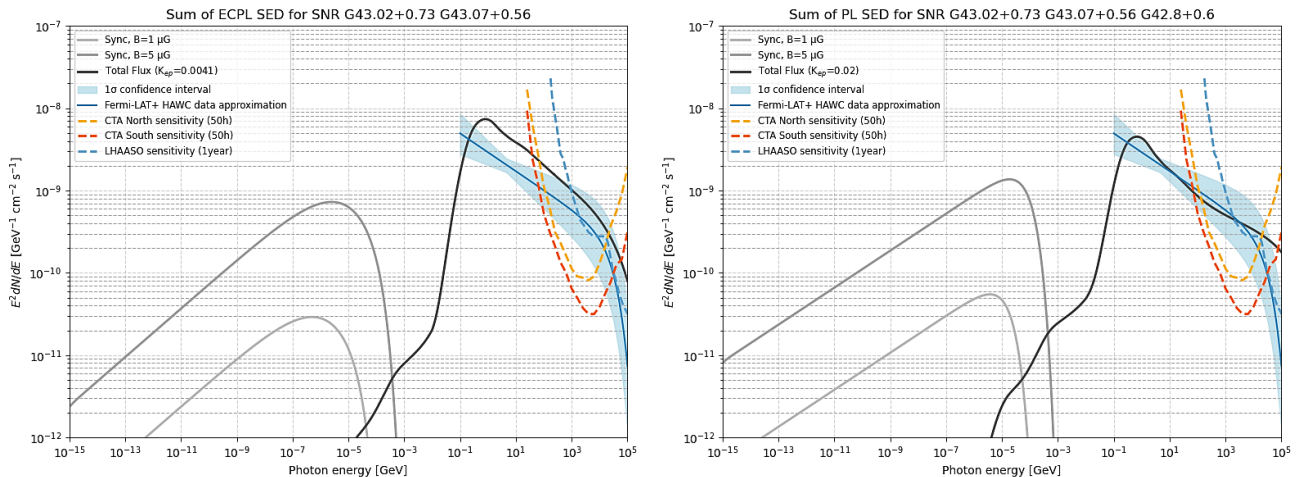


Рис. 6. Всехвильові спектри сумарного випромінювання двох залишків Наднових G043.023+0.762 та G043.070+0.558 з 50%-м вкладом кожного (ліворуч) і трьох залишків Наднових G043.023+0.762, G043.070+0.558 та G42.8+0.6 із 33.3%-м вкладом кожного (праворуч)

Дискусія і висновки

Найперспективнішими кандидатами на прискорювачі Галактичних космічних променів є залишки Наднових / Гіпернових і пульсарно-вітрові туманності в них. Прискорені тут космічні промені проявляються, головню, через всехвильове нетеплове електромагнітне випромінювання з максимальним енерговиділенням у гама-діапазоні. Спостережуване гама-випромінювання неототоженого протяжного джерела 4FGL J1908.6+0915e з околиці магнетара SGR 1900+14 може бути пояснене в моделі очікуваних (досі не виявлених) пов'язаних з магнетаром залишку та магнетарно-вітрової туманності. Однак для відстані до магнетара $d = 12.5$ клк необхідна енергія залишку порядку 10^{52} ерг. Водночас на джерело 4FGL J1908.6+0915e на небі накладаються ще три залишки Наднових (два з них – ще тільки кандидати в залишки, оскільки достовірно ще не підтверджені), табл. 1. Ми показуємо, що і раніше відкритий залишок Наднової G42.8+0.6 ($d = 4.2$ клк), і нещодавно відкриті кандидати в залишки Наднових G043.023+0.762 ($d = 3.8$ клк), і G043.070+0.558 ($d = 2.7$ клк) також можуть бути потенційними джерелами спостережуваного гама-випромінювання. Перевагою цих джерел є відносно близькі відстані, які дозволяють отримати типові енергії залишків чи їхніх пульсарно-вітрових туманностей.

Внесок авторів: Анастасія Сокарева – аналіз літературних даних, проведення розрахунків, написання – чернетка; Богдан Гнатик – концептуалізація, аналіз літератури і даних, аналіз результатів і висновки, написання – оригінальна чернетка, перегляд і редагування.

Подяки, джерела фінансування. Висловлюємо подяку Владиславу Нікітченку та Михайлу Полещуку за допомогу в підготовці рисунків. Роботу виконано за рахунок часткового фінансування в межах виконання держбюджетних тем № 24БФ023-01, № 22БФ023-04.

Список використаних джерел

- Abdollahi, S., Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., Bastieri, D., Becerra Gonzalez, J., Bellazzini, R., Berretta, A., Bissaldi, E., Blandford, R. D., Bloom, E. D., Bonino, R., ... Zaharijas, G. (2020). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 247(1), id. 33, 37 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6bcb>
- Abdollahi, S., Acero, F., Baldini, L., Ballet, J., Bastieri, D., Bellazzini, R., Berenji, B., Berretta, A., Bissaldi, E., Blandford, R. D., Bloom, E., Bonino, R., Brill, A., Britton, R., Bruel, P., Burnett, T. H., Buson, S., ... Zaharijas, G. (2022). Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 260(2), id. 53, 24 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac6751>
- Aharonian, F. A. (2004). *Very high energy cosmic gamma radiation: a crucial window on the extreme Universe*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., Camacho, J., Angeles, R., Arteaga-Velazquez, J. C., Arunbabu, K. P., Avila Rojas, D., Ayala Solares, H. A., Baghmanyan, V., Belmont-Moreno, E., BenZvi, S. Y., Brisbois, C., Caballero-Mora, K. S., Capistran, T., Carraminana, A., Casanova, S., & Zhou, H. (2020). 3HWC: The Third HAWC Catalog of Very-high-energy Gamma-Ray Sources. *Astrophysical Journal*, 905(1), id. 76, 14 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc2d8>
- Alves Batista, R., Biteau, J., Bustamante, M., Dolag, K., Engel, R., Fang, K., Kampert, K.-H., Kostunin, D., Mostafa, M., Murase, K., Oikonomou, F., Olinto, A. V., Panasyuk, M. I., Sigl, G., Taylor, A. M., Unger, M. (2019). Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6(-), id. 23, 35 pp. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00023>
- Ballet, J., Bruel, P., Burnett, T. H., & Lott, B., The Fermi -LAT collaboration (2023). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 4 (4FGL-DR4). *ArXiv:2307.12546v4*, 16 pp. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.12546>
- Berezinsky, V. (2014). Extragalactic cosmic rays and their signatures. *Astroparticle Physics*, 53(-), 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.04.001>
- Blasi P. (2013). The origin of galactic cosmic rays. *Astronomy and Astrophysics Review*, 21(-), id. 70, 73 pp. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0070-7>
- Bykov A. M., Marcowith A., Amato E., Kalyashova M. E., Kruijssen J. M. D., & Waxman E. (2020). High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions. *Space Science Review*, 216(-), id. 42, 37 pp. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00663-0>
- Cherenkov Telescope Array Consortium, & Acharya, B. S., Agudo, I., Al Samarai, I., Alfaro, R., Alfaro, J., Alispach, C., Alves Batista, R., Amans, J. P., Amato, E. (2019). *Science with the Cherenkov Telescope Array*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. <https://doi.org/10.1142/10986>
- Cristofari, P., Gabici, S., Terrier, R., & Humensky, T. B. (2018). On the search for Galactic supernova remnant PeVatrons with current TeV instruments. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 479(3), 3415–3421. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1589>
- Dokara, R., Brunthaler, A., Menten, K. M., Dzib, S. A., Reich, W., Cotton, W. D., Anderson, L. D., Chen, C.-H. R., Gong, Y., Medina, S.-N. X., Ortiz-León, G. N., Rugel, M., Urquhart, J. S., Wyrowsky, F., Yang, A. Y., Beuther, H., Billington, S. J., ... Roy, N. (2021). A global view on star formation: The GLOSTAR Galactic plane survey. II. Supernova remnants in the first quadrant of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, 651(-), id. A86, 28 pp. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039873>
- Fang, K., & Murase, K. (2021) Multimessenger Implications of Sub-PeV Diffuse Galactic Gamma-Ray Emission. *Astrophysical Journal*, 919(2), id. 93, 8 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac11f0>
- Fox, D. B., Kashiyama, K., & Meszaros, P. (2013). Sub-PeV Neutrinos from TeV Unidentified Sources in the Galaxy. *Astrophysical Journal*, 774(1), id. 74, 6 pp. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/74>

- Hillas, A. M. (2005). TOPICAL REVIEW: Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 31(5), R95–R131. <https://doi.org/10.1088/0954-3889/31/5/R02>
- Hnatyk, B., Hnatyk, R., Zhdanov, V., & Voitsekhovskiy, V. (2022). Unveiling the nature of the unidentified gamma-ray sources 4FGL J1908.6 + 0915e, HESS J1907 + 089/HOTS J1907 + 091, and 3HWC J1907 + 085 in the sky region of the magnetar SGR 1900 + 14. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 514(1), 726–779. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1304>
- Ioka, K., & Meszaros, P. (2010). Hypernova and Gamma-ray Burst Remnants as TeV Unidentified Sources. *Astrophysical Journal*, 709(2), 1337–1342. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/709/2/1337>
- Kotera, K., Amato, E., & Blasi, P. (2015). The fate of ultrahigh energy nuclei in the immediate environment of young fast-rotating pulsars. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2015(8), id. 026, 14 pp. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/08/026>
- Kotera, K., & Olinto, A. V. (2011). The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49(11), 119–153. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102620>
- Morlino, G., Blasi, P., Peretti, E., & Cristofari, P. (2021). Particle acceleration in winds of star clusters. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 504(4), 6096–6105. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab690>
- Stecker, F. W. (1977). Observations of galactic gamma-rays and their implications for galactic structure studies. *Astrophysical Journal*, 212(1), 60–70. <https://doi.org/10.1086/155019>
- Zabalza, V. (2016). Naima: a Python package for inference of relativistic particle energy distributions from observed nonthermal spectra. *Proceedings of Science*, 236(-), id. 922, 8 pp. <https://doi.org/10.22323/1.236.0922>

References

- Abdollahi, S., Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., Bastieri, D., Becerra Gonzalez, J., Bellazzini, R., Berretta, A., Bissaldi, E., Blandford, R. D., Bloom, E. D., Bonino, R., ... Zaharijas, G. (2020). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 247(1), id. 33, 37 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6bcb>
- Abdollahi, S., Acero, F., Baldini, L., Ballet, J., Bastieri, D., Bellazzini, R., Berenji, B., Berretta, A., Bissaldi, E., Blandford, R. D., Bloom, E., Bonino, R., Brill, A., Britto, R. J., Bruehl, P., Burnett, T. H., Buson, S., Zaharijas, G. (2022). Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 260(2), id. 53, 24 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac6751>
- Aharonian, F. A. (2004). *Very high energy cosmic gamma radiation: a crucial window on the extreme Universe*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., Camacho, J., Angeles, R., Arteaga-Velazquez, J. C., Arunbabu, K. P., Avila Rojas, D., Ayala Solares, H. A., Baghmanyan, V., Belmont-Moreno, E., BenZvi, S. Y., Brisbois, C., Caballero-Mora, K. S., Capistran, T., Carraminana, A., Casanova, S., & Zhou, H. (2020). 3HWC: The Third HAWC Catalog of Very-high-energy Gamma-Ray Sources. *Astrophysical Journal*, 905(1), id. 76, 14 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc2d8>
- Alves Batista, R., Biteau, J., Bustamante, M., Dolag, K., Engel, R., Fang, K., Kampert, K.-H., Kostunin, D., Mostafa, M., Murase, K., Oikonomou, F., Olinto, A. V., Panasyuk, M. I., Sigl, G., Taylor, A. M., Unger, M. (2019). Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6(-), id. 23, 35 pp. <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00023>
- Ballet, J., Bruehl, P., Burnett, T. H., & Lott, B., The Fermi -LAT collaboration (2023). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 4 (4FGL-DR4). *ArXiv:2307.12546v4*, 16 pp. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.12546>
- Berezinsky, V. (2014). Extragalactic cosmic rays and their signatures. *Astroparticle Physics*, 53(-), 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.04.001>
- Blasi, P. (2013). The origin of galactic cosmic rays. *Astronomy and Astrophysics Review*, 21(-), id. 70, 73 pp. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0070-7>
- Bykov A. M., Marcowith A., Amato E., Kalyashova M. E., Kruijssen J. M. D., & Waxman E. (2020). High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions. *Space Science Reviews*, 216(-), id. 42, 37 pp. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00663-0>
- Cherenkov Telescope Array Consortium, & Acharya, B. S., Agudo, I., Al Samarai, I., Alfaro, J., Alispach, C., Alves Batista, R., Amans, J.P., Amato, E. (2019). *Science with the Cherenkov Telescope Array*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. <https://doi.org/10.1142/10986>
- Cristofari, P., Gabici, S., Terrier, R., & Humensky, T. B. (2018). On the search for Galactic supernova remnant PeVatrons with current TeV instruments. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 479(3), 3415–3421. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1589>
- Dokara, R., Brunthaler, A., Menten, K. M., Dzib, S. A., Reich, W., Cotton, W. D., Anderson, L. D., Chen, C.-H. R., Gong, Y., Medina, S.-N. X., Ortiz-León, G. N., Rugel, M., Urquhart, J. S., Wyrowski, F., Yang, A. Y., Beuther, H., Billington, S. J., ... Roy, N. (2021). A global view on star formation: The GLOSTAR Galactic plane survey. II. Supernova remnants in the first quadrant of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, 651(-), id. A86, 28 pp. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039873>
- Fang, K., & Murase, K. (2021). Multimessenger Implications of Sub-PeV Diffuse Galactic Gamma-Ray Emission. *Astrophysical Journal*, 919(2), id. 93, 8 pp. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac11f0>
- Fox, D. B., Kashiyama, K., & Meszaros, P. (2013). Sub-PeV Neutrinos from TeV Unidentified Sources in the Galaxy. *Astrophysical Journal*, 774(1), id. 74, 6 pp. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/74>
- Hillas, A. M. (2005). TOPICAL REVIEW: Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 31(5), R95–R131. <https://doi.org/10.1088/0954-3889/31/5/R02>
- Hnatyk, B., Hnatyk, R., Zhdanov, V., & Voitsekhovskiy, V. (2022). Unveiling the nature of the unidentified gamma-ray sources 4FGL J1908.6 + 0915e, HESS J1907 + 089/HOTS J1907 + 091, and 3HWC J1907 + 085 in the sky region of the magnetar SGR 1900 + 14. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 514(1), 726–779. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1304>
- Ioka, K., & Meszaros, P. (2010). Hypernova and Gamma-ray Burst Remnants as TeV Unidentified Sources. *Astrophysical Journal*, 709(2), 1337–1342. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/709/2/1337>
- Kotera, K., Amato, E., & Blasi, P. (2015). The fate of ultrahigh energy nuclei in the immediate environment of young fast-rotating pulsars. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2015(8), id. 026, 14 pp. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/08/026>
- Kotera, K., & Olinto, A. V. (2011). The Astrophysics of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49(11), 119–153. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102620>
- Morlino, G., Blasi, P., Peretti, E., & Cristofari, P. (2021). Particle acceleration in winds of star clusters. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 504(4), 6096–6105. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab690>
- Stecker, F. W. (1977). Observations of galactic gamma-rays and their implications for galactic structure studies. *Astrophysical Journal*, 212(1), 60–70. <https://doi.org/10.1086/155019>
- Zabalza, V. (2016). Naima: a Python package for inference of relativistic particle energy distributions from observed nonthermal spectra. *Proceedings of Science*, 236(-), id. 922, 8 pp. <https://doi.org/10.22323/1.236.0922>

Отримано редакцією журналу / Received: 30.10.24

Прорецензовано / Revised: 02.11.24

Схвалено до друку / Accepted: 06.12.24

Anastasiia SOKAREVA, Student
ORCID ID: 0009-0001-0098-2310
e-mail: s0kareva.a1@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Bohdan HNATYK, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8490-4327
e-mail: bhnatyk@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

NON-THERMAL EMISSION OF SUPERNOVA REMNANTS AND PULSAR-WIND NEBULAE FROM THE MAGNETAR SGR1900+14 REGION

Background. High-energy processes in the interstellar medium (ISM) of our Galaxy are accompanied by the acceleration of a small fraction of nuclei and electrons to ultra-relativistic velocities. Accelerated particles – cosmic rays – generate non-thermal radiation. In particular, electrons – synchrotron and inverse Compton radiation (leptonic mechanism), protons and heavier nuclei – high-energy gamma-ray emission as a result of inelastic collisions with ISM atoms, in which, in particular, pions are born and quickly decay into two gamma-photons (hadronic mechanism). Supernova remnants and pulsar-wind nebulae are potential accelerators of Galactic cosmic rays. The work simulates the gamma-ray emission of the unidentified extended gamma-ray source 4FGL J1908.6+0915e within the framework of hadronic and leptonic mechanisms working in the Supernova remnants G42.8+0.6, G043.023+0.762, G043.070+0.558 and their pulsar-wind nebulae, which positionally coincide with the source 4FGL J1908.6+0915e on the sky map.

Methods. In order to model the non-thermal radiation (from the radio to the gamma-ray range) of the source 4FGL J1908.6+0915e, the observed spectrum of gamma-ray emission obtained by space-based (Fermi-LAT) and ground-based (H.E.S.S., HAWC) gamma-ray telescopes was approximated by a power-law with exponential cut-off. The NAIMA software code (Zabalza, 2016) was used for calculation the model spectra. The characteristics of potential sources of gamma-ray emission – of the Supernova remnants G42.8+0.6, G043.023+0.762 and G043.070+0.558 – were determined from the correspondence of the model spectra to the approximation of the observed spectrum.

Results. It is shown that the observed gamma-ray spectral flux of the source 4FGL J1908.6+0915e can be provided by each of the Supernova remnants G42.8+0.6, G043.023+0.762 and G043.070+0.558 or as a sum of their contributions. At the same time, due to the relative proximity of these remnants to the Earth (3-5 kpc), the required energy of the explosion of these Supernovae corresponds to the typical energy of Galactic Supernovae – about 10^{51} ergs.

Conclusions. The unidentified extended source 4FGL J1908.6+0915e coincides in the sky position with the the magnetar SGR1900+14. In the work of Hnatyk et al. (2022) it is shown that it can be a manifestation of a Supernova remnant or a magnetar-wind nebula associated with a magnetar. But the necessary energies of the Supernova associated with the birth of the magnetar turn out to be extremely large – on the order of 10^{52} ergs due to the large distance to the magnetar – about 12.5 kpc. Such Supernovae – they are called Hypernovae – are rare phenomena in the Galaxy. In this paper, we have shown that other Supernova remnants G42.8+0.6, G043.023+0.762 and G043.070+0.558, which also coincide with the source 4FGL J1908.6+0915e on the sky map, but are at closer distances – 3-5 kpc – can provide the observed spectral flux already at typical energies of Supernova remnants – about 10^{51} ergs.

Keywords: cosmic rays, Supernova remnants, pulsars, magnetars, pulsar-wind nebulae, non-thermal radiation.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.