

<https://doi.org/10.15407/knit2023.06.093>

УДК 524.1, 524.7

Ю. І. ФЕДОРОВ, пров. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

Ю. Л. КОЛЕСНИК, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

О. М. СЕРГІЄНКО, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. дослід.

А. А. ВАСИЛЕНКО, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ І ДЕТЕКТУВАННЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, ГАММА-СПАЛАХІВ ТА ІНШИХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ

Продемонстрована важливість використання баз даних наукових космічних місій для фундаментальних астрофізичних досліджень. На основі даних космічних апаратів та одержаних розв'язків рівняння переносу зроблені оцінки рівня модуляції космічних променів у геліосферних магнітних полях. На основі архівів спостережень наземних і космічних телескопів у радіо- та оптичному діапазонах систематизовані радіовластивості вибірки ізольованих активних ядер галактик близького Всесвіту. Також розглянуті можливості, які можуть з'явитися завдяки базам даних майбутніх мультимовних космічних місій.

Ключові слова: база даних, космічні промені, активні ядра галактик, космічна місія.

Вступ. З початку 21 століття астрофізика переживає революцію, пов'язану з появою баз даних спостережень наукових космічних місій та відкритим онлайн-доступом до них. Поєднання даних з різних інструментів чи діапазонів довжин хвиль дозволяє глибше вивчати фізичну природу астрофізичних об'єктів. Ми розглядаємо два приклади досліджень, для яких визначальним став доступ до баз даних астрофізичних космічних місій.

Першим прикладом є використання наявних баз експериментальних даних для тестування теоретичних моделей галактичних космічних променів (ГКП), інтенсивність яких модулюється при взаємодії заряджених частинок високої енергії з електромагнітними полями сонячного вітру.

Другий приклад — це використання баз даних архівних спостережень, що перебувають у відкритому доступі. На основі архівів спостережень наземних і космічних телескопів у радіо- та оптичному спектральних діапазонах ми систематизували радіовластивості 61 ізольованого активного ядра галактики (АЯГ) на $z < 0.05$, активність яких зумовлена лише фізичними процесами, що відбуваються в системі «тор — акреційний диск — ядерна область — надмасивна чорна діра».

В останні роки бурхливо розвивається пошук багатоканальних транзйентних подій. Вже сьогодні відбувається поширення «попереджень» між різними обсерваторіями, а через мережу

Цитування: Федоров Ю. І., Колесник Ю. Л., Сергієнко О. М., Василенко А. А. Особливості розподілу і детектування космічних променів, гамма-спалахів та інших високоенергетичних джерел. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 6 (145). С. 93—101. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.093>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) [2] координується пошук збігів у підповерхових подіях різних інструментів. Ми робимо огляд можливостей, які можуть з'явитися у майбутньому завдяки реалізації проекту космічної місії — «фабрики транзієнтів» THESEUS та появи її бази даних.

Модуляція інтенсивності космічних променів у геліосферних магнітних полях. Надзвичайно важливе значення для тестування теоретичних моделей ГКП мають дані, отримані космічними апаратами (КА) «Піонер» і «Вояджер», які досліджували віддалені області геліосфери. Космічна місія «Улісс» досліджувала полярні області геліосфери і отримала важливі дані про структуру геліосфери і розподіл ГКП у міжпланетному середовищі. Одночасне детектування інтенсивності космічних променів (КП) космічним апаратом «Улісс» (на високих геліоширотах) і супутниками IMP-8, AMS і PAMELA (на навколосемних орбітах) дозволили отримати унікальні дані відносно просторового розподілу ГКП у різні періоди активності Сонця.

Теоретичне дослідження процесу модуляції інтенсивності КП базується на розв'язках рівняння переносу КП з відповідними умовами на границі геліосфери [3, 11]. У роботі [10] запропоновано метод наближеного розв'язування рівняння переносу, який враховує малість анізотропії ГКП. Даний підхід одержав розвиток в роботі [21], де було запропоновано ітераційну процедуру врахування малого параметра — анізотропії кутового розподілу ГКП. На основі розв'язку рівняння переносу КП ми виконали розрахунки щільності радіального потоку КП і потоку частинок по геліошироті та оцінили градієнти інтенсивності ГКП і анізотропії кутового розподілу частинок.

Запишемо рівняння переносу космічних променів у міжпланетному середовищі в такому вигляді [6, 7, 15]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} + \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} p^2 j_p = 0,$$

де

$$j_\alpha = -\kappa_{\alpha\beta} \frac{\partial N}{\partial r_\beta} - \frac{u_\alpha p}{3} \frac{\partial N}{\partial p}$$

— щільність потоку частинок, концентрація яких $N(r, p, t)$, $\kappa_{\alpha\beta}$ — тензор дифузії КП, \mathbf{u} — швидкість сонячного вітру. Величина

$$j_p = \frac{u p}{3} \frac{\partial N}{\partial r}$$

— щільність потоку частинок у просторі абсолютних значень імпульсу.

Тензор дифузії КП має такий вигляд:

$$\kappa_{\alpha\beta} = \kappa \delta_{\alpha\beta} + (\kappa_{\parallel} - \kappa_{\perp}) h_\alpha h_\beta + \kappa_A \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} h_\gamma,$$

де $\delta_{\alpha\beta}$ — символ Кронекера, $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ — одиничний антисиметричний тензор, $\mathbf{h} = \mathbf{H}/H$ — одиничний вектор у напрямку великомасштабного міжпланетного магнітного поля \mathbf{H} , κ_{\parallel} — коефіцієнт дифузії частинок у напрямку середнього магнітного поля, κ_{\perp} — коефіцієнт дифузії частинок у напрямку, перпендикулярному до магнітного поля, а величина κ_A визначає антисиметричні компоненти тензора дифузії КП.

Компоненти щільності потоку КП мають вигляд

$$j_r = -\kappa_{\parallel} \frac{\partial N}{\partial r} - \frac{u p}{3} \frac{\partial N}{\partial p} - \kappa_A h_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial N}{\partial \theta},$$

$$j_\theta = -\kappa_{\perp} \frac{1}{r} \frac{\partial N}{\partial \theta} + \kappa_A h_\phi \frac{\partial N}{\partial r}.$$

Розглядаємо просторовий розподіл частинок, який усереднено по періоду обертання Сонця, так що концентрація частинок не залежить від азимутального кута ϕ .

У моделі міжпланетного магнітного поля, яку запропонував Паркер [14], геліоширотна складова магнітного поля дорівнює нулю ($H_\theta = 0$). Радіальна і азимутальна компоненти напруженості магнітного поля визначені співвідношеннями

$$H_r = \sigma H_0 \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 \left[1 - 2\Theta \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

$$H_\phi = -\sigma H_0 \frac{r_s^2 \Omega}{r u} \left[1 - 2\Theta \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \theta,$$

де r_s — радіус Сонця, Ω — кутова швидкість обертання Сонця, а $\Theta(x)$ — одинична функція Хевісайда. В епоху A^+ радіальна складова напруженості міжпланетного магнітного поля у північній півсфері геліосфери має додатний знак.

Визначимо безрозмірну координату

$$\rho = \frac{r}{r_0}$$

і безрозмірний імпульс частинки

$$\zeta = \frac{p}{mc},$$

де m — маса спокою частинки, r_0 — відстань до границі області модуляції КП. Вважаємо, що на границі геліосфери задано енергетичний спектр галактичних космічних променів. Вільний пробіг частинки збільшується при збільшенні енергії частинки. Припустимо, що всі компоненти тензора дифузії КП змінюються пропорційно імпульсу частинки. У даному випадку

$$\kappa_{\parallel} = \kappa_0 \zeta, \quad \kappa_{\perp} = \delta_{\perp} \kappa_0 \zeta, \quad \kappa_A = \delta_A \kappa_0 \zeta.$$

Для отримання наближеного розв'язку рівняння переносу КП використаємо наближення малої анізотропії [9, 10]:

$$\left(1 + \frac{\delta_A^2}{\delta_{\perp}^2} h_{\phi}^2\right) \frac{\partial N}{\partial \rho} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial N}{\partial \zeta} = 0,$$

де

$$\mu = \frac{ur_0}{\kappa_0}$$

— параметр модуляції КП. Вважаємо, що концентрація частинок на границі геліосфери є заданою функцією імпульсу частинки:

$$N(1, \zeta) = N_0(\zeta).$$

Розв'язок рівняння, який задовольняє цю граничну умову, має вигляд

$$N(\rho, \theta, \zeta) = N_0(\xi),$$

де

$$\xi = \zeta + \frac{\mu}{3} \int_{\rho}^1 \frac{d\rho}{\delta_{\perp}^2 \left(1 + \frac{\delta_A^2}{\delta_{\perp}^2} h_{\phi}^2\right)}.$$

Запишемо формулу для енергетичного розподілу протонів на границі геліосфери:

$$N_0(\zeta) = q \zeta^{-\beta} (1 + \zeta^2)^{(\beta-\gamma)/2},$$

де q — постійна величина, яку можна визначити, наприклад, на основі величини щільності енергії КП у міжзоряному середовищі.

Згідно з формулою спектр ультрарелятивістських частинок ($\zeta \gg 1$) виявляється степеневим з показником степеня γ . Для нерелятивістських частинок ($\zeta \ll 1$) з цієї формули випливає степенева залежність концентрації КП від імпульсу з показником степеня β . При значеннях параметрів $\beta = 1.76$, $\gamma = 4.78$ спектр частинок узгоджується з енергетичним розподілом КП, який було зареєстровано КА «Вояджер» після того,

як він залишив межі геліосфери [24]. Згідно із отриманим розв'язком рівняння переносу рівень модуляції КП зменшується при збільшенні кінетичної енергії частинок. Концентрація ГКП монотонно збільшується при збільшенні геліоцентричної відстані.

Щільність геліоширотного потоку КП дорівнює

$$j_{\theta} = -\frac{u}{\mu} \frac{\partial N_0(\xi)}{\partial \xi} \left\{ \frac{\delta_{\perp}}{\rho} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} + \sigma \delta_A \frac{\rho \omega \sin \theta}{\sqrt{1 + \rho^2 \omega^2 \sin^2 \theta}} \frac{\partial \xi}{\partial \rho} \left[1 - 2\Theta \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\},$$

де

$$\omega = \frac{r_0 \Omega}{u}.$$

Рівняння переносу КП у безрозмірних змінних має такий вигляд:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho^2 j_r + \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} j_{\theta} \sin \theta + \frac{u}{3\zeta^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \zeta^3 \frac{\partial N}{\partial \rho} = 0.$$

На основі цього рівняння можна одержати співвідношення для щільності радіального потоку КП, якщо використати наближені значення концентрації частинок і щільності геліоширотного потоку космічних променів [9]. Розрахунки показують, що у площині геліоекватора радіальний потік частинок в епоху A^+ напрямлений до Сонця, а в епоху A^- радіальний потік частинок має протилежний напрямок (з геліосфери). У період часу A^+ радіальний потік частинок (поза екваторіальною площиною) є додатним і напрямленим від Сонця, а в епоху A^- радіальний потік частинок напрямлений до Сонця.

Запишемо концентрацію космічних променів у вигляді [21]

$$N(\rho, \theta, \xi) = N_0(\xi) + \delta N(\rho, \theta, \zeta),$$

тоді

$$\frac{\partial \delta N}{\partial \rho} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial \delta N}{\partial \zeta} = \Phi(\rho, \theta, \zeta).$$

Права частина цього рівняння визначається наближеними значеннями концентрації і щільності радіального потоку КП. Розв'язок цього рівняння має вигляд [9]:

$$\delta N(\rho, \theta, \zeta) = \int_1^{\rho} d\rho_1 \Phi(\rho_1, \theta, \xi_1),$$

де

$$\xi_1 = \zeta + \frac{\mu}{3}(\rho_1 - \rho).$$

Згідно з проведеними розрахунками інтенсивність ГКП в А⁺-епоху сонячної активності збільшується при збільшенні геліошироти. В А⁻-періоди активності Сонця спостерігається протилежний ефект — інтенсивність КП максимальна в області геліоекватора. Наведені розрахунки узгоджуються зі спостережними даними.

Вимірювання, які було виконано КА «Улісс» далеко від площини екліптики і на сателітах у навколосемному космічному просторі у 1994 р. (поблизу мінімуму сонячної активності, А⁺-фаза сонячної активності), продемонстрували наявність геліоширотних градієнтів інтенсивності ГКП. При цьому широтні градієнти (по напрямках до полярних областей) всіх типів ядер виявились додатними як у північній, так і у південній півсферах Дослідження, які були проведені місіями «Улісс», РAMELA та іншими у 2006—2007 рр., дозволили визначити радіальні та широтні градієнти інтенсивності КП в епоху мінімуму 23-го циклу сонячної активності (А⁻-період). Було продемонстровано, що в А⁻-епоху активності Сонця інтенсивність ГКП максимальна в екваторіальній області.

Наведені розрахунки дозволяють оцінити анізотропію кутового розподілу ГКП. Анізотропія КП пропорційна щільності потоку частинок і визначається співвідношенням

$$\delta = \frac{3j}{vN}.$$

Оцінимо анізотропію КП на орбіті Землі. Щільність потоків КП в радіальному і широтному напрямках виявляється малою по абсолютній величині. Відповідне значення анізотропії кутового розподілу частинок на геліоцентричній відстані 1 а. о. є нехтовно малим. На орбіті Землі силова лінія міжпланетного магнітного поля утворює з радіальним напрямком кут, близький до $\pi/4$. Тому дифузійний потік КП в азимутальному напрямку є близьким до дифузійної складової радіального потоку. Радіальний дифузійний потік приблизно дорівнює конвекційному потоку. Таким чином, отримуємо співвідношення для азимутальної анізотропії КП на геліоцентричній

відстані 1 а.о.:

$$\delta_\phi = \frac{u\zeta}{vN} \frac{\partial N}{\partial \zeta}.$$

Отже, потік ГКП на орбіті Землі напрямлений у азимутальному напрямку, що узгоджується зі спостережною добовою варіацією інтенсивності КП. Згідно із формулою отримуємо значення анізотропії КП: $\xi_\phi \approx -0.005$ для частинок з енергіями від 1 МеВ до 1 ГеВ.

Космічні промені надзвичайно високої енергії ($E > 10^{19.7}$ еВ) розсіюються в основному в локалізованих намагнічених структурах, таких як скупчення галактик, філаменти тощо, із середнім вільним пробігом у десятки мегапарсек. Отже, у випадку найближчих транзйентних джерел очікується суттєвий внесок у спостережуваний потік від нерозсіяних і слабо розсіяних частинок, що може бути вирішальним фактором у ідентифікації цих джерел. Метод розрахунку часової еволюції енергетичних спектрів ультрависокоенергетичних КП запропоновано в роботі [8] на основі аналітичних розв'язків рівняння переносу з явним визначенням внеску від розсіяних і нерозсіяних частинок, зокрема прикладом тут слугували мілісекундний пульсар і близька галактика з активним ядром Центавр А.

Властивості ізольованих АЯГ в радіо- і X-діапазонах. Для вибірки 61 близьких ізольованих АЯГ [16] ми визначили ступінь радіогучності, «просторовий» тип радіоджерела (точковий або протяжний), а також виконано пошук пекулярностей у радіодіапазоні, коли джерело радіовипромінювання не можна однозначно ототожнити саме з активністю ядра галактики. Виявлено, що більшість з них є радіотихими з низькою або повністю відсутньою активністю ядра [17]. Водночас властивості 21 із 61 ізольованого АЯГ за спостереженнями в рентгенівському діапазоні також свідчать про слабку активність ядер. А саме, їм характерні систематично низькі значення власної світності у X-діапазоні 2...10 кеВ на рівні $10^{39} \dots 10^{41}$ ерг/с, що є нижнім порогом значень світностей для АЯГ в X-діапазоні енергій [4, 12, 23].

Приклад слабого в рентгенівському діапазоні ізольованого АЯГ є ядро галактики NGC 6951 (тип ядра Сейферт 2, морфологічний тип галак-

тики SAB(rs)bc, відстань 18.7 Мпк). На рис. 1 представлено рентгенівський спектр активного ядра цієї галактики в діапазоні $E = 0.6...7$ кеВ, отриманий на основі спостережень космічної обсерваторії «Свіфт» на інструменті XRT із сумарною експозицією 35010 с. Спектр апроксимовано моделлю, в якій континуум складається зі ступеневої моделі з нейтральним поглинанням в активному ядрі, а на низьких енергіях континуум описується чорнотільною моделлю (сумарна статистика C-stat = 25.8/18). Степеневий індекс має значення $\Gamma = 2.73_{-2.45}^{+2.77}$, стовпчикове поглинання дорівнює $N_H = 5.76_{-2.64}^{+4.85} \cdot 10^{22}$ см⁻², температура чорнотільного випромінювання дорівнює $kT = 0.29_{-2.64}^{+4.85}$ кеВ. Власна світність в діапазоні 2...10 кеВ становить $7.67 \cdot 10^{39}$ ерг/с. Беручи до уваги низьку рентгенівську світність та «м'який» спектральний індекс, можна зробити висновок, що темп акреції на надмасивну чорну діру в NGC 6951 є малим, а також те, що її режим, можливо, є випромінювально неефективним, тобто повністю чи частково адвекційним.

Оскільки лише вісім ізольованих АЯГ каталогу 2MIG мають виміряні потоки S на 5 ГГц, виконано перерахунок спектральних щільностей потоків з частоти 1.4 ГГц на частоту 5 ГГц у припущенні синхротронного механізму випромінювання в радіодіапазоні $S_{5\text{GHz}} = S_{1.4\text{GHz}} (5/1.4)^{-\alpha}$ (спектральний індекс приймався рівним 0.7 при ступеневій формі спектру $S_\nu \sim \nu^{-\alpha}$). Вибір значення $\alpha = 0.7$ зумовлений тим, що це є середнє значення степеня, очікуване для оптично тонкого синхротронного випромінювання. Таким чином, для 27 ізольованих АЯГ спектральні щільності потоку на частоті 5 ГГц становлять менше 3 мЯн, для 15 АЯГ $S_{5\text{GHz}}$ лежать у діапазоні 4...15 мЯн, для 7 ізольованих АЯГ значення $S_{5\text{GHz}}$ лежить у діапазоні 15...55 мЯн, дві галактики, ESO 097-013 та ESO 483-009, мають найбільші значення спектральних потоків — 304 і 132 мЯн відповідно.

Значення ж спектральної щільності потоку на частоті 1.4 ГГц ($S_{1.4\text{GHz}}$) лежать переважно в діапазоні 3...20 мЯн. Дві галактики, PGC 35009 та NGC 6951, чітко вирізняються більшими значеннями — 50...200 мЯн. Для 10 ізольованих АЯГ значення $S_{1.4\text{GHz}}$ становить менше 3 мЯн.

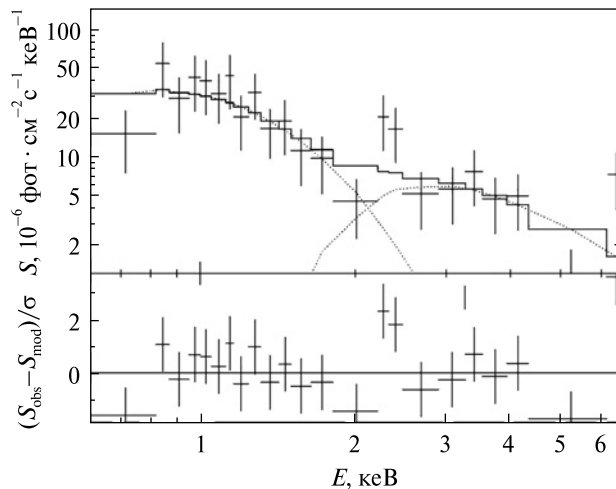


Рис. 1. Рентгенівський спектр АЯГ NGC 6951 в діапазоні 0.6...7 кеВ

Для визначення радіогучності було розраховано величину R як відношення S для 1.4 ГГц або 5 ГГц до спектральної щільності потоку в оптичному діапазоні (а саме в оптичній смузі B — між довжинами хвиль 400 нм та 500 нм). Виявлено, що 51 з 61 об'єктів є радіотихими галактиками ($R < 10$), а для 9 галактик вибірки відсутні дані спостережень в радіодіапазоні, водночас радіогучною виявилась галактика ESO 483-009 (тип активності ядра Sy3/LINER з морфологічним типом материнської галактики SAB00pec) з величиною параметра радіогучності $R = 20.72$.

Також було знайдено, що чотири ізольовані галактики з активними ядрами характеризуються або пекулярною/неправильною формою (йдеться про порівняння з «класичною» формою у вигляді центрального точкоподібного радіоджерела, що збігається з оптичним ядром разом з можливими симетричними радіоджетами або радіовухами) радіоструктур або ж розходження положень радіо- та оптичного джерел (тобто, різниця положень більша за похибку радіокаталогу. Наприклад, для огляду FIRST ця різниця повинна бути більшою за 8"). Це галактики NGC 157, MCG-02-37-004, ESO 506-004 та PGC 206359. Для NGC 157 та MCG -02-37-004 на рис. 2 та рис. 3 відповідно показано гібридні оптико-радіомапи з контурами інтенсивностей. Виявилось, що три з чотирьох радіоджерел, розташова-

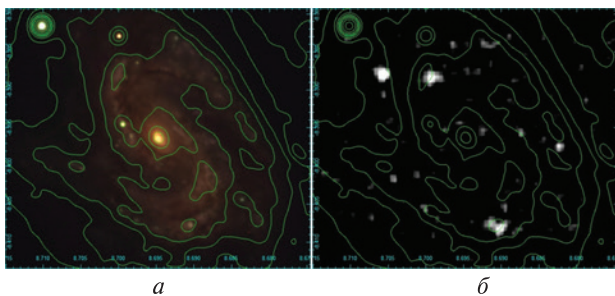


Рис. 2. Зображення NGC 0157: *a* — оптичне у смугах $i + r + z$ (огляд неба PanSTARRS), *б* — радіозображення на частоті 1.4 GHz (огляд неба VLA FIRST). Зеленим кольором показані логарифмічні ізофоти фільтра i (13 рівнів)

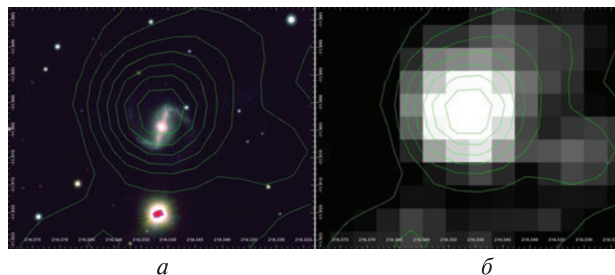


Рис. 3. Зображення MCG-02-37-004: *a* — оптичне у смугах $i + r + z$ (огляд неба PanSTARRS), *б* — радіозображення на частоті 1.4 GHz (огляд неба NVSS), червоний колір — лінійна шкала ізоліній потоку для шести ступенів. Найвищий радіоконтур відповідає потоку 0.0035 Ян/промінь. Радіоструктура у формі гало не має чіткої гіпотези для пояснення

них у межах галактики NGC 157, проектуються на зони зореутворення у спіральних рукавах, а четверте, ймовірно, є фоновим джерелом. Ядро NGC 157 не показує активності в радіодіапазоні. У випадку MCG-02-37-004 ситуація протилежна, адже внаслідок низької роздільної здатності огляду неба NVSS «радіопляма» покриває усю галактику. Таким чином, її ядро дійсно може бути активним у радіодіапазоні, але питання наявності джетів для цього джерела є предметом майбутніх спостережень у радіодіапазоні.

Перспективи розвитку баз даних: майбутні космічні місії. Довготривалі гамма-спалахи у піку їхнього прояву є найяскравішими відомими джерелами електромагнітного випромінювання. Оскільки їхні попередники є масивними зорями, вони

забезпечують відслідковування зореутворення та галактик із зореутворенням протягом усєї космічної історії. Їхнє яскраве післясвічення зі степеневим законом забезпечує ідеальне підсвічування для досліджень поглинання міжзоряним та міжгалактичним середовищем аж до ери реіонізації. Запропонований на другу половину 2030-х рр. проект космічної обсерваторії THESEUS (Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor) призначений для детектування великих вибірок гамма-спалахів на червоних зміщеннях $z > 6$. Тоді стануть можливими допоміжні спостереження за допомогою основних інструментів наступного покоління, що уможливить виконання низки проривних досліджень. Очікується, що THESEUS зможе ідентифікувати та локалізувати від 40 до 50 гамма-спалахів на $z > 6$ за 3.45 роки наукових спостережень і дозволить визначити фотометричні червоні зміщення з точністю, кращою ніж 10 %, завдяки ідентифікації розриву Лаймана, що зміщується до діапазону чутливості для зображень його інфрачервоного телескопа (IRT) [22]. THESEUS дозволить дослідити слабкі хвости функції світності галактик і щільності швидкості зореутворення до високих червоних зміщень; обмежити хід реіонізації за межами $z \sim 6$; детально вивчити раннє хімічне збагачення від вибухів зір, зокрема III покоління; потенційно охарактеризувати рівняння стану темної енергії на найвищих червоних зміщеннях.

THESEUS дозволить проводити моніторинг транзйєнтного неба з низкою переваг перед попередніми місіями, що зробить значний крок вперед у нашій здатності досліджувати Всесвіт у багатьох каналах. Значна частина погано локалізованих багатоканальних джерел буде незалежно надійно детектована за допомогою THESEUS XGIS і SXI у межах однієї орбіти завдяки безпрецедентному поєднанню великого поля зору (XGIS: 2 стеррад в енергетичному діапазоні $E = 2...150$ кеВ і більш ніж 4 стеррад для $E > 150$ кеВ; SXI: 0.5 стеррад) і добутку ефективної площі та поля зору цих приладів.

Це дозволить незалежне тригерування електромагнітних відповідників численних гравітаційно-хвильових/нейтринних джерел, як це було у випадку GRB 170817A, тригерованого

Fermi/GBM незалежно від виявлення гравітаційних хвиль з того самого джерела [5]. Водночас XGIS і SXI забезпечать досить точну локалізацію (<15 хв), що відсутня у Fermi/GBM. Це дозволить подальші спостереження за допомогою бортового 70 см інфрачервоного телескопа (IRT), а також інших космічних та наземних інструментів з вузьким полем зору [5]. Небесні координати зможуть бути розповсюджені серед астрономічної спільноти за лічені хвилини. У випадку виявлення ближнього інфрачервоного/оптичного відповідника за допомогою IRT у відповідь на тригер SXI/XGIS, розповсюджені небесні координати матимуть рівень точності порядку секунди дуги. Це дозволить ініціювати подальші глибші спостереження за допомогою дуже великих наземних і космічних телескопів, доступних на початку 2030-х рр., наприклад SKA, CTA, ELT або Athena, що ще більше підсилить науковий результат з точки зору встановлення характеристик джерела гравітаційних хвиль та/або нейтрино [18]. Висока тривалість спектральних спостережень у широкому діапазоні 0.3 кеВ...20 МеВ (SXI + XGIS), можливо додатково з близьким інфрачервоним діапазоном (IRT), становитиме велику перевагу для ідентифікації та визначення характеристик різноманітних джерел-відповідників гравітаційних хвиль та нейтрино відносно інших моніторів неба, які обмежуються вузьким діапазоном, як-от майбутня китайська місія Einstein Probe (0.3...4 кеВ) [18].

У відповідь на тригери від THESEUS виконуватиметься пошук підпорогових подій у гравітаційно-хвильових та нейтринних архівних даних (наприклад, у випадку тригера гамма-спалаху). Колаборація LIGO-Virgo вже реалізувала цю стратегію для ряду виявлених гамма-спалахів. Корисне навантаження місії THESEUS включатиме три інструменти [1]:

1) Soft X-ray Imager (SXI, 0.3...5 кеВ): набір з 2 lobster-eye телескопів, що охоплюють загальне поле зору (FOV) порядку 0.5 стеррад з похибкою локалізації джерела менш ніж 1-2';

2) InfraRed Telescope (IRT, 0.7...1.8 мкм): ІЧ-телескоп класу 70 см з полем зору 15' × 15' для швидкого відгуку, з можливістю як зображення, так і спектроскопії;

3) X-Gamma rays Imaging Spectrometer (XGIS, 2 кеВ ... 20 МеВ): набір з двох камер з кодуваною маскою, що використовують монолітні детектори рентгенівських та гамма-променів на основі стрічок кремнієвих діодів у поєднанні з кристалічним сцинтилятором CsI, що дає поле зору приблизно 2 стеррад і точність локалізації джерела 10' в діапазоні 2..150 кеВ, а також поле зору більш ніж 4 стеррад при енергіях понад 150 кеВ.

Профіль місії також включає [1]: систему бортових блоків обробки даних (DHU), здатну виявляти, ідентифікувати та локалізувати ймовірні транзєнти у полі зору SXI і XGIS; можливість швидкої (не більше кількох десятків секунд) передачі на землю часу початку та положення гамма-спалаху (та інших цікавих транзєнтів); можливість повороту космічного апарата щонайменше на 6°/хв. Базова конфігурація запуску/орбіти [1] — це запуск за допомогою Vega-C на низьку навколосезмну орбіту з низьким нахилом (LEO, 600 км, <5°), яка має переваги забезпечення низького і стабільного рівня фону для високоенергетичних інструментів, можливості використання магнітного поля Землі для швидкого повороту космічного апарата, полегшення швидкої передачі тригерів і положень транзєнтів на Землю.

У листопаді 2023 р. THESEUS став одним із трьох кандидатів на місію ESA M7. Остаточне рішення очікується у 2026 р.

Висновки. Розглянуті приклади показують, що вже сьогодні бази даних космічних місій дозволяють отримувати важливі результати в різних напрямках астрофізики. Зокрема, результати для розробленої теоретичної моделі, отримані на основі вимірювань космічної місії PAMELA, показали, що рівні модуляції космічних променів на 1 а. о. (енергії 50...150 ГеВ) становлять кілька відсотків. Оцінка рівня модуляції є аргументом для пошуку ефектів такої величини в наявних базах експериментальних даних. Отримані результати свідчать про наявність періодів (при сонячних максимумах), коли ефекти будуть найбільш значними.

Отримані завдяки використанню баз даних рентгенівських космічних телескопів результати важливі для запиту на програми спосте-

режень ізольованих АЯГ близького Всесвіту в радіодіапазоні як за допомогою окремих радіотелескопів, так і в режимі радіоінтерферометрії з наддовгими базами. Це дозволить заповнити прогалини у даних про властивості ізольованих АЯГ та провести детальне картографування особливостей розподілу радіовипромінювання цих галактик у порівнянні з оптичним та рентгенівськими спектральними діапазонами. Також слід відмітити, що випромінювання в радіодіапазоні (спостереження на різних частотах та побудова спектральних радіоіндексів) надає можливість розділити області активного зоретворення галактик та центральні області з надмасивними чорними дірами в активному ядрі, а отже і надати інформацію про відсутність активності ядра.

Спостереження за допомогою THESEUS транзйентних джерел з попереджень, отриманих з інших телескопів, а також спостереження інших обсерваторій, тригеровані ним, дозволять вивести багатоканальну обсерваторію на новий рівень. Додаткові можливості виникнуть також завдяки використанню даних THESEUS спільно з базами даних підпорогових подій з інших інструментів, що входять у мережу AMON. Детектування гамма-спалахів на високих червоних зміщеннях дасть можливість, серед іншого, надійно протестувати моделі ранньої темної енергії [8, 13, 20], які потенційно можуть послабити або розв'язати напруження Габбла.

Дослідження були виконані за Цільовою комплексною програмою з наукових космічних досліджень НАН України на 2018–2022 роки.

REFERENCES

1. Amati L., O'Brien P. T., Goetz D., et al. (2021). The THESEUS space mission: science goals, requirements and mission concept. *Experimental Astron.*, **52**, 183–218.
2. Ayala Solares H. A., Coutu S., Cowen D. F., et al. (2020). The Astrophysical Multimessenger Observatory Network (AMON): Performance and science program. *Astroparticle Phys.*, **114**, 68–76.
3. Bobik P., Putis M., Kolesnyk Y. L., Shakhov B. A. (2021). Estimation of the modulation level of cosmic rays at high energies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **503**, № 3, 3386–3393. DOI: 10.1093/mnras/stab597
4. Chesnok N. G., Sergeev S. G., Vavilova I. B. (2009). Optical and X-ray variability of Seyfert galaxies NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, and Akn 564 and quasar 1E 0754. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **25**, № 2, 107–113. DOI: 10.3103/S0884591309020068
5. Ciolfi R., Stratta G., Branchesi M., et al. (2021). Multi-messenger astrophysics with THESEUS in the 2030s. *Experimental Astron.*, **52**, 245–275.
6. Dolginov A. Z., Toptygin I. (1967). Multiple Scattering of Particles in a Magnetic Field with Random Inhomogeneities. *Sov. Phys. JETP*, **24**, 1195.
7. Dorman L. I., Katz M. E., Fedorov Yu. I., Shakhov B. A. (1983). Variation of cosmic ray energy in interplanetary space. *Astrophys. Space Sci.*, **94**, 43.
8. Fedorov Yu. I., Gnatyk R. B., Hnatyk B. I., et al. (2016). Ballistic and diffusive components in the dynamic spectra of ultra-high energy cosmic rays from nearby transient sources. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, № 3, 105–119. DOI: 10.3103/S088459131603003X
9. Fedorov Yu. I., Shakhov B. O., Kolesnyk Yu. L. (2022). Modulation of Galactic Cosmic Ray Intensity in the Approximation of Small Anisotropy. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **38**, № 4, 181–189. DOI: 10.3103/S0884591322040043
10. Gleeson L. J., Axford W. I. (1968). Solar modulation of galactic cosmic rays. *Astrophys. J.*, **159**, 1011.
11. Kolesnyk Y. L., Bobik P., Shakhov B. A., Putis M. (2017). An analytically iterative method for solving problems of cosmic-ray modulation. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **470**, № 1, 1073–1085. DOI: 10.1093/mnras/stx1202
12. Kompaniets O. V., Babyk Iu. V., Vasylenko A. A., et al. (2023). X-ray spectral and image spatial models of NGC 3081 with Chandra data. *Proc. Int. Astron. Union*, **362**, 100–104. DOI: 10.1017/S1743921322001624
13. Novosyadlyj B., Sergijenko O., Apunevych S., Pelykh V. (2010). Properties and uncertainties of scalar field models of dark energy with barotropic equation of state. *Phys. Review D*, **82**, id. 103008, 16 p.
14. Parker E. N. (1958). Dynamics of the interplanetary gas and magnetic field. *Astrophys. J.*, **128**, 664.
15. Parker E. N. (1965). The passage of energetic charged particles through interplanetary space. *Planet. Space Sci.*, **13**, 9.

16. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., Babyk Iu., Klimanov S. (2015). The 2MIG isolated AGNs. I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **447**, № 3, 2209–2223. DOI: 10.1093/mnras/stu2556
17. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Vasylenko A. A., Ulyanov O. M. (2023). Radio properties of the low-redshift isolated galaxies with active nuclei. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **39**, № 2, 47–72. DOI: 10.15407/kfnt2023.02.047
18. Rosati P., Basa S., Blain A. W., et al. (2021). Synergies of THESEUS with the large facilities of the 2030s and guest observer opportunities. *Experimental Astron.*, **52**, 407–437.
19. Sergijenko O., Durrer R., Novosyadlyj B. (2011). Observational constraints on scalar field models of dark energy with barotropic equation of state. *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*, **8**(08), id. 004, 25 p.
20. Sergijenko O., Novosyadlyj B. (2009). Perturbed dark energy: Classical scalar field versus tachyon. *Phys. Review D.*, **80**, id. 083007, 13 p.
21. Shakhov B. A., Kolesnyk Yu. L. (2006). Iteration method for solution of cosmic ray propagation theory boundary problems. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **22**, № 2, 101–108.
22. Tanvir N. R., Le Floc'h E., Christensen L., et al. (2021). Exploration of the high-redshift universe enabled by THESEUS. *Experimental Astron.*, **52**, 219–244.
23. Vasylenko A. A., Vavilova I. B., Pulatova N. G. (2020). Isolated AGNs NGC 5347, ESO 438-009, MCG-02-04-090, and J11366-6002: Swift and NuSTAR joined view. *Astron. Nachr.*, **341**, № 8, 801–811. DOI: 10.1002/asna.202013783
24. Vos E. E., Potgieter M. S. (2015). New modeling of galactic proton modulation during the minimum of solar cycle 23/24. *Astrophys. J.*, **815**, № 2, article id. 119, 8 p. DOI: 10.1088/0004-637X/815/2/119

Стаття надійшла до редакції 26.09.2023

Після доопрацювання 07.12.2023

Прийнято до друку 07.12.2023

Received 26.09.2023

Revised 07.12.2023

Accepted 07.12.2023

Yu. I. Fedorov, leading researcher, doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

Yu. L. Kolesnyk, senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

O. Sergijenko, senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher

A. A. Vasylenko, senior researcher, candidate of physical and mathematical sciences

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine

27, Akademika Zabolotnoho Str., Kyiv, 03143 Ukraine

PECULIARITIES OF THE DISTRIBUTION AND DETECTION OF COSMIC RAYS, GAMMA-RAY BURSTS, AND OTHER HIGH-ENERGY SOURCES

The importance of using databases of scientific space missions for fundamental astrophysical research is demonstrated. Based on the spacecraft data and the obtained solutions of the transport equation, the estimates of level of the cosmic rays modulation in the heliospheric magnetic fields were made. Based on the archives of ground-based and space telescope observations in the radio and optical ranges, the radio properties of a sample of isolated active galactic nuclei in the nearby Universe have been systematized. Opportunities that may arise from the databases of future multiwavelength space missions are also considered.

Keywords: database, cosmic rays, active galactic nuclei, space mission.