

КОСМІЧНІ ДЖЕРЕЛА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА МІЖНАРОДНІЙ КОСМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ ГАММА-400

В. Бешлей¹, Є. Вовк², Д. Малишев³, В. Марченко⁴, О. Петрук¹, В. Савченко², Д. Якубовський^{3,5}

¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача,

вул. Наукова, 36, 79060, Львів, Україна

²Астрофізичний центр обробки даних ISDC, Університет Женеви,

вул. д'Екожжіа, 16, CH-1290, Версуа, Швейцарія

³Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України,

вул. Метрологічна, 14-б, 03680, Київ, Україна

⁴Астрономічний науково-дослідний центр ЧНПУ імені Тараса Шевченка,

вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, Чернігів, Україна

⁵Національний університет "Кієво-Могилянська академія",

вул. Сквороди, 2, 04070, Київ, Україна

(Отримано 7 грудня 2012 р.; в остаточному вигляді — 19 березня 2013 р.)

Космічна обсерваторія ГАММА-400, запланована до запуску в 2018 році Федеральним космічним агенством Російської Федерації, вважається одним із найбільш перспективних майбутніх проєктів гамма-астрономії в МеВ-ТеВ діапазоні. У цій праці подано огляд космічних джерел гамма-випромінювання, потенційно цікавих для постановки можливих наукових завдань перед ГАММА-400. Особливу увагу приділено завданням, до яких українські наукові групи можуть додати суттєвий науковий доробок. Серед них — непрямий пошук ознак темної матерії, визначення параметрів космологічних магнітних полів та дослідження широкого класу астрофізичних об'єктів, зокрема залишків наднових, активних ядер галактик, гамма-спалахів та змінних галактичних джерел.

Ключові слова: гамма-астрономія, темна матерія, гамма-спалахи, залишки відновлених зір.

PACS number(s): 95.85.Pw, 95.55.Ka, 95.35.+d, 98.79.Rz, 98.58.Mj

ЗМІСТ

I	Вступ	1	V	Гамма-спалахи	10	
	A	Історія та сучасний стан гамма-астрономії	A	Випромінювання в ГеВ-ному діапазоні	11	
	B	Космічна місія ГАММА-400	1	1	Спостереження ГеВ-ного випромінювання від гамма-спалахів	11
	C	Напрями гамма-астрономії, у яких працюють українські вчені	3	2	Моделювання ГеВ-ного випромінювання від гамма-спалахів	12
		1 Темна матерія	3	B	Перспективи ГАММА-400 в дослідженні гамма-спалахів	13
		2 Ядра активних галактик	3	VI	Залишки наднових зір	14
		3 Гамма-спалахи	4	A	Спостереження й моделювання гамма-випромінювання ЗН	14
		4 Залишки наднових зір	4	B	Перспективи для ГАММА-400	16
		5 Змінні галактичні джерела	4	VII	Галактичні змінні об'єкти	16
II	Темна матерія	5	A	Вимірювання в гамма-діапазоні	16	
	A	Пошук вузьких гамма-ліній від темної матерії	5	B	Перспективи для ГАММА-400	17
	B	Лінійоподібні структури в гамма-діапазоні: лінії-кандидати від темної матерії?	6	VIII	Висновки	18
	C	Перспективи для ГАММА-400	6			
III	Швидка змінність блазарів	6		I. ВСТУП		
	A	Гамма-випромінювання блазарів	6	A. ІСТОРІЯ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ГАММА-АСТРОНОМІЇ		
	B	Перспективи для ГАММА-400	8			
IV	Вимірювання міжгалактичних магнітних полів	8				
	A	Міжгалактичні магнітні поля та гамма-випромінювання	8			
	B	Перспективи для ГАММА-400	9			

Історія гамма-астрономії нараховує півстоліття, проте найінтенсивніше вона розвивається останнім часом [1–4]. Роком її народження вважають 1958, коли була опублікована перша стаття на цю тему [5].

Тут зібрано ряд передбачень і вперше вказано на два конкретні астрономічні об'єкти — Крабоподібну туманність і Лебідь А — від яких слід очікувати гамма-випромінювання. Розумінню того, що в космосі повинні генеруватися гамма-фотони, сприяли теоретичні дослідження попередніх десятиліть. Так, зокрема, у 1948–1952 роках вийшли статті [9–11], які вказували на те, що рух космічних променів у міжзор'яному середовищі повинен супроводжуватися гамма-випромінюванням; саме воно зумовлює дифузний галактичний та позагалактичний гамма-фон.

Сьогоднішні спостереження практично повністю перекривають гамма-діапазон з енергіями квантів від 30 кеВ до 100 ТеВ. Кванти з такими енергіями цілком поглинаються земною атмосферою на висотах 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 року, зафіксував 22 гамма-фотони, що прийшли з різних напрямків. 1967 року детектор на супутнику OSO-3 зафіксував 621 квант з енергіями > 100 МеВ з напрямку галактичної площини. Спостереження 1970–80 років довели існування ізотропного космічного гамма-фону, підтвердили теоретичне передбачення про те, що Сонце випромінює гамма-кванти та вказали на кілька точкових джерел гамма-випромінювання, із яких найяскравішим є Крабоподібна туманність. Відтоді виведено на орбіту низку гамма-телескопів, які створили важливу експериментальну базу.

Донедавна просторове розділення всіх гамма-телескопів не було достатнім для створення карт гамма-джерел. Першим космічним гамма-телескопом із роздільною здатністю менше одного градуса став телескоп імені Е. Фермі [12]. Він виведений на орбіту в червні 2008 року. За підсумками роботи трьох місяців 2009 року була опублікована карта неба в гамма-променях з енергіями, вищими за 300 МеВ [13]. За 24 місяці своєї роботи телескоп виявив 1873 джерела [14]. Він є основним орбітальним інструментом сучасної гамма-астрономії [15].

Гамма-промені з енергіями до 10 ГеВ фіксують безпосередньо навколоземні гамма-обсерваторії. Проте навіть найяскравіші джерела продукують настільки малу кількість фотонів з енергіями порядку ТеВ, що супутникові спостереження не виправдовуються: за обмежених розмірів супутника витримки стають сумірними з тривалістю його життя. Тому 1959 року висловлено ідею використовувати наземні спостереження для фіксації гамма-фотонів надвисоких енергій. Для цього використовують черенковські телескопи. Принцип їхньої роботи базується на фіксації черенковського випромінювання, яке утворюється внаслідок поглинання земною атмосферою первинного гамма-фотона. Повідомлення про перше джерело (Крабоподібну туманність), спостережене таким способом, з'явилося 1989 року. Найбільш вдалою системою черенковських телескопів став H.E.S.S. [16]. 2004 року опубліковані перші результати його спостережень. Роздільна здатність цієї системи становить

кілька кутових мінут. Побудована H.E.S.S. карта залишку наднової RX 1713.7-3946 була першою картою космічного об'єкта в гамма-променях. Це досягнення оприлюднене 2004 року в журналі Nature [17]. Воно започаткувало зображувальну гамма-астрономію. Близьким за характеристиками до H.E.S.S. є черенковський телескоп MAGIC [18], який спостерігає небо над північною півкулею. Представником наступного покоління наземних черенковських гамма-телескопів повинен стати СТА [19].

Нині відомо близько 2000 джерел [14], серед яких є наднові та їхні залишки, пульсари та пульсарні туманності, галактичні ядра, галактики та їх скупчення, квазари; неідентифікованими є близько третини джерел. Важливою вимогою до сучасних телескопів є можливість вивчати змінність гамма-джерел. Напевно, найбільш вражаючим відкриттям гамма-астрономії є цілком новий клас астрономічних явищ — гамма-спалахи тривалістю від долей до сотень секунд. Гамма-діапазон є ключовим для вивчення властивостей космічних променів [20] та природи темної матерії [71].

В. КОСМІЧНА МІСІЯ ГАММА-400

Федеральне космічне агентство Росії у співпраці з іншими країнами планує підготовку та запуск гамма-обсерваторії “ГАММА-400”. Концепція місії ГАММА-400 [22, 23] (див. також <http://gamma400.lebedev.ru> щодо офіційного вебсайту місії) вперше запропонована в наприкінці 80-их років [24]. Відтоді вона була суттєво модернізована з використанням досвіду наявних космічних обсерваторій гамма- та космічних променів, зокрема Large Area Telescope (LAT) на борту космічної обсерваторії імені Е. Фермі [12], гамма-обсерваторії AGILE [25] та спектрометра космічних променів AMS-02 [26]. На сьогодні, метою місії є вивчення нової фізики (за допомогою спостереження гамма- та космічних променів і перевірка можливості їх генерації темною матерією), а також пошук та вивчення розмаїття астрофізичних джерел у гамма-діапазоні, включаючи точкові джерела, дифузний фон гамма-випромінювання та гамма-спалахи. Окрім основного інструмента, гамма-телескопа з робочим діапазоном 100 МеВ–3 ТеВ, ГАММА-400 також міститиме монітор гамма-спалахів KONUS-FG, що працюватиме в діапазоні 10 кеВ–10 МеВ [6], та систему навігації, яка визначатиме напрямки спостереження ГАММА-400 з точністю до 5'' [22]. Запуск місії заплановано на 2018 рік. Передбачається, що мінімальна тривалість роботи на орбіті буде 7 років [22, 23]. Обсерваторію ГАММА-400 запустять на сильно витягнуту еліптичну орбіту з максимальною та мінімальною відстанями до Землі 300 000 та 500 км із кутом нахилу орбіти 51.8° . Приблизно через півроку перебування на цій орбіті ГАММА-400 повністю вийде за межі радіаційних поясів та перейде на приблизно кругову орбіту з радіусом 150 000 км [23].

У праці [23] описано декілька основних поліпшень

для телескопа ГАММА-400 в порівнянні з гамма-телескопом космічної обсерваторії імені Е. Фермі:

- Набагато краща ($\sim 1\%$ на енергії ≥ 100 GeV порівняно з $\sim 10\%$ для космічної обсерваторії імені Е. Фермі) спектральна роздільна здатність на енергіях вище ~ 0.5 GeV, яка буде досягнута за допомогою калориметрів більшої товщини.
- Ліпша кутова роздільна здатність на енергіях ≥ 5 GeV, особливо в області високих енергій ($\sim 0.01^\circ$ на ≥ 100 GeV порівняно з $\sim 0.1^\circ$ для космічної обсерваторії імені Е. Фермі), що дозволить краще визначити положення яскравих джерел у цій області енергій.
- Кращий ступінь ідентифікації протонів ($\sim 10^6$ порівняно з $\sim 10^4$ для космічної обсерваторії імені Е. Фермі) дасть змогу спектри космічних електронів з енергіями в GeV-діапазоні вищої якості, і тому краще дослідити природу надлишку позитрон-електронного відношення, що спостерігається на енергіях, вищих за декілька GeV (див., наприклад, працю [27] та посилання в ній).

Такі властивості інструментів дозволять досягнути основних наукових цілей, заявлених на офіційному веб-сайті інструмента та у [22]:

1. Пошук нових та вивчення відомих галактичних і позагалактичних джерел гамма-випромінювання високих енергій: залишків наднових, пульсарів, подвійних систем з акрецією, включаючи мікроквасари, активних ядер галактик, включно з квазарами та блазарами, визначення їхніх потоків і спектрів.
2. Дослідження неідентифікованих джерел гамма-випромінювання (які наразі становлять третину від повного числа джерел [14]), зокрема й детальне вивчення області центра Галактики.
3. Моніторинг кривих блиску та спектральної змінності гамма-транзєнтів.
4. Спостереження гамма-спалахів в інтервалі 10 keV–10 MeV (використовуючи монітор KONUS-FG) та в GeV-ному діапазоні енергій.
5. Вимірювання спектрів галактичного та позагалактичного дифузного випромінювання, пошук вузьких ліній у спектрах точкових і дифузних джерел, зокрема від розпаду або анігіляції темної матерії.
6. Детектування повного потоку електронів і позитронів на енергіях ≥ 1 GeV, пошук вузьких ліній, зокрема від розпаду або анігіляції темної матерії.
7. Вимірювання потоків галактичних космічних променів від легких ядер до елементів групи заліза.

8. Вимірювання потоків гамма-променів, електронів і позитронів від спалахів на Сонці.

Серед указаних наукових цілей є декілька, до яких українські наукові групи можуть додати суттєвий до рибок. Відповідні цілі та можливі наукові задачі докладно описано нижче.

С. НАПРЯМИ ГАММА-АСТРОНОМІЇ, У ЯКИХ ПРАЦЮЮТЬ УКРАЇНСЬКІ ВЧЕНІ

1. Темна матерія

Визначення природи темної матерії є одним із найважливіших поточних наукових завдань в астрофізиці та фізиці частинок. Жодна з відкритих наразі частинок, які описуються Стандартною моделлю фізики частинок, не може пояснити спостережувані параметри темної матерії. Таким чином, наявність частинки темної матерії потребує узагальнення Стандартної моделі, що має привести до відкриття нової фізики. На сьогодні є багато розширень Стандартної моделі, які містять частинку-кандидат на роль темної матерії. Наявні моделі передбачають, що повинні спостерігатися вузькі фотонні лінії, які утворюються внаслідок розпаду або анігіляції частинок темної матерії. Популярність таких моделей останнім часом зросла внаслідок нещодавнього детектування вузької лінії-кандидата на енергії близько 130 GeV від області поряд із центром Галактики. Незважаючи на можливість пояснити ці спостереження за допомогою неврахованих джерел систематики чи випромінюванням від астрофізичних об'єктів (зокрема ультрарелятивістського холодного пульсарного вітру), цей результат викликав появу значної кількості робіт, які розглядають різні моделі темної матерії як джерело вказаної лінії. Низька значущість сигналу (близько 4σ) не дозволяє ані розрізнити між різними сценаріями появи лінії, ані між різними моделями темної матерії (у випадку, якщо вказана лінія формується внаслідок розпаду темної матерії). Це зумовлює велике зацікавлення науковців гамма-телескопа ГАММА-400 і майбутніми космічними місіями, які матимуть змогу побачити вказану лінію з більшою значущістю.

2. Ядра активних галактик

Блазари становлять понад половину об'єктів, зарєстрованих на енергіях вище 0.1 GeV. Існує нерозв'язана проблема, пов'язана із суперечностями між спостереженнями змінності цих джерел та моделями їхніх центральних частин. Гамма-промені GeV-них і TeV-них енергій взаємодіють із фотонами інфрачервоного й оптичного діапазонів, поглинаючись при цьому. Тому виявлення великої кількості блазарів у цих діапазонах свідчить про те, що гамма-випромінювання

виникає за межами областей із великою концентрацією таких фотонів, тобто за межами області широкіх емісійних ліній. При цьому спостереження швидкої змінності цих джерел указують на те, що джерело гамма-променів дуже компактне і отже, скоріше за все, розташоване дуже близько до центральної чорної діри. Ця проблема досі не розв'язана.

Іншим цікавим результатом гамма-астрономії за останні роки став доказ існування міжгалактичних магнітних полів. Упродовж тривалого часу різноманітними теоретичними моделями передбачалося існування таких полів. Уважалося, що вони стали зародковими полями для динамомеханізму, який уже привів до утворення магнітних полів галактик та їхніх скупчень, які ми спостерігаємо тепер. Через свою надзвичайно малу напруженість ці поля не були виявлені за допомогою спостережень ефектів зееманівського розщеплення чи фарадеївського обертання. Натомість, гамма-спостереження у деяких випадках виявилися чутливими до дуже малих відхилень випромінюючих часток від їхніх початкових траєкторій, таким чином даючи можливість реєструвати магнітні поля аж до 10^{-20} Гс. Саме такі спостереження й надали перші докази існування міжгалактичних магнітних полів із напруженістю $> 10^{-17}$ Гс.

3. Гамма-спалахи

Однією з найцікавіших спостережних особливостей гамма-спалахів є генерація ними фотонів GeV-ного діапазону електромагнітного спектра. Вони вперше були зареєстровані детектором BATSE на борту космічної гамма-обсерваторії імені А. Комптона і продовжують досліджуватися від 2008 року детектором LAT космічного гамма-телескопа імені Е. Фермі. З'ясовано, що це випромінювання характеризує пекулярну активність гамма-спалахів та певною мірою корелює з випромінюванням у MeV-ному діапазоні. Аналіз спектра показав, що спектральні характеристики GeV-ного випромінювання не є універсальними та можуть суттєво відрізнятися для різних гамма-спалахів.

Пояснення наявності GeV-ного компонента у спектрах гамма-спалахів є однією з найскладніших проблем у побудові теоретичних моделей цих об'єктів. На сьогодні немає загальноприйнятої теорії, яка б пояснювала це випромінювання. Кореляція GeV-ного випромінювання з MeV-ним може свідчити про їхнє подібне походження та спільне джерело, яким скоріше за все є внутрішні ударні хвилі. Проте існують експериментальні вказівки на те, що це випромінювання може походити також і від зовнішніх ударних хвиль, які відповідають за післясвічення гамма-спалахів.

4. Залишки наднових зір

Наявність нетеплового компонента в рентгенівському спектрі залишків наднових зір (ЗН), що є наслідком синхротронного випромінювання релятивіс-

тських електронів, свідчить про прискорення електронного компонента космічних променів на фронтах ударних хвиль у цих об'єктах до енергій $\sim 30 \div 300$ TeV. Електрони з цими ж енергіями повинні випромінювати також у гамма-діапазоні (шляхом оберненого ефекту Комптона). Протонний компонент космічних променів породжує лише гамма-фотони; вони генеруються під час розпаду піонів, народжених зіткненнями протонів, прискорених до енергій у десятки PeV, з протонами-мішенями теплових енергій. Тому гамма-діапазон є ключовим для вивчення багатьох процесів, пов'язаних із генерацією та поширенням космічних променів.

Залишки наднових є одними з пріоритетних об'єктів спостережень орбітальною гамма-обсерваторією імені Е. Фермі та наземними експериментами (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS та ін.) зі спостереження черенковського випромінювання, яке виникає в атмосфері внаслідок взаємодій наджорстких гамма-фотонів. Проте досі все ще відкрите питання про те, випромінювання яких саме часток, електронів чи протонів, домінує в гамма-діапазоні. І якщо спектральні властивості гамма-випромінювання залишків наднових зір вивчають досить широко, то карти поверхневого розподілу яскравості, які є багатими на експериментальну інформацію, починають аналізувати лише останніми роками. Це пов'язано передусім із недостатньою роздільною здатністю телескопів, які працюють сьогодні в гамма-діапазоні.

5. Змінні галактичні джерела

Існує клас об'єктів, для спостереження яких не обов'язково мати чутливість, порівняну із чутливістю попередника ГАММА-400, супутника імені Е. Фермі (очікується близько $2 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для 5σ детектування точкового джерела на енергіях, вищих за 100 MeV на 2018 р.). Такими об'єктами є змінні і транзйентні джерела. Детальна природа гамма-випромінювання від багатьох із них досі остаточно не встановлена. Її активно обговорюють у літературі. Для її з'ясування потрібна не лише велика загальна експозиція джерела, але і його спостереження у вибраній час — протягом спалаху, під час якого потік від джерела може збільшуватись у десятки разів. Об'єднуючи для змінних джерел результати, що можуть бути отримані ГАММА-400 вже на початку своєї роботи, з наявними даними EGRET й імені Е. Фермі, можна досягти значних результатів для з'ясування механізмів випромінювання цих джерел. Завдяки великому полю зору й чутливості, порівняній з чутливістю імені Е. Фермі, ГАММА-400 є ідеальним приладом для спостереження відомих змінних, транзйентних, а також гамма-джерел, що повільно змінюють свої характеристики (наприклад подвійна система LSI +61 303, див. нижче, має суперорбітальний період 4.6 року).

II. ТЕМНА МАТЕРІЯ

A. ПОШУК ВУЗЬКИХ ГАММА-ЛІНІЙ ВІД ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

Не зважаючи на те, що темна матерія¹ становить значну частину густини матерії у Всесвіті [30–35], її складники досі ще невідомі. Основною гіпотезою є припущення про те, що вона складається з елементарних частинок². Частка баріонної темної матерії сильно обмежена експериментами з мікролінзування, які перевіряють наявність масивних компактних об'єктів гало (див., наприклад, роботу [37] та посилання в ній) та результатами первинного нуклеосинтезу [38]. Лівокіральні нейтрино, єдині масивні, електрично нейтральні частинки з космологічним віком життя, не можуть бути основною частиною темної матерії, оскільки вони занадто легкі для формування гало галактичних масштабів або для формування гало з великими значеннями фазової густини [39, 40] і мають великі початкові швидкості [41–44]. Таким чином, підтвердження існування частинок темної матерії буде дуже важливим для розуміння фізики елементарних частинок за межами Стандартної моделі (див. зокрема [45] для її детального огляду).

Багато розширень Стандартної моделі мають частинку-кандидат на роль темної матерії (див., зокрема, огляди [46–48]), з масами та константами взаємодії з частинками Стандартної моделі, які змінюються на десятки порядків. Наприклад, якщо їхня сила взаємодії є близькою до електрослабкого масштабу і їхня маса перебуває в діапазоні від десятків GeV до декількох TeV (так звані *слабковзаємодіючі масивні частинки*, або ВІМПи, від англ. абревіатури WIMP — weakly interacting massive particle), то вони могли виникнути в необхідній кількості в ранньому Всесвіті [49]. Для забезпечення своєї космологічної тривалості життя ВІМПи не можуть розпадатися, тому основним джерелом їх перетворення в частинки Стандартної моделі є їх анігіляція. З іншого боку, ця властивість ВІМПів є природною для розширень Стандартної моделі, що мають додаткове квантове число, яке зберігається, таке, як R-парність (для суперсиметричних частинок-кандидатів на роль темної матерії, таких, як найлегша частинка-суперпартнер [50, 51]) або квантове число Калуці–Кляйна (для найлегших частинок Калуці–Кляйна [52]). Якщо сила взаємодії частинок темної матерії є на багато порядків нижчою за масштаб електрослабкої взаємодії, тоді вони можуть стати космологічно стійкими щодо їх розпаду. Такі частинки (названі *супер-ВІМПами*, див. зокрема [53]) природно з'являються в багатьох розширеннях Стандартної моделі з правокіральною нейтрино [54–62],

суперсиметричних теоріях [53, 63–65], моделях із додатковими вимірами [53], розширеннями Стандартної моделі, мотивованими теорією струн [66], тощо.

Важлива відмінність між випадками анігіляції та розпаду темної матерії полягає в *кутовому розподілі* спостережуваного сигналу. Наприклад, потік частинок (у фотонах/(см² × сек)) від *2-частинкового радіаційного розпаду* $DM \rightarrow \gamma + \nu$ або $DM \rightarrow \gamma + \gamma$ дорівнює (див., наприклад [67, 68])

$$F_{DM} = \frac{\Gamma_{\gamma} N_{\gamma} \Omega}{4\pi m_{DM}} \mathcal{S}_{DM}, \quad (1)$$

де Γ_{γ} — швидкість радіаційного розпаду темної матерії, N_{γ} — кількість фотонів (1 або 2) на 1 частинку темної матерії, m_{DM} — маса частинки, $\mathcal{S}_{DM} = \int_{l.o.s.} \rho_{DM}(l) dl$ стовпчикова густина темної матерії, усереднена в межах тілесного кута Ω . У випадку анігіляції темної матерії очікуваний сигнал пропорційний до $\mathcal{I}_{DM} = \int_{l.o.s.} \rho_{DM}^2(l) dl$ унаслідок двох частинок, необхідних для анігіляції. Це приводить до трьох найважливіших відмінностей між просторовим розподілом гамма-випромінювання від розпаду та анігіляції темної матерії:

1. У випадку анігіляції найбільший сигнал на одиницю тілесного кута приходить від близьких об'єктів із найбільшим значенням просторової густини темної матерії, таких, як центральна частина гало Галактики або її субгало. Натомість, для темної матерії, що розпадається, сигнал дуже повільно змінюється з масою об'єкта, у якому домінує темна матерія [69, 70]; тобто велика кількість астрофізичних об'єктів різної природи матиме зіставну інтенсивність розпаду темної матерії [69–71], див. рис. 1.
2. Просторовий розподіл випромінювання від анігіляції темної матерії виявляється концентрованим щодо центра гало, де густина темної матерії є найбільшою, див., наприклад, рис. 15 у роботі [72]. Для нашої Галактики динаміка внутрішніх областей гало темної матерії визначається розподілом світної речовини, що спричиняє велику невизначеність у параметрах розподілу темної матерії.
3. Для анігіляції темної матерії ефект її скупчення на малих просторових масштабах приводить до появи додаткового підвищення рівня сигналу, яке описується значенням “буст-фактора” $\langle \rho^2 \rangle / \langle \rho \rangle^2$. Величина “буст-фактора” є сильно невизначеною, див., наприклад, роботи [73–75].

¹Хоча може здаватися, що деякі альтернативи темної матерії, такі як модифікована ньютонівська динаміка (МОНД) [28], можуть забезпечити природніше пояснення деяких спостережень, гіпотеза темної матерії залишається основною, оскільки вона самоузгоджено пояснює всі наявні спостереження, див., зокрема, огляд [29, 35].

²Хоч існують і більш екзотичні ідеї, такі, як первинні чорні діри [36].

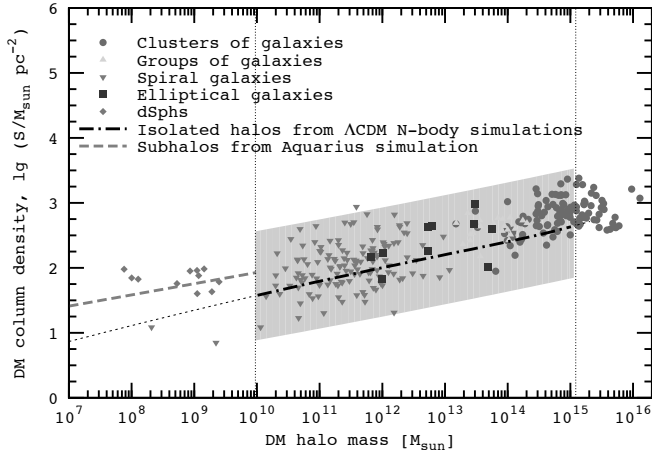


Рис. 1. (Кольоровий онлайн) Значення стовпкової густини \mathcal{S} , усередненої за характерним радіусом гало, як функція маси гало M_{halo} , отримана в роботі [70]. Для різних класів об'єктів, домінованих темною матерією, максимальні значення \mathcal{S} змінюються в межах одного порядку величини [69–71].

В. ЛІНІЄПОДІБНІ СТРУКТУРИ В ГАММА-ДІАПАЗОНІ: ЛІНІЙ-КАНДИДАТИ ВІД ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ?

І ВІМПи, і супер-ВІМПи можуть бути джерелами вузьких ліній, зокрема в гамма-діапазоні. Значний інтерес до вивчення вузьких ліній у гамма-діапазоні від розпаду чи анігіляції темної матерії спалахнув після нещодавніх тверджень про спостереження (на рівні $3\text{--}5\sigma$) додаткового компонента випромінювання у формі вузької лінії на енергії близько 130 GeV із центральної області Галактики за допомогою гамма-телескопа космічної обсерваторії імені Е. Фермі [76–79]. Автори цих праць припускають, що спостережуваний сигнал приходить від анігіляції темної матерії.

Існування такого додаткового компонента випромінювання активно обговорюють (включно з негативним результатом, заявленим колаборацією обсерваторії імені Е. Фермі [80]), див. роботи [?, 81–83]. У праці [84] показано, що, окрім надлишку на енергіях 120–140 GeV в околі центра Галактики, спостерігаються також інші просторові області з аналогічними надлишками на інших енергіях. Крім того, не можна виключити можливість, що вказані надлишки мають астрофізичне походження. Зокрема, в роботі [85] продемонстровано, що спостережувані лінійні особливості у спектрі можуть бути пояснені оберненим комптонівським випромінюванням від холодного ультрарелятивістського електрон-позитронного пульсарного вітру.

На сьогодні, кількість спостережуваних фотонів у надлишку (~ 15) є замалим для аналізу його просторового розподілу, хоча спостережуваний розподіл цих фотонів не подібний на однорідний (у роботі [85] імовірність однорідного розподілу оцінюється в $\sim 7\%$); потрібні додаткові спостереження цієї області. Детектування точкових джерел указуватиме на користь ас-

трофізичного пояснення [85], тоді як детектування дифузного розподілу одночасно з відсутністю спостережуваного дифузного випромінювання від інших областей у площині Галактики (описаних у праці [84]) буде аргументом на користь гіпотези темної матерії.

С. ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ ГАММА-400

Вивчення природи ліній у гамма-діапазоні від розпаду або анігіляції темної матерії є однією з основних задач наукової програми ГАММА-400. Завдяки його хорошій спектральній роздільній здатності, порівняно з наявними інструментами, ГАММА-400 має отримати інформацію про природу ліній-кандидата на енергії 130 GeV. Відповідно до нещодавнього дослідження [86], ГАММА-400 здатний не лише задетектувати цю лінію (з уп'ятеро вищою достовірністю), але й допомогти у виборі між декількома моделями її походження.

Область в околі центра Галактики з лінійно-кандидатом на енергіях 120–140 GeV та інші області, зазначені в роботі [84], є цікавими для спостережень на ГАММА-400. Повний потік в інтервалі енергій 120–140 GeV від околу центра Галактики оцінюється як $2.7 \cdot 10^{-10}$ фотонів/см²/сек, або $\sim 1.7 \cdot 10^{-6}$ фотонів/сек для ГАММА-400. Отже, достатню статистику (100 фотонів) можна отримати протягом 1.9 року постійного спостереження цієї області.

ІІІ. ШВИДКА ЗМІННІСТЬ БЛАЗАРІВ

А. ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ БЛАЗАРІВ

Активні ядра галактик (АЯГ) є відомими потужними джерелами електромагнітного випромінювання в усіх діапазонах, і гамма-промені GeV-них енергій не є винятком. Понад половину джерел, зареєстрованих у діапазоні енергій від 100 MeV до 100 GeV, належить до АЯГ ([14]). Більшість із них становлять блазари, що є підкласом АЯГ, у яких джет орієнтований уздовж променя зору. Хоча вони є серед найпотужніших джерел гамма-випромінювання, походження цього випромінювання для блазарів не є достеменно відомим.

Високоенергетичні гамма-кванти взаємодіють із фоновими фотонами нижчих енергій, що спричиняє їх поглинання й утворення e^+e^- -пар. Якщо гамма-промені випромінюються в місці, де концентрація фонових фотонів досить висока, це повинно приводити до повного поглинання початкових гамма-квантів, тобто робити таку область непрозорою для високоенергетичного випромінювання. Стосовно до блазарів ця ситуація була описана в роботі [87], де автори вказали на те, що область широких емісійних ліній містить достатню кількість низькоенергетичних фотонів, щоб повністю поглинути випромінювання з енергіями вище кількох десятків GeV. Таким чином, виявлення цих джерел на енергіях до кількох сотень

GeV свідчить про те, що гамма-випромінювання виникає в джеті далеко за областю широких емісійних ліній, можливо, на відстані в кілька парсек від центральної надмасивної чорної діри.

Цікаве відкриття зробили команди, що працюють із атмосферними черенковськими телескопами. Ці інструменти спостерігають небо на енергіях фотонів від 100 GeV до кількох TeV, і факт того, що вони зареєстрували випромінювання від блазарів, говорив на користь того, що гамма-випромінювання останніх виникає в місцях із малою концентрацією фонових фотонів, тобто в ділянках джета за межами області широких емісійних ліній. Але спостереження за допомогою телескопів H.E.S.S. [88] та MAGIC [89] виявили, що деякі блазари є сильно-змінними на масштабах часу в кілька хвилин. Ці спостереження вказують на те, що область випромінювання гамма-променів є досить компактною, порівняно з розміром центральної чорної діри. Якщо ж випромінювання справді виникає за межами області широких емісійних ліній, то такої компактності важко досягти, бо вона потребує великих Лоренц-факторів, значно більших за ті, що спостерігаються в цих джерелах. З іншого боку, якщо випромінювання виникає поблизу центральної чорної діри, то проблема компактності зникає, залишаючи натомість питання з концентрацією фонових низькоенергетичних фотонів. Альтернативні пояснення, у яких гамма-промені виникають за межами області широких емісійних ліній, зазвичай використовують ідею дуже компактних випромінювальних областей, що вкладені у значно більший джет [90–93]. Подальші дослідження в GeV-ному діапазоні за допомогою гамма-телескопа LAT на борту обсерваторії імені Е. Фермі [12] виявили, що велика кількість блазарів є змінною на масштабах до кількох годин і, можливо, навіть менше [94–96]. Ці дослідження, які в основному концентруються на найбільш яскравих і змінних джерелах, указують, що подібна швидка змінність є не винятком, а скоріше звичайним явищем серед блазарів.

Нещодавно ретельний аналіз форми спектрів блазарів надав ще один аргумент на користь випромінювання гамма-квантів саме в околицях центральної чорної діри. Як було зазначено в [87], на форму спектрів блазарів у мульти-GeV-ному діапазоні може впливати поглинання на фонових фотонах, якщо гамма-промені випромінюються всередині області широких емісійних ліній. Спостереження за допомогою гамма-телескопа LAT чітко вказали на те, що спектри значної частини блазарів не є степеневими, а часто мають злам. Енергія, на якій відбувається цей перелом, та його крутизна добре узгоджуються з передбаченням моделей, у яких гамма-промені виникають усередині області широких емісійних ліній [97]. Подальший аналіз залежності енергії перелому від потоку, проведений для блазара 3C 454.3, указав на те, що місце випромінювання гамма-квантів є поблизу краю сильно-йонізованої частини області широких емісійних ліній [98].

Загалом, це демонструє суттєві проблеми з локаліза-

цією джерела гамма-випромінювання блазарів: з одного боку, вже сам факт реєстрації випромінювання від них на енергіях вище кількох десятків GeV свідчить про те, що випромінювання виникає за межами області широких емісійних ліній, а з іншого боку зареєстровану швидку змінність цих джерел можна краще пояснити припущенням, що гамма-промені виникають поблизу центральної чорної діри, можливо, всередині області, де формуються лінії.

Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми був би збір детальної інформації про змінність на малих часових масштабах для великої кількості блазарів. Справді, якщо гамма-промені виникають поблизу центральної чорної діри, то природно було б очікувати, що мінімальний масштаб змінності буде продиктований розміром останньої, тоді як в іншому випадку, якщо випромінювання виникає в джеті далеко від центра, де вже втрачено зв'язок із масштабом чорної діри, не має бути ніякої кореляції між мінімальним масштабом змінності й розміром останньої. Отже, щоб розрізнити ці два випадки, слід порівняти розміри центральних чорних дір та мінімальні часові масштаби змінності для великої кількості блазарів та перевірити, чи немає між ними кореляції.

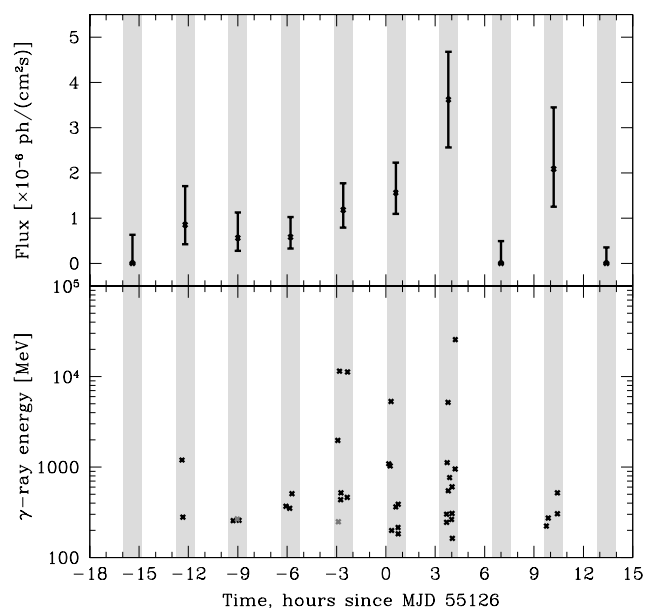


Рис. 2. Ілюстрація обмеженості телескопа LAT на борту космічної обсерваторії імені Е. Фермі щодо пошуку швидкої змінності — крива блиску блазара OJ 287. На верхній панелі подано криву блиску найяскравішого епізоду спаляху в жовтні–листопаді 2009-го року в гамма-променях з енергією $E > 0.1$ GeV. На нижній панелі подано енергії та часи приходу окремих гамма-квантів від блазара (чорні точки) та від фону (сірі точки). Вертикальні сірі смуги позначають інтервали часу, коли блазар був у полі зору телескопа LAT. Джерело: [96].

Подібний аналіз потребує систематичного спостереження значної кількості блазарів у GeV–TeV-ному діапазоні. Проте спостереження мають бути не лише систематичними, а й повинні виявляти змінність на

достатньо малих часових масштабах. Для чорних дір масою $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$ відповідні масштаби відповідають часові перетину світлом розміру чорної діри; вони лежать у межах $10^2 - 10^5$ секунд, що й визначає необхідний рівень точності спостережень. Природно очікувати, що найкращими моментами для пошуку швидкої змінності є епізоди спалахів обраних для аналізу блазарів, які для різних блазарів можуть тривати від днів до місяців. Телескоп LAT видається цілком придатним для такого типу спостережень, оскільки він весь час сканує все небо й постійно спостерігає всі доступні джерела. Будучи і справді добре пристосованим до детектування спалахів, LAT усе ж має суттєвий недолік. Оскільки він сканує все небо, то для кожного окремо взятого джерела є періодичні провали у спостереженнях, коли телескоп був направлений в інший бік. Окрім того, коли телескоп не направлений точно на об'єкт, ефективна площа суттєво зменшується, обмежуючи найменший часовий масштаб змінності, який є доступним для реєстрації. Приклад такого обмеження подано на рис. 2, з якого видно, як потік спостережуваного джерела істотно змінювався поміж послідовними наведеннями телескопа, таким чином дозволивши встановити лише верхню межу на часовий масштаб змінності.

В. ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ ГАММА-400

Згадані вище ускладнення роблять комбінацію скануючого все небо інструмента та окремого телескопа для спостереження обраних джерел бажаним вибором для спостережень швидкої змінності блиску блазарів. Якщо космічна обсерваторія імені Е. Фермі ще працюватиме після запуску ГАММА-400, то вона зможе зіграти роль інструмента, здатного оперативно повідомляти про нові спалахи блазарів, тоді як ГАММА-400 спостерігав би найцікавіші з них. Режим спостережень ГАММА-400, який передбачає неперервне спостереження об'єкта, є ключовим для отримання детальних кривих блиску, необхідних для точного виміру мінімальних часових масштабів змінності цих джерел.

Іншою перевагою ГАММА-400 над LAT є краща кутова роздільна здатність: на енергії 100 МеВ вона становить $1-2^{\circ}$ для ГАММА-400 [22] і 10° для LAT³. Оскільки LAT тепер спостерігає близько 1000 АЯГ у гамма-діапазоні [14], то середня відстань між ними становить $6-7^{\circ}$. Таким чином, висока роздільна здатність ГАММА-400 дасть змогу значно зменшити кількість випадків, коли зображення окремих об'єктів перетинаються, дозволивши, таким чином, точніші вимірювання потоків від близько розташованих джерел. Це також дасть змогу значно (у 25–100 разів) зменшити потік від фону для окремого джерела, зменшуючи похибки вимірів його потоку.

Навіть за відсутності такої кооперації між цими двома інструментами спостереження ГАММА-400 можуть відіграти ключову роль у розв'язанні питання про розташування зони випромінювання гамма-квантів у блазарів, що сприятиме розумінню їхньої будови.

IV. ВИМІРЮВАННЯ МІЖГАЛАКТИЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

А. МІЖГАЛАКТИЧНІ МАГНІТНІ ПОЛЯ ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Питання про сильні міжгалактичні магнітні поля тісно пов'язане із проблемою появи $1-10$ мкГс магнітних полів у галактиках та їх сукупченнях. Вважаю, що останні виникли в результаті підсилення деякого, набагато слабшого, зародкового поля. Походження цього поля достеменно невідоме, але можна виділити два широкі класи моделей: астрофізичні моделі, які пов'язують виникнення поля з потоками в молодих галактиках чи навіть протогалактиках, і космологічні моделі, які передбачають виникнення магнітного поля в ранньому Всесвіті (див. [99–102] для огляду). У випадку астрофізичної природи зародкового поля очікується, що воно сконцентроване поблизу галактик і сукупчень і не поширюється в пустоти великомасштабної структури. Магнітні поля, передбачені космологічними моделями, навпаки, мають заповнювати весь Всесвіт, тобто бути справді міжгалактичними.

Нещодавні дослідження [103–107] із використанням спостережень далеких блазарів у гамма-діапазоні виявили наявність міжгалактичних магнітних полів у порожнинах та встановили нижню межу їх напруженості на рівні $10^{-17} - 10^{-15}$ Гс (див. рис. 3). Ці спостереження розглядають як сильний аргумент на користь космологічної природи зародкових магнітних полів. Проте, деякі автори показали, що на малих червоних зміщеннях галактики можуть створювати сильні викиди матерії, пов'язані з АЯГ чи активним зореутворенням [108, 109]. Такі викиди несуть зі собою магнітні поля й можуть принести магнітне поле в порожнини. Хоча відсоток об'єму Всесвіту, який можуть заповнити такі викиди, поки не відомий. Природа спостережуваного міжгалактичного магнітного поля і далі неясна.

Ці дослідження базуються на порівнянні потоків від джерела в ГеВ-ному та ТеВ-ному діапазонах. Гамма-промені ТеВ-них енергій поглинаються на шляху до спостерігача внаслідок взаємодії з міжгалактичним фоновим світлом. Це приводить до утворення енергетичних e^+e^- -пар та до подальшого розвитку електромагнітного каскаду в міжгалактичному просторі і, як результат, до випромінювання вторинних фотонів нижчих, ГеВ-них енергій. Магнітне поле,

³http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm

свою чергою, відхиляє електрони й позитрони від своїх початкових траєкторій. Як наслідок, видимий потік та форма спектра каскадного компонента залежать від магнітного поля, що наявне в місці розвитку каскаду [110, 111].

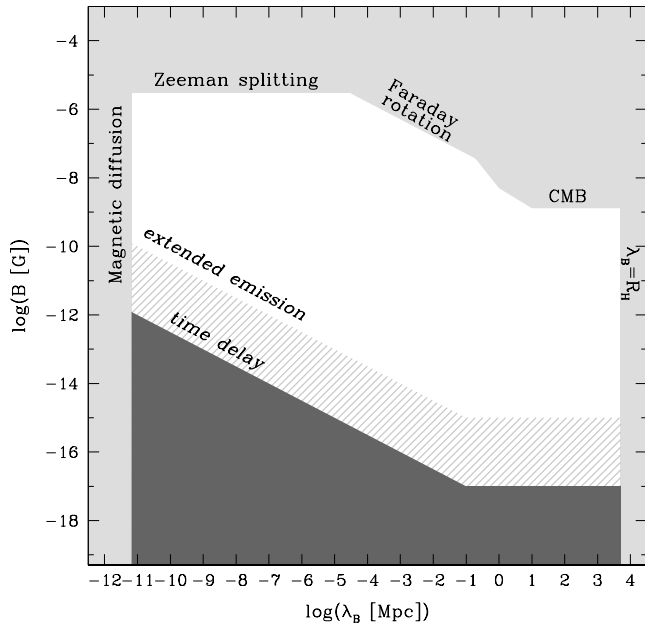


Рис. 3. Обмеження на напруженість магнітного поля, отримані аналізом одночасних GeV–TeV-них спостережень блазарів [106]. Область, заштрихована сірим, виключена на основі припущення про незмінність TeV-ного потоку від досліджуваних джерел, тоді як область, залита суцільним сірим кольором, виключається, якщо це припущення не виконується. Голуба область позначає відомі обмеження на напруженість магнітного поля B та його кореляційний масштаб λ_B .

Інтенсивність спостережуваного потоку каскадного компонента насправді залежить не лише від конфігурації магнітного поля, а й від густини фонового випромінювання. Згадані вище обмеження на міжгалактичне магнітне поле отримані в певному припущенні про концентрацію міжгалактичних фонових фотонів. І навпаки, обмеження на кількість і спектр міжгалактичного фонового світла, що отримуються зі спостережень блазарів у GeV-ному та TeV-ному діапазонах, містять у собі певні припущення про параметри магнітного поля. Нещодавно опубліковані обмеження на комбінацію цих двох величин [107], що дозволило отримати більш модельно-незалежну оцінку напруженості магнітного поля.

За наявності магнітного поля електрони й позитрони відхиляються від своїх початкових траєкторій, створюючи три спостережувані ефекти: (1) частинки, що рухалися початково в інших напрямках, можуть бути спрямовані до спостерігача, утворюючи таким способом протяжне гало навколо точкового блазара ([112] і посилання там); (2) частинки, що рухалися в напрямку до спостерігача, будуть відхилені в інші напрямки, зменшуючи видимий потік із напрямку на блазар [111, 112]; (3) оскільки випромінювання від га-

ло проходить більший шлях, то це створює часову затримку між прямим випромінюванням від блазара та його каскадним компонентом [111]. Спостережувану відсутність каскадного компонента можна пояснити або тим фактом, що розмір гало набагато більший за інструментальний розмір зображення блазара (як це було припущено в [103–105]), або ж бути наслідком того, що часова затримка, зумовлена магнітним полем, більша від тривалості спостережень (як це було припущено в [106, 107]).

В. ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ ГАММА-400

Комбінація другого та третього ефектів, згаданих у попередньому розділі, уже була успішно використана для встановлення обмежень на напруженість міжгалактичних магнітних полів [103–107].

Сильною стороною ГАММА-400 повинна стати його кутова роздільна здатність, завдяки якій він збиратиме менше фонового випромінювання в розрахунку на одне точкове джерело, і тому отримає кращі, порівняно з LAT, виміри потоку. Оскільки зображення каскадного компонента за наявності магнітного поля є протяжним, а не точковим, спостереження потоків від далеких блазарів, що їх отримає ГАММА-400, міститимуть менше каскадного компонента, даючи змогу точніше виміряти пряме випромінювання. Комбінація спостережень LAT та ГАММА-400 дасть змогу точніше встановити внесок каскадного компонента та поліпшити наявні обмеження чи навіть виміряти напруженість міжгалактичних магнітних полів.

Оскільки відхилення e^+e^- -пар від напрямку на джерело залежить не тільки від напруженості магнітного поля, а й від енергії пар, видимий розмір гало навколо блазарів також залежатиме від енергії, на якій його спостерігатимуть. Для певної напруженості магнітного поля можна вказати енергію, на якій розмір гало зрівняється з роздільною здатністю інструмента. Нижче від цієї енергії каскадний компонент уже не є точковим джерелом для телескопа і дає малий внесок до потоку від точкового блазара, — каскад, фактично, зникає (див. рис. 4 для ілюстрації). Вище ж від цієї енергії каскад можна трактувати як точкове джерело, і видимий потік є сумою випромінювання від каскаду та прямого випромінювання від блазара.

Якщо напруженість міжгалактичного магнітного поля насправді є близькою до раніше отриманого нижнього обмеження, тоді рис. 4 дає оцінку цієї енергії для кількох об'єктів. Вище від цієї енергії, відзначеної вертикальними лініями на рис. 4, випромінювання каскаду є точкоподібним для LAT, але потенційно доступним для розділення за допомогою ГАММА-400. У цьому випадку спостереження, виконані на ГАММА-400, дозволять виміряти кутовий розмір цього компонента й одержати оцінку напруженості міжгалактичного магнітного поля.

Як було згадано вище, за наявності міжгалактичного магнітного поля каскадне випромінювання му- сить приходити із затримкою, визначеною напруже-

ністю поля. ГАММА-400 дасть змогу отримати триваліші криві блиску від ключових для цього дослідження джерел і встановити нові обмеження на цю часову затримку. Отже, і з цього боку можна очікувати уточнення наявних обмежень на міжгалактичне магнітне поле.

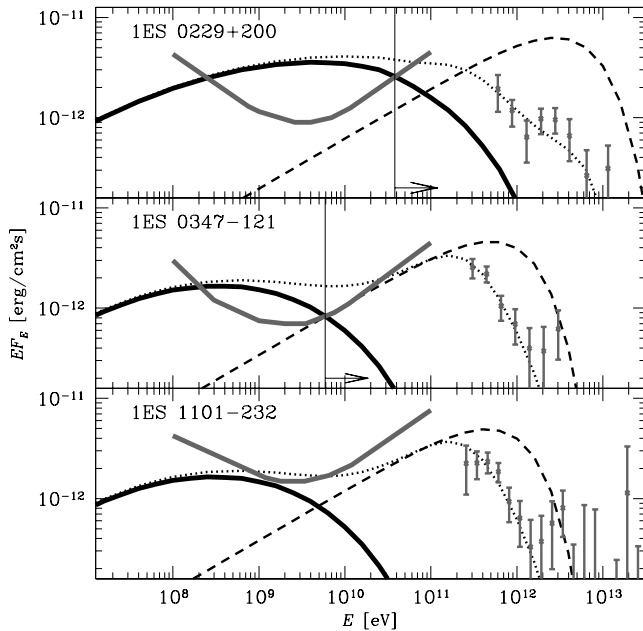


Рис. 4. Порівняння моделей каскадного випромінювання від деяких TeV-них блазарів (товсті суцільні лінії) з верхніми обмеженнями на потік, отриманими за допомогою LAT (сірі криві) та даними телескопа H.E.S.S. (сірі точки). Штриховані криві зображують початкові (до поглинання) спектри джерел. Пунктирними кривими показано сумарний очікуваний спектр разом із внеском електромагнітного каскаду від поглинутих TeV-них фотонів. Вертикальні лінії зі стрілками відзначають енергії, нижче від яких видимий потік від каскаду є меншим, ніж передбачається моделями для нехтовно малого міжгалактичного магнітного поля. Джерело: [103].

Слід зауважити, що подібний аналіз потребуватиме досить тривалих спостережень кількох вибраних об'єктів. Нещодавно опубліковані обмеження на міжгалактичне магнітне поле [107] базуються на трирічному спостереженні спостережень космічної обсерваторії імені Е. Фермі. Однак, результати такої програми спостережень можуть значно розширити наші знання про природу міжгалактичних магнітних полів.

V. ГАММА-СПАЛАХИ

Гамма-спалахи були відкриті близько 50-ти років тому. Це яскраві та короточасні спалахи гамма-випромінювання, максимум спектра якого припадає приблизно на 1 MeV з тривалістю спалаху від часток секунди до сотень секунд [113]. Гамма-спалахи є одними з перших зафіксованих позаземних джерел гамма-випромінювання. Проте дотепер немає чіткого

розуміння фізичної природи джерел цього випромінювання.

Основне гамма-випромінювання від гамма-спалахів супроводжується тривалим (від днів до місяців) післясвіченням, яке вперше зафіксував супутник ВерроSAX [114]. Післясвічення гамма-спалахів досліджують у широкому спектрі електромагнітного випромінювання — від радіо до рентгену за допомогою чутливих наземних та космічних інструментів. Відкриття великих червоних зміщень у спектрах післясвічень гамма-спалахів дало змогу з'ясувати, що більшість гамма-спалахів перебувають на космологічних відстанях: від 100 Мпк до 4 Гпк (з найбільшим червоним зміщенням 8.1 [115]). На таких великих відстанях світність ізотропних джерел гамма-спалахів має бути близько 10^{53} ерг/сек, що відповідає виділенню за секунду енергії, яка дорівнює енергії спокою маси, що дорівнює масі Сонця. Це наводить на думку, що джерело енергії гамма-спалахів скоріше за все має гравітаційну природу й серед можливих варіантів є: колапс зоряних ядер, злиття компактних об'єктів, припливне руйнування зір надмасивними чорними дірами.

Ще перші спостереження апарата Konus-Wind [6] показали існування двох типів гамма-спалахів залежно від їхньої тривалості, які отримали назву довгих та коротких [116]. Ці висновки були підтверджені на основі даних, які одержав детектор BATSE на борту космічної гамма-обсерваторії ім. А. Комптона [117]. Було з'ясовано, що ці два типи гамма-спалахів мають різні спектральні властивості, зокрема спектр коротких гамма-спалахів є жорсткішим. Отже ці два типи гамма-спалахів мають різних попередників. Виявилось, що довгі гамма-спалахи можуть генеруватися при колапсі масивних зір, який супроводжує спалах наднової зорі [118]; для деяких гамма-спалахів це було підтверджено прямими спостереженнями [119–121]. Природа коротких гамма-спалахів усе ще не відома. Згідно з однією з гіпотез, вони можуть бути пов'язані зі злиттям компактних об'єктів [122]. Деякі ж гамма-спалахи не вкладаються в схему поділу на довгі та короткі спалахи. Для ряду довгих гамма-спалахів було доведено відсутність їх зв'язку зі спалахами наднових зір [123]. Детальне дослідження декількох гамма-спалахів показало наявність наслідків припливного руйнування зорі, що може свідчити на користь такої моделі для пояснення деяких довгих гамма-спалахів [124, 125]. Наявність потужних гамма-спалахів від магнетарів, розташованих у найближчих галактиках, не узгоджується з космологічною природою гамма-спалахів [126].

Мілісекундні зміни блиску, помічені в деяких гамма-спалахах, говорять про те, що процеси, під час яких вивільняється енергія та генерується гамма-випромінювання, проходять у дуже малій області простору. Цей факт свідчить на користь моделі, у якій джерело гамма-спалаху містить непрозорий фаєрбол, який під час розширення досягає ультрарелятивістських швидкостей [7]. Під час розширення фаєрболу відбувається його колімація і фаєрбол перетворюється на релятивістський вузькоколімований

струмінь (хоча сам процес колімації струменя і досі незрозумілий [7]). Гамма-випромінювання не може вийти з фаєрболу, доки він є непрозорим для гамма-променів. Як тільки фаєрбол стає прозорим, фотони з нього вивільнюються, і очікується, що випромінювання його фотосфери матиме квазітепловий спектр [7]. Проте тепловим (або квазітепловим) випромінюванням не можна повністю описати спектр гамма-випромінювання від гамма-спалаху [127]. Наявність у спектрі теплового компонента є дискусійним питанням, бо лише для деяких гамма-спалахів можна більш-менш упевнено говорити про його прямі спостереження [128–130]. Згідно з загальноприйнятою моделлю, внаслідок того, що окремі частини фаєрболу рухаються з різними швидкостями, між ними утворюються внутрішні ударні хвилі, які прискорюють нетеплову популяцію частинок, що генерують синхротронне випромінювання [131]. Незважаючи на те, що синхротронна модель пояснює властивості більшої кількості гамма-спалахів, вона все ж не в змозі пояснити ряд спостережних фактів. Гамма-випромінювання від гамма-спалахів має максимум на 100–1000 keV та степеневий спектр зі зломом [7]. Із припущення про синхротронну природу випромінювання випливає, що спектр нижче максимуму не може бути жорсткішим, ніж $\nu F_\nu = \nu^{4/3}$ [7]. Однак для ряду гамма-спалахів були помічені невідповідності цій особливості спектра у спостереженнях BATSE [132],

Swift/BAT [133] та імені Е. Фермі/GBM [134]. Запропоновано кілька варіантів розв'язку цієї проблеми [129, 135, 136], проте це питання ще потребує додаткового дослідження.

А. ВИПРОМІНЮВАННЯ В ГеВ-НОМУ ДІАПАЗОНІ

1. Спостереження ГеВ-ного випромінювання від гамма-спалахів

Фотони з ГеВ-ними енергіями вперше зареєстрував детектор EGRET на борту космічної гамма-обсерваторії ім. А. Комптона [137]; від 2008 року ці дослідження ведуться телескопом LAT на борту космічної обсерваторії імені Е. Фермі [12]. З'ясовано, що це високоенергетичне випромінювання характеризує пекулярну активність гамма-спалахів та деякою мірою корелює з випромінюванням у МеВ-ному діапазоні під час основного спалаху гамма-випромінювання, але триває в декілька разів довше [138]. Поки що не зрозуміло, чи ця ГеВ-ний компонент належить до основного випромінювання, чи до післясвічення. Енергія, яка міститься в ГеВ-ному випромінюванні, порівняна з енергією в МеВ-ному діапазоні, хоча її внесок може бути різним для різних гамма-спалахів.

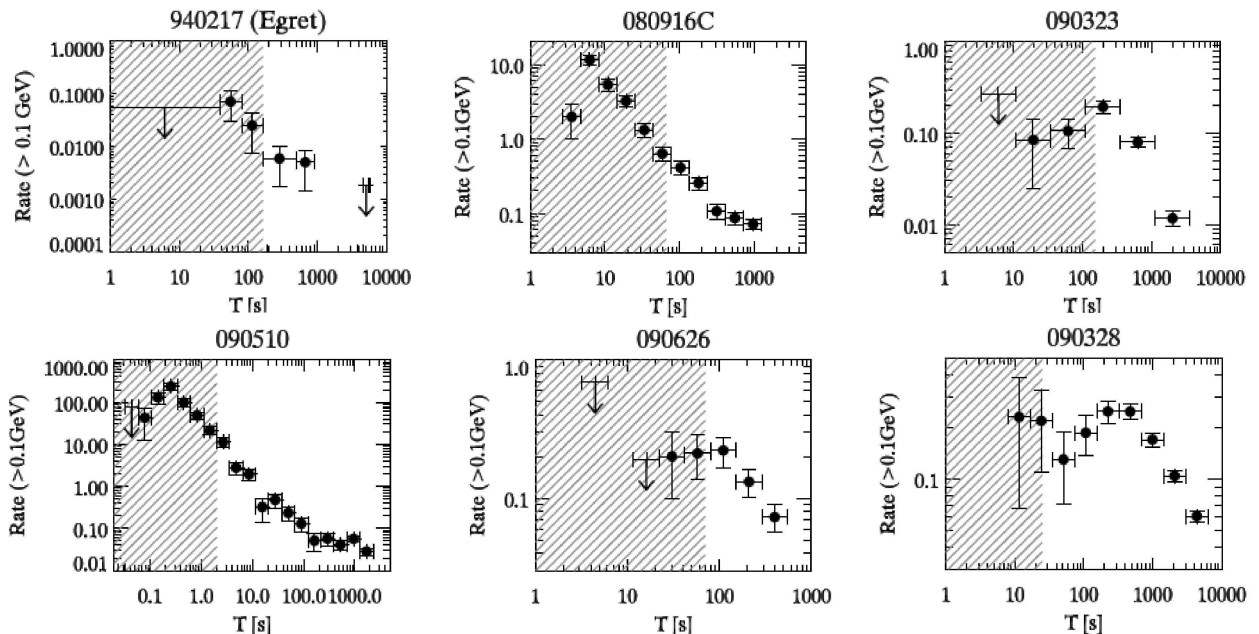


Рис. 5. Криві блиску для 5 гамма-спалахів, зареєстрованих детектором LAT, плюс гамма-спалах GRB 940217, зареєстрований детектором EGRET (верхній лівий малюнок). Заштрихована область відповідає тривалості (T_{90}) спалаху, зареєстрованого детектором GBM у діапазоні енергій 8 keV–40 MeV (для гамма-спалаху GRB 940217 це відповідає випромінюванню, зареєстрованому детектором BATSE). Час виміряно в системі відліку спостерігача для всіх спалахів; стрілки відповідають області вище 2σ [139].

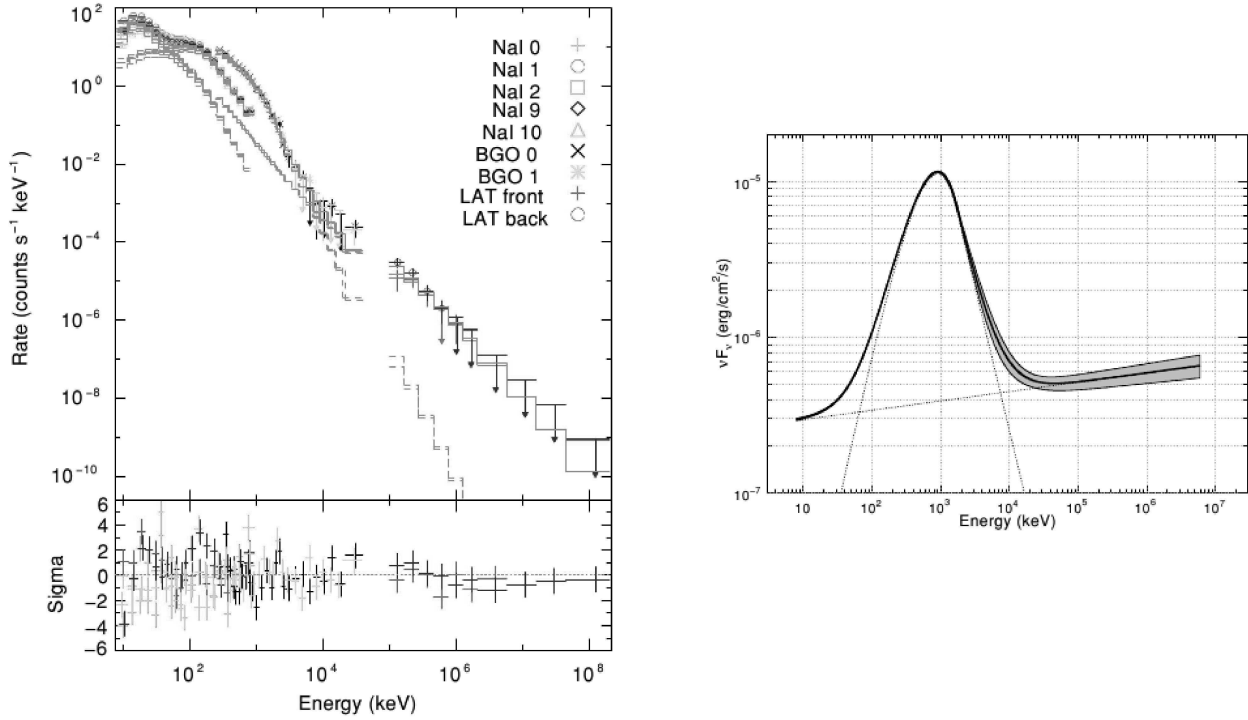


Рис. 6. GRB 090902B: спільна апроксимація для даних із детекторів GBM та LAT в інтервалі $(T_0 + 4.6, T_0 + 9.6$ сек). Малюнок зліва: спектр по фотонам; побудовано окремі компоненти моделі, функція Бенда (пунктирна), степеневая функція (суцільна лінія). Малюнок справа: спектр νF_ν . Показано продовження степеневого спектра для >100 MeV до найнижчих енергій (<50 кеВ).

Цікавою особливістю GeV-ного випромінювання є досить значні відмінності його спектра для різних гамма-спалахів, на відміну від відносно сталих часових характеристик (рис. 5). Для гамма-спалаху GRB 080916C, як і для багатьох інших спалахів, це випромінювання добре узгоджується з екстраполяцією функції Бенда [8]. Цікавим також є те, що нетепловий спектр гамма-спалаху GRB 080916C протягається на 7 порядків по енергії аж до GeV-них енергій. Але інколи GeV-не випромінювання у спектрі гамма-спалаху виглядає як окремий компонент, як у випадку з дуже яскравим гамма-спалахом GRB 090902B [138]. Важливо, що той же степеневий компонент спектра є і за MeV-ним максимумом нижче 10 кеВ (рис. 6). У випадку іншого нестандартного гамма-спалаху GRB 090926A було помічено слабкий прояв обрізання спектра на високих енергіях [140].

Тільки нещодавно виявлено, що інколи післясвічення гамма-спалаху в GeV-ному діапазоні може корелювати з рентгенівським випромінюванням. Наприклад, у випадку гамма-спалаху GRB 120711A з потужним GeV-ним компонентом, зафіксованим детектором INTEGRAL/ISGRI [141], рентгенівське випромінювання тривало щонайменше 1000 секунд та було чіткою екстраполяцією GeV-ного компонента. На жаль, через особливості орбіти телескопа імені Е. Фермі та незручне розташування гамма-спалаху дослідження

GeV-ного випромінювання від цього гамма-спалаху було обмеженим.

2. Моделювання GeV-ного випромінювання від гамма-спалахів

Наявність GeV-ного випромінювання від гамма-спалахів є однією з основних проблем для теоретичних моделей джерел гамма-спалахів. Запропоновано значну кількість моделей, але жодна з них не є задовільною за всіма параметрами. Хоча висловлюється припущення, що природа GeV-ного компонента є різною для різних гамма-спалахів [142].

По-перше, відсутність обрізання в спектрі на високих енергіях, яке викликається народженнями пар, накладає нижнє обмеження на Лоренц-фактор речовини в джерелі гамма-спалаху (припускаючи, що випромінювання генерується в одній області). Зазвичай це обмеження на Лоренц-фактор близько ~ 1000 [143], що створює додаткові проблеми в моделях, які пов'язані з поясненням формування релятивістського потоку. Це обмеження може бути послаблене в декілька разів, якщо врахувати детальнішу модель структури та динаміки випромінюючої області [144].

Виявлена кореляція між випромінюванням в GeV-ному та MeV-ному діапазонах свідчить про їхнє спі-

льне походження, яке, імовірно, пов'язане з внутрішніми ударними хвилями [143]. Однак GeV-не випромінювання триває щонайменше в декілька разів довше та через якийсь час загасає за звичайним степеневим законом; це може свідчити про зв'язок цього випромінювання із зовнішніми ударними хвилями (а отже, з післясвіченням) [139, 145]. Також можливо, що воно складається з двох окремих фаз [145]; хоча чіткого переходу між фазами на кривих блиску не спостерігається.

Неперервний спектр, який описується функцією Бенда та охоплює діапазон енергій від 0.01 MeV до ~ 10 GeV (рис. 6), важко узгодити зі стандартною фаєрбольною моделлю, бо випромінювання фотосфери мало би проявлятися в такому широкому діапазоні енергій. Відсутність цього випромінювання свідчить про домінування енергії магнітного поля в релятивістському струмені. З іншого боку, якщо максимум основного випромінювання гамма-спалаху GRB 090902B справді має теплову природу, то внесок енергії магнітного поля має бути невеликим.

Зв'язок GeV-ного випромінювання із зовнішніми ударними хвилями не узгоджується зі спостереженнями раннього рентгенівського випромінювання й оптичного післясвічення та має певні труднощі з поясненням найбільших енергій цього спалаху [146]. Для пояснення деяких спалахів запропоновано розглянути модель дисипативної фотосфери [147]. Також GeV-не випромінювання може бути пов'язане з пізньою активністю центрального джерела, активністю в рентгенівському післясвіченні та особливими фазами в післясвіченнях [148].

Спостереження гамма-спалахів у MeV-ному діапазоні проводили багатьма інструментами (BATSE, Swift, INTEGRAL, Konus та інші), а от інформації про GeV-не випромінювання все це порівняно дуже мало. Тому подальше дослідження GeV-ного випромінювання разом із мультихвильовим аналізом гамма-спалахів сприятиме побудові цілісної картини генерації теплового та нетеплового випромінювання від гамма-спалахів [142].

В. ПЕРСПЕКТИВИ ГАММА-400 В ДОСЛІДЖЕННІ ГАММА-СПАЛАХІВ

Якщо на ГАММА-400 буде встановлено 25 шарів трекара, то очікується, що це приведе до безпрецедентної кутової роздільної здатності (до $\sim 1^\circ$ на противагу до кутової роздільної здатності LAT на енергії 100 MeV $\sim 7^\circ$ [22]⁴). Зменшення ефективного розміру точкового джерела в ~ 7 разів спричинить зменшення рівня фону в ~ 50 разів.

Протягом відносно швидкої фази (~ 100 секунд) основного випромінювання гамма-спалаху, фон детектора LAT космічної обсерваторії імені Е. Фермі

завичай низький і чутливість обмежена кількістю фотонів від гамма-спалаху а отже ефективною площею приладу. ГАММА-400 матиме приблизно вдвічі меншу ефективну площу. Здавалось би, це приведе до зменшення чутливості до GeV-ного випромінювання. Але нещодавно команда LAT представила менш строгий відбір подій [149], що пов'язується з суттєво більшою ефективною площею та високим фоном космічних променів, який домінує над випромінюванням гамма-спалахів. Якщо подібний підхід вдасться реалізувати для ГАММА-400 (а скоріше за все це можна буде зробити), це дозволить збільшити кутову роздільну здатність приблизно в 7 разів, що зумовить значне збільшення зареєстрованих гамма-спалахів із GeV-ним компонентом та вищу якість спостережних даних.

Основне GeV-не випромінювання завичай домінує над фоном. GeV-не ж випромінювання, яке приходить із затримкою (післясвічення), ні. Збільшення кутової роздільної здатності, беззаперечно, буде корисним для детального дослідження цього загадкового компонента. Інформацію про повільне загасання цього компонента, еволюцію його спектра може використати в дослідженні енергетики та інших властивостей файрболу, що розширюється.

Іншою важливою особливістю ГАММА-400, що, імовірно, дасть змогу вирішити загадку GeV-ного післясвічення гамма-спалахів, є орбіта цього супутника. Космічна обсерваторія імені Е. Фермі була запущена на низьку орбіту з періодом близько 4000 секунд. А це означає, що на дослідження подій із часовими масштабами $\sim 1000 - 10000$ секунд суттєво впливатиме орбітальний рух супутника й багато даних можуть бути втрачені внаслідок покриття Землею або будуть забруднені випромінюванням від земного лімба. На жаль, цей часовий масштаб близький до характерного масштабу GeV-ного випромінювання від гамма-спалахів [139]. ГАММА-400 матиме можливість проводити неперервні спостереження навіть до 10^6 секунд (або і довше, якщо орбіта зміниться з еліптичної на колову або супутник буде поміщено в точку Лагранжа L2). Це дасть змогу спостерігати багато гамма-спалахів на важливих часових масштабах.

Можливо, що під час роботи ГАММА-400 буде запущено Масив Черенковських Телескопів (The Cherenkov Telescope Array — CTA) [19]. Розширені можливості для спостереження за тривалим GeV-ним випромінюванням гамма-спалахів у поєднанні з можливістю їх одночасного спостереження черенковськими телескопами були б дуже цінними.

У підсумку очікується, що ГАММА-400 значно перевищуватиме детектор LAT з космічної обсерваторії імені Е. Фермі в дослідженні гамма-спалахів за рядом ключових моментів, особливо щодо визначення природи GeV-ного післясвічення гамма-спалахів.

⁴<http://gamma400.lebedev.ru/indexeng.html>

VI. ЗАЛИШКИ НАДНОВИХ ЗІР

ЗН вважають основним джерелом галактичних космічних променів [150]. Частинки прискорюються на ударних фронтах ЗН до енергій 10^{15} – 10^{17} eV переважно за допомогою дифузійного механізму Фермі першого роду [151]; у деяких ЗН важливим може бути також мехнізм Фермі другого роду [152]. Дослідження гамма-випромінювання ЗН є основним для вивчення процесів, які відбуваються на сильних нерелятивістських беззіткнювальних ударних хвилях, а саме: динаміки і структури ударної хвилі, мікрофізики заряджених часток включно з їх інжекцією та прискоренням, поведінки магнітного поля та ін. Спостереження гамма-випромінювання від ЗН доводять, що заряджені частинки справді прискорюються до найвищих енергій, які спостерігають у галактичних космічних променях. З історією спостережень ЗН у гамма-діапазоні можна ознайомитися в [153–155].

A. СПОСТЕРЕЖЕННЯ Й МОДЕЛЮВАННЯ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗН

Гамма-телескоп EGRET спостерігав лише потоки гамма-випромінювання від кількох областей, де були розташовані ЗН. Важливим кроком у дослідженні гамма-випромінювання ЗН стали результати спостережень наземного черенковського телескопа H.E.S.S. За його допомогою 2004 року отримано перше зображення ЗН у гамма-діапазоні [17], а за допомогою черенковських телескопів — зображення 15 ЗН. Упродовж останніх 2 років оприлюднено важливі експериментальні дані з гамма-випромінювання ЗН, одержані орбітальним гамма-телескопом імені Е. Фермі. Він дав просторово розділені карти 8 ЗН.

Фізичні процеси в пульсарах можуть зумовлювати γ -випромінювання від ЗН G0.9+0.1, MSH 15-52 і Kes 75, тоді як в інших залишках гамма-промені, найімовірніше, породжені частками, прискореними на ударних хвилях оболонок ЗН. Основними процесами гамма-випромінювання цих часток у ЗН є обернений Комптон-ефект (він зумовлює гамма-промені від електронів) і піонно-розпадний механізм (гамма-випромінювання, яке виникає від взаємодії протонів); нетеплове гальмівне випромінювання електронів переважно дає нехтовний внесок у гамма-випромінювання ЗН.

Енергетичний спектр прискорених часток визначає форму спектра випромінювання. Спектри та карти ЗН моделюються за використання двох підходів до формування спектра прискорених часток. Перший — класична модель прискорення часток на фронтах ударних хвиль, коли частка вважається тестовою й не впливає на магнітогідродинаміку ударної хвилі [156, 157]. У такій моделі спектр прискорених часток є степеневим. Роль космічних променів може бути, однак, важливою, тому що під час прискорення вони можуть отримувати понад 10% кінетичної енергії ударної хвилі й модифікувати її властивості. То-

му нелінійна модель прискорення часток, яка враховує вплив часток на динаміку ударної хвилі, активно розвивається [158]. Важливим наслідком нелінійного прискорення є ефект посилення магнітного поля [159], що може зумовлювати високі значення напруженості магнітного поля в ЗН; наприклад, якщо міжзоряне магнітне поле 3 мкГс, то за фронтом ударної хвилі в класичній моделі напруженість зростає до 12 мкГс, у випадку ж нелінійної теорії це значення може досягати сотень мкГс.

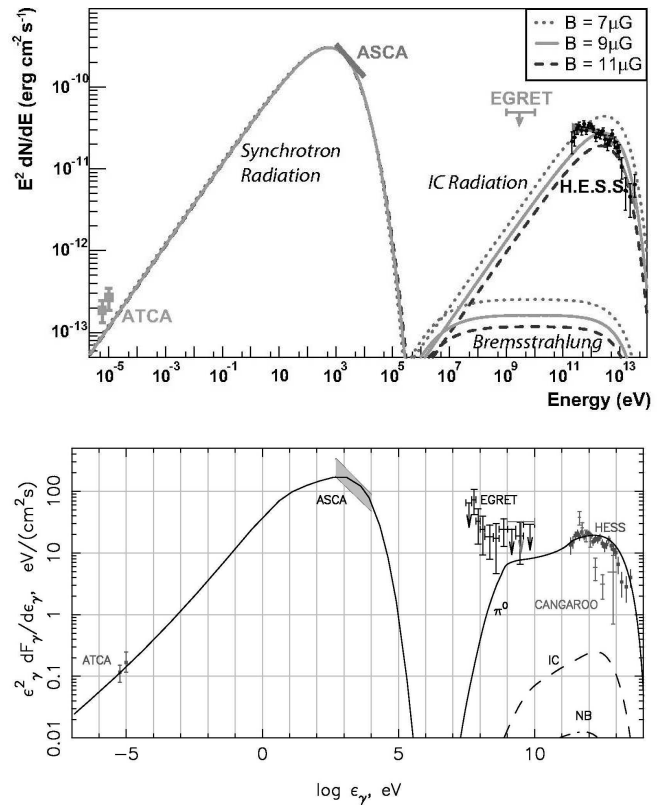


Рис. 7. Спектри RX J1713.7-3946 для двох альтернативних моделей ЗН [160,161] (верхній — класична модель прискорення, нижній — модель нелінійного прискорення).

Аналіз спостережуваних даних дає змогу накладати обмеження на ряд параметрів моделі ЗН. Проте однозначної відповіді на запитання про природу жорсткого гамма-випромінювання (> 0.1 TeV) немає. Справа в тому, що спостережувані спектри в цьому діапазоні можуть бути пояснені як електронним випромінюванням (обернений Комптон-ефект), так і протонним (піонно-розпадний механізм). Як приклад, розгляньмо один зі спостережуваних ЗН, RX J1713.7-3946. На рис. 7 зображено спектри випромінювання ЗН у всьому електромагнітному спектрі для двох альтернативних моделей гамма-випромінювання. Спостережувані дані добре узгоджуються з теоретичними розрахунками в обох випадках. Проте моделювання показує, що для домінування протонного компонента випромінювання магнітне поле повинно бути достатньо високим, тоді роль електронного компонента значно зменшується (що більша напруженість магнітного поля, то швидше електрони втрачають свою енергію).

Високе магнітне поле може бути наслідком ефективного прискорення часток на фронтах ударних хвиль. Отже, вибір між електронним та протонним гамма-випромінюванням ЗН часто є вибором між моделями прискорення: за класичної моделі основним джерелом гамма-випромінювання є електрони, при нелінійній теорії прискорення – протони.

Обсерваторія імені Е. Фермі в деяких випадках може відіграти визначальну роль у розв'язанні цієї проблеми, тому що вона працює в м'якшому діапазоні енергій (> 0.1 GeV). Перше повідомлення про детектування гамма-випромінювання від ЗН телескопом імені Е. Фермі з'явилося в жовтні 2009 року, від ЗН W51C у діапазоні 100 MeV – 100 GeV [162]. Аналіз спостережуваних даних надає перевагу протонному механізму, однак не виключає й можливість домінування інших компонент у гамма-спектрі цього залишка. У кількох дослідженнях гамма-випромінювання ЗН RX J1713.7-3946 [163, 164] з використанням даних телескопа імені Е. Фермі перевага надавалася лептонній моделі випромінювання, проте й у цьому випадку не була відкинута можливість альтернативної моделі.

Існує й інший тип спостережуваної інформації. 2004 року повідомлено про першу карту небесного об'єкта в гамма-діапазоні, а саме: ЗН RX J1713.7-394 [17]. Тому поряд зі спектрами випромінювання слід використовувати й карти поверхневої яскравості. ЗН за їхніми картами гамма-випромінювання можна поділити на дві групи: ті, у яких виявлено кореляцію з радіо- та рентгенівськими картами яскравості, і ті, де такої кореляції немає.

Для суттєвого потоку гамма-випромінювання від прискорених протонів необхідно мати області з високою концентрацією протонів-мішеней. Такими джерелами підвищеної концентрації можуть слугувати молекулярні хмари. Тоді можна очікувати, що розподіл поверхневої гамма-яскравості ЗН відтворюватиме розподіл протонів-мішеней, а не областей, де відбувається прискорення налітаючих релятивістських протонів. Тоді не слід очікувати кореляції між картами ЗН у радіо-, рентгенівському та гамма-діапазонах. Прикладом таких об'єктів можуть бути: IC443, W28, СТВ 37А чи СТВ 37В.

До іншого класу можна віднести ЗН, у яких розподіл поверхневої яскравості в радіо-, рентгенівському та гамма-діапазонах добре корелюють, а саме: ЗН 1006, RX J1713.7-394, Vela Jr. і, можливо, RCW86. У цьому випадку гамма-випромінювання найімовірніше зумовлено електронами. Прискоренні електрони, які спричиняють випромінювання в рентгенівському діапазоні унаслідок синхротронного механізму, повинні випромінювати в гамма-діапазоні завдяки оберненому Комптон-ефекту. Тому в таких ЗН природно очікувати кореляцію яскравих областей у різних діапазонах.

Детальне моделювання розподілів поверхневої яскравості ЗН в гамма-діапазоні з використанням класичної моделі прискорення проведено в роботах [165, 166] для МЗС з однорідним розподілом густини та напруженості магнітного поля і в [167] для неоднорідно-

го міжзоряного магнітного поля. Виявлено низку нових властивостей, які поглиблюють розуміння формування спостережуваних зображень ЗН у гамма-діапазоні та їх співвідношення із зображеннями в інших діапазонах випромінювання.

Наприклад, у випадку, коли максимальна енергія прискорених електронів не змінюється по поверхні ЗН, розташування яскравих областей (лімбів) повинно антикорелювати в радіо- (чи рентгенівському) та гамма-діапазонах (рис. 8). Це зумовлено тим, що синхротронна (рентгенівська чи радіо-) яскравість зростає зі збільшенням напруженості магнітного поля по поверхні ударної хвилі, оскільки пропорційна до $B^{3/2}$. Гамма-випромінювання від оберненого Комптон-ефекту напряду не залежить від магнітного поля, проте в областях підвищеного поля кількість електронів, здатних випромінювати гаммакванти, зменшується (унаслідок суттєво вищих радіаційних утрат), ніж в областях із низьким значенням напруженості поля.

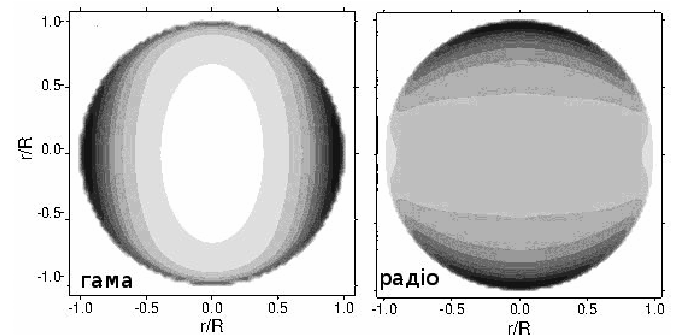


Рис. 8. Модельні карти поверхневої яскравості ЗН у гамма- та радіодіапазонах [165].

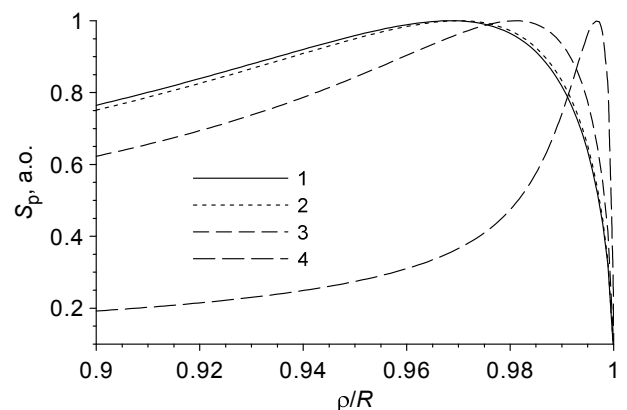


Рис. 9. Радіальні профілі поверхневої яскравості в гамма-діапазоні внаслідок випромінювання протонів [165, 166], розраховані для різних концентрацій протонів-мішеней: 1 cm^{-3} (лінія 1), 10^4 cm^{-3} (лінія 2), 10^5 cm^{-3} (лінія 3), 10^6 cm^{-3} (лінія 4).

Інший приклад стосується протонного гамма-випромінювання. Важливим параметром, який впливає на радіальні профілі поверхневої яскравості такого випромінювання, є втрати енергії протонів на

непружні зіткнення. На рис. 9 показано вплив концентрації протонів-мішеней на товщину радіальних профілів поверхневої яскравості: що вища концентрація протонів-мішеней, то менша товщина радіальних профілів. Це зумовлено тим, що втрати енергії релятивістських протонів на зіткнення пропорційні до концентрації протонів-мішеней. Експериментальну інформацію про товщину радіальних профілів у гамма-діапазоні можна використати для оцінки величини цієї концентрації.

В. ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ ГАММА-400

Орбітальний телескоп ГАММА-400 буде запущений після завершення експлуатації космічної обсерваторії імені Е. Фермі. Він повинен працювати в діапазоні енергій 0.1 – 3000 ГеВ. Крайці, порівняно з телескопом імені Е. Фермі, просторове розділення ($\sim 0.01^\circ$ проти $\sim 0.1^\circ$) та енергетичне розділення ($\sim 1\%$ проти $\sim 10\%$) дозволять отримувати карти яскравості ЗН (та, ймовірно, просторово-розділені спектри) у гамма-діапазоні такої якості, яка дозволить детальне тестування теоретичних моделей.

VII. ГАЛАКТИЧНІ ЗМІННІ ОБ'ЄКТИ

А. ВИМІРЮВАННЯ В ГАММА-ДІАПАЗОНІ

Із запуском детектора EGRET на борту космічної обсерваторії ім. А. Комптона в 1991 році стало можливим вивчення змінних γ -джерел. Однак єдиним із впевненістю встановленим класом змінних джерел на енергіях, вищих за 100 МеВ, виявилися блазари, про які вже відомо, що вони змінні в радіодіапазоні. Окрім них, EGRET зафіксував джерела, що не мали очевидних аналогів на інших довжинах хвиль. Багато з цих неідентифікованих джерел перебувають на низьких галактичних широтах, що вказує на їхнє галактичне походження. Пізніші дослідження неідентифікованих джерел EGRET показали, що деякі з них (наприклад, LS5039, LSI +61 303) є подвійними рентгєнівськими системами великої маси. Нині відомо лише декілька систем цього типу, що можуть випромінювати високоенергетичні (ГеВ–ТеВ) гамма-промені [168]. Природа цих джерел не є до кінця з'ясованою. Пізніше змінні джерела з координатами в межах похибки EGRET були задетектовані наземними черенковськими телескопами (H.E.S.S, MAGIC, VERITAS) з великою достовірністю [169–171].

Починаючи від 2008 року, за допомогою телескопа LAT на борту космічної обсерваторії імені Е. Фермі досліджені властивості цих джерел на енергіях фотонів у декілька ГеВ. Вони виявили несподівану поведінку LSI +61 303 — збільшення на 40% середнього гамма-потокую та зміна на хаотичну поведінку орбітальної γ -модуляції, тоді як модуляція в радіо- та рентгєнівському діапазонах лишилася незмінною [172].

Масивна подвійна система LSI +61 303 містить зорю типу Ве із сильним грудкуватим зоряним вітром та пульсар, що обертається навколо неї [173]. Спостережуване рентгєнівське та радіовипромінювання від цієї системи може бути пояснене взаємодією зоряного й релятивістського пульсарного вітрів, див., наприклад [174]. Для чіткого розуміння природи γ -випромінювання потрібні додаткові спостереження на суперорбітальних масштабах часу, які становлять близько 4.6 року.

Окрім детектування і підтвердження відомих змінних джерел, LAT виявив нові змінні джерела в галактичній площині. У каталозі джерел LAT 2FGL, що був складений за наслідками двох років спостережень [14], із 1873 джерел 5 є неідентифікованими змінними (на місячному масштабі часу) джерелами в галактичній площині ($|b| < 5$). Ще 4 джерела були ідентифіковані з LS 61 303, V 407 Cyg, Cyg X-3, і LAT PSR J1741-2054 та 15 джерел у галактичній площині асоційовані з блазарами або активними галактичними ядрами.

V 407 Cyg — симбіотична подвійна система, що складається з червоного гіганта типу Міра та компаньйона білого карлика [175]. Білий карлик акретує матеріал із зоряного вітру червоного гіганта та формує шар речовини на своїй поверхні. Зі збільшенням маси шару підвищується температура поверхні карлика й починається термоядерний вибух. Детектування гамма-променів від нової в цій системі є першим детектуванням нової в гамма-діапазоні взагалі [176]. Подальше дослідження змінності цієї системи є важливим для розуміння деталей механізмів акреції на білі карлики, а також механізмів детонації нових. Це джерело є особливо цікавим для сучасних та майбутніх нейтринних телескопів, таких як IceCube, Antares, Km3NET та Super-Kamiokande, оскільки передбачається, що нейтринний потік може досягати рівня чутливості детекторів [177].

Мікроквазар Cyg X-3 є одним із перших джерел, відкритих у рентгєнівській астрономії [178]. Система складається із зорі Вольфа–Райє із сильним гелієвим зоряним вітром та компактного (найбільш ймовірно, чорної діри) об'єкта, що обертається навколо зорі [179]. Cyg X-3 є відомим завдяки рекурентній активності своїх релятивістських джетів, що робить Cyg X-3 одним із найбільш яскравих транзйєнтних галактичних радіоджерел. Нещодавні гамма-спалахи цього джерела були спостережені LAT [180] та AGILE [181]. Розроблені теоретичні моделі асоціюють γ -випромінювання із джетом [179], однак природа (адронна або лептонна) цього випромінювання досі нез'ясована [182–184].

Останнє змінне джерело з каталогу об'єктів LAT 2FGL у галактичній площині, LAT PSR J1741-2054, було вперше ідентифіковане як мілісекундний пульсар завдяки його γ -випромінюванню [185]. Подальші радіоспостереження цієї області також підтвердили наявність пульсуючого випромінювання [186].

Після 2-х років на орбіті LAT продемонстрував інший сюрприз. “Калібрувальне джерело” астрофізики

високих енергій — Крабовидна туманність — виявилось змінним. Сильні спалахи зі зміною потоку в десятки разів було задетектовано у вересні 2010 та квітні 2011 [187].

Окрім цих двох об'єктів, пульсара та пульсарної туманності, є натяк на те, що на масштабі часу від тижнів до місяців змінними можуть виявитись інші пульсари або пульсарні туманності. Нещодавно дослідження змінності на різних масштабах часу по всьому небу були виконані в [188]. У цій роботі за міру змінності прийнято максимальне відхилення потоку від свого середнього значення в кожній точці на небі. Крім відомих змінних джерел, таких, як V 407 Cyg,

LSI +61 303, PSR B1259, автори [188] знайшли кореляцію між положенням змінності та областями, що містять молоді пульсари. Однак складна просторова структура цих областей (рис. 10) та недостатня просторова роздільна здатність LAT ($\sim 5^\circ$ на 100 MeV) не дають змогу визначити походження змінності.

Понад десять астрономічних телеграм за останні роки присвячено детектуванню транзйентних джерел за допомогою гамма-телескопа LAT, змінних на масштабах часу, коротших за місяць. Однак похибка на координати цих джерел залишається занадто великою для подальших спостережень рентгенівськими або оптичними телескопами.

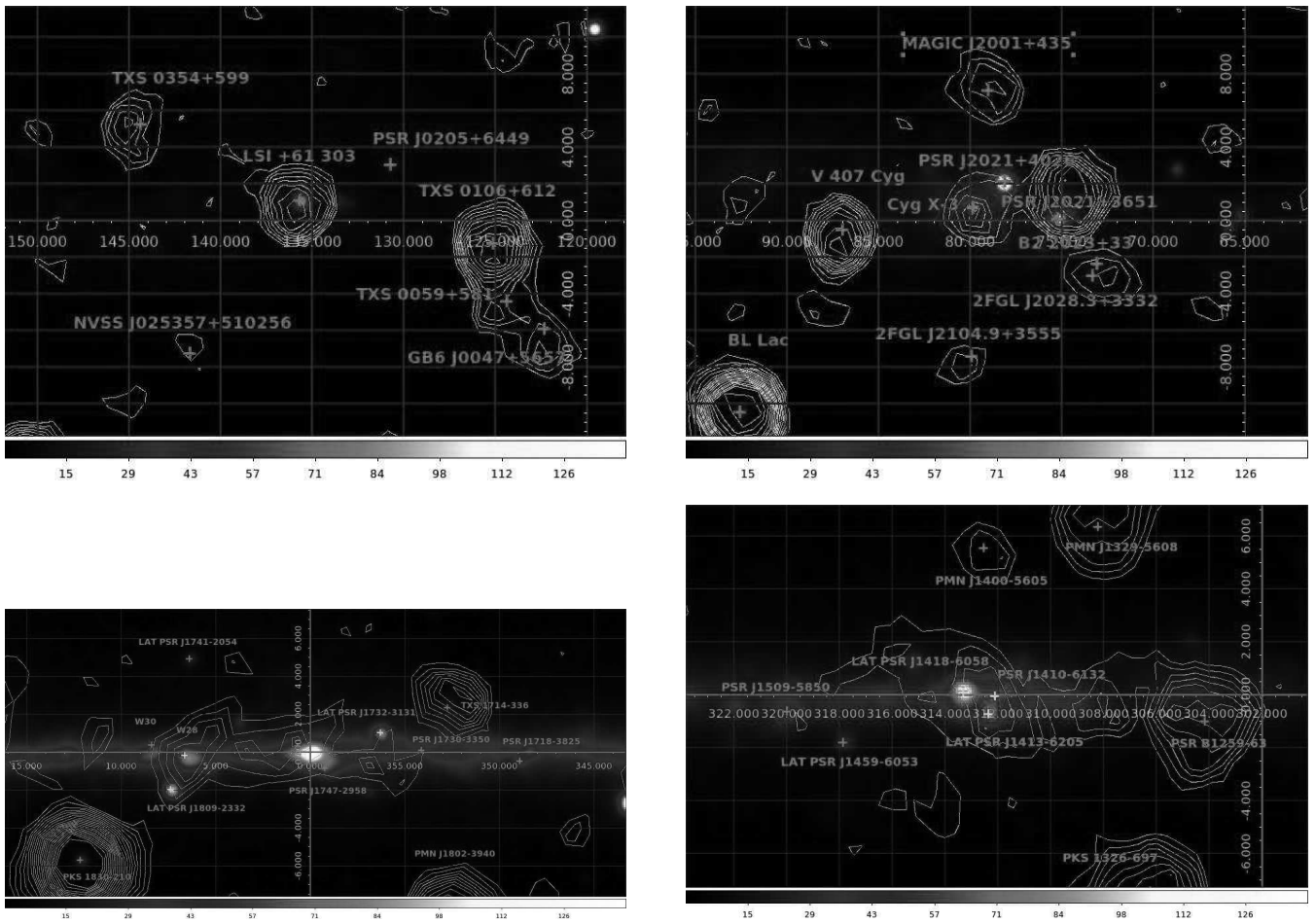


Рис. 10. Карта фотонів LAT та контури змінності на енергіях вище 300 MeV у напрямку LSI +61 303 (верхній лівий кут) та Cyg X-3, V407 Cyg (верхній правий кут), до галактичного центру та залишку наднової W28 (нижній лівий кут) та область, що містить пульсари PSR J1418-6068, PSR J1410-6132 і PSR J1413-6205 (нижній правий кут). Контури змінності починаються від 3σ із кроком по 0.5σ [188]

В. ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ ГАММА-400

ГАММА-400 продовжить моніторинг змінності відомих гамма-джерел, а також матиме змогу детектувати нові галактичні й позагалактичні транзйентні джерела. Добра просторова роздільна здатність

ГАММА-400 (1° на 100 MeV) разом із широким полем зору, порівняним із полем зору LAT, зробить його відповідним інструментом для детектування яскравих гамма-транзйентних подій. Беручи до уваги трохи меншу, ніж у LAT, ефективну площу ГАММА-400 ($\sim 0.64 \text{ m}^2$) і кількість транзйентних подій, які LAT

спостеріг за 4 роки (~ 10), очікують детектування ГАММА-400 щонайменше одного транзйентного джерела за рік у галактичній площині.

Постійне періодичне спостереження відомих джерел (LSI +61 303, LS 5039, V 407 Cyg, PSR B1259) за допомогою ГАММА-400 важливе для вивчення природи цих джерел.

Отримана інформація про всі транзйентні та змінні джерела доповнюватиме наявні дані LAT та EGRET. Завдяки цьому навіть на початку місії ГАММА-400 отримані дані зі змінних джерел можуть бути цінними для визначення їхніх параметрів.

Нарешті, ГАММА-400 із кращою просторовою роздільною здатністю на 100 MeV зможе прояснити походження змінності в областях, що містять молоді пульсари, та допоможе перевірити, чи насправді змінність на місячному масштабі часу є загальною властивістю таких систем.

VIII. ВИСНОВКИ

У статті подано огляд основних проблем, які стоять перед сучасною гамма-астрономією, та визначено перспективні класи джерел гамма-випромінювання для спостережень на міжнародній космічній обсерваторії ГАММА-400 з погляду наявності в Україні наукових груп, які працюють у відповідних галузях астрофізики.

Завдяки своїй високій спектральній роздільній здатності (порівняно з наявними, такими, як супутник імені Е. Фермі та H.E.S.S., або запланованими, такими, як СТА, місіями), ГАММА-400 буде унікальним інструментом для перевірки природи ліній у GeV діапазоні енергій фотонів. В оптимістичному випадку (якщо виявиться, що отриманий сигнал у вигляді лінії на енергії близько 130 GeV має фізичну природу) очікується, що значущість сигналу, який зможе зафіксувати ГАММА-400, у 5 разів перевищуватиме поточну значущість сигналу (близько 4σ). Разом з унікальною інформацією про просторовий та спектральний розподіли ліній, отриманою ГАММА-400, це вперше дозволить відрізнити між астрофізичним (від ультрарелятивістського холодного пульсарного вітру) та космологічним (від розпаду чи анігіляцією частинок темної матерії) сценарієм появи ліній-кандидатів, а також (у випадку космологічного сценарію) між різними моделями темної матерії (зокрема між розпадом та анігіляцією S -частинок). У песимістичному випадку (якщо виявиться, що отриманий сигнал має інструментальну природу) висока чутливість ГАММА-400 дасть змогу покращити в 2.5 разу наявні обмеження на інтенсивність вузьких ліній-кандидатів у діапазоні GeV енергій. Таким чином, у випадку збереження заявлених фізичних характеристик, ГАММА-400 стане ключовим інструментом для дослідження низки важливих фізичних задач, таких, як визначення природи темної матерії та пошук астрофізичних ліній у гамма-діапазоні.

Очікується, що телескоп ГАММА-400 матиме унікальні характеристики, які стануть важливими також для дослідження й мінімальних часових масштабів змінності блазарів. Можливість спостерігати окреме джерело протягом значного інтервалу часу дозволить точніше виміряти ці масштаби й перевірити їхню кореляцію з масами центральних чорних дір цих об'єктів. Отже, ГАММА-400 зможе надати нові факти, які допоможуть установити досі невідоме походження гамма-випромінювання блазарів та інші їхні властивості.

Заявлена кутова роздільна здатність ГАММА-400 є ще однією важливою рисою телескопа. Вона є вищою за роздільну здатність наявного гамма-телескопа LAT на борту космічної гамма-обсерваторії імені Е. Фермі. Завдяки цьому ГАММА-400 зможе поліпшити наявні обмеження на міжгалактичні магнітні поля, виявивши чи встановивши нові обмеження на наявність протяжних гало навколо далеких блазарів.

Порівняно висока роздільна здатність телескопа ГАММА-400, якщо вона буде реалізована, стане унікальним засобом аналізу просторових розподілів яскравості залишків наднових зір. Вона вперше суттєво наблизиться до роздільної здатності радіо і рентгенівських телескопів. Хоч і не досягне поки що їхнього рівня, але все ж дозволить порівнювати гамма-зображення залишків із картами яскравості в інших діапазонах. Це є суттєвим для аналізу фізичних процесів, пов'язаних із прискоренням, а також взаємодії релятивістських протонів й електронів із магнітними й фотонними полями в областях сильних ударних хвиль. Висока чутливість детекторів породжувала також сподівання на можливість отримати спектри від окремих областей залишків, принаймні тих залишків, які є найближчими до нас.

Унікальні на сьогодні характеристики телескопа ГАММА-400 є важливими для дослідження й GeV-ного діапазону випромінювання від гамма-спалахів. Порівняно з дослідженнями гамма-спалахів у MeV-ному діапазоні, які проводили доволі багато телескопів (CGRO, Swift, INTEGRAL, Konus тощо), експериментальних даних з GeV-ного діапазону є мало. Тому подальше дослідження GeV-ного випромінювання, поряд із багатохвильовим аналізом гамма-спалахів, спричинить суттєвий поштовх до побудови цілісної картини генерації теплового та нетеплового випромінювання від гамма-спалахів. Іншою важливою особливістю телескопа ГАММА-400 для спостережень гамма-спалахів є можливість дослідити часову затримку між GeV-ним та MeV-ним випромінюванням. На жаль, детектор LAT космічного телескопа імені Е. Фермі не здатен повною мірою виконувати такі спостереження у зв'язку з особливостями його орбіти. Тому в дослідженні гамма-спалахів телескоп ГАММА-400 матиме значні переваги порівняно з телескопом імені Е. Фермі.

Очікуване часове розділення детекторів ГАММА-400 є достатнім також для аналізу нестационарних галактичних джерел. Зокрема тих, які демонструють тривалу (на масштабі кількох місяців) змінність, ви-

явлену телескопом імені Е. Фермі. Це, зокрема, області околу галактичного центра та області з молодими пульсарами.

ПОДЯКИ

Робота частково підтримана програмою “Космомікрофізика” та Програмою космічних досліджень (зокрема напрямком “Пріоритетні міжнародні космічні проекти”) Національної академії наук України

ни, а також Державною програмою впровадження грид-технологій в Україні. Д. Я. дякує за підтримку ERC Advanced Grant 20080109304. Робота Д. Я. та Д. М. також частково підтримана проектом SCOPES IZ73Z0_128040 Швейцарського національного наукового фонду, грантом СМ-203-2012 для молодих учених Національної академії наук України та грантом Президента України GP/F44/088 для талановитих молодих учених.

-
- [1] F. Aharonian, *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation* (World Scientific, 2003).
- [2] T. Weekes, *Very High Energy Gamma-Ray Astronomy* (IOP Publishing, 2003).
- [3] K. Pinkau, *Astron. Astrophys. Suppl.* **120**, 43 (1996).
- [4] K. Pinkau, *Experiment. Astron.* **25**, 157 (2009).
- [5] P. Morrison, *Nuovo Cimento* **7**, 858 (1958).
- [6] R. L. Aptekar *et al.*, *Space Sci. Rev.* **71**, 265 (1995).
- [7] N. Gehrels, P. Meszaros, *Science* **337**, 932 (2012).
- [8] D. Band *et al.*, *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
- [9] E. Feenberg, H. Primakoff, *Phys. Rev.* **73**, 449 (1948).
- [10] S. Hayakawa, *Prog. Theor. Phys.* **8**, 571 (1952).
- [11] G. W. Hutchinson, *Philos. Mag. Ser 7*, **43**, 847 (1952).
- [12] W. B. Atwood *et al.*, *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
- [13] A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **183**, 46 (2009).
- [14] P. L. Nolan *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 31 (2012).
- [15] C. D. Dermer, arXiv:1202.2814 [astro-ph.HE] (2012).
- [16] J.A Hinton, For the H.E.S.S Collaboration, *New Astron. Rev.* **48**, 331 (2004).
- [17] F. A. Aharonian *et al.*, *Nature* **432**, 75 (2004).
- [18] E. Lorenz, The MAGIC Collaboration, *New Astron. Rev.* **48**, 339 (2004).
- [19] *Exp. Astron.* **32**, 193 (2011).
- [20] D. J. Thompson, L. Baldini, Y. Uchiyama, *Astropart. Phys.* **39**, 22 (2012).
- [21] G. Bertone, D. Hooper, J. Silk, *Phys. Rep.* **405**, 279 (2005).
- [22] A. M. Galper *et al.*, *Adv. Space Res.* **51**, 297 (2013).
- [23] A. M. Galper *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1516**, 288 (2013).
- [24] V. A. Dogiel *et al.*, *Space Sci. Rev.* **49**, 215 (1988).
- [25] M. Tavani *et al.*, *Astron. Astrophys.* **502**, 995 (2009).
- [26] R. Battiston, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **588**, 227B (2008).
- [27] O. Adriani *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 201101 (2011).
- [28] M. Milgrom, *Astrophys. J.* **270**, 371 (1983).
- [29] A. Kosowsky, *Adv. Astron.* **2010**, 4 (2010).
- [30] E. Komatsu *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 18 (2011).
- [31] E. Rozo *et al.*, *Astrophys. J.* **708**, 645 (2010).
- [32] B. A. Reid *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404**, 60 (2010).
- [33] A. Mantz, S. W. Allen, D. Rapetti, H. Ebeling, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **406**, 1759 (2010).
- [34] J. L. Tinker *et al.*, *Astrophys. J.* **745** 16T (2012).
- [35] С. Апуневич, Ю. Кулініч, Б. Новосядлий, В. Пелих, *Кін. фіз. небес. тіл* **25**, 83 (2009).
- [36] B. J. Carr, arXiv:astro-ph/0511743 (2005).
- [37] M. Moniez, *Gen. Relativ. Gravit.* **42**, 2047 (2010).
- [38] A. Dar, *Astrophys. J.* **449**, 550 (1995).
- [39] S. Tremaine, J. E. Gunn, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 407 (1979).
- [40] A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0903**, 005 (2009).
- [41] S. D. M. White, C. S. Frenk, M. Davis, *Astrophys. J. Lett.* **274**, L1 (1983).
- [42] P. J. E. Peebles, *Science* **224**, 1385 (1984).
- [43] S. Hannestad, G. Raffelt, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **4**, 8 (2004).
- [44] P. Crotty, J. Lesgourgues, S. Pastor, *Phys. Rev. D* **69**, 123007 (2004).
- [45] J. Beringer *et al.*, *Phys. Rev. D* **86**, 010001 (2012).
- [46] L. Bergström, *New J. Phys.* **11**, 105006 (2009).
- [47] J. L. Feng, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **48**, 495 (2010).
- [48] G. Bertone, *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, (Cambridge University Press, 2010).
- [49] B. W. Lee, S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 165 (1977).
- [50] H. Goldberg, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 1419 (1983).
- [51] J. Ellis, J. S. Hagelin, D. V. Nanopoulos, K. Olive, M. Srednicki, *Nucl. Phys. B.* **238**, 453 (1984).
- [52] G. Servant, T. M. P. Tait, *Nucl. Phys. B* **650**, 391 (2003).
- [53] J. L. Feng, A. Rajaraman, F. Takayama *Phys. Rev. Lett.* **91**, 011302 (2003).
- [54] S. Dodelson, L. M. Widrow, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 17 (1994).
- [55] T. Asaka, S. Blanchet, M. Shaposhnikov, *Phys. Lett.* **B631**, 151 (2005).
- [56] M. Lattanzi, J. W. F. Valle, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 121301 (2007).
- [57] K. Kadota, *Phys. Rev. D* **77**, 063509 (2008).
- [58] N. Sahu, U. Sarkar, *Phys. Rev. D* **78**, 115013 (2008).
- [59] S. Khalil, O. Seto, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **10**, 24 (2008).
- [60] M. Laine, M. Shaposhnikov, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **6**, 31 (2008).
- [61] F. Bezrukov, H. Hettmansperger, M. Lindner, *Phys. Rev. D* **81**, 085032 (2010).
- [62] G. B. Gelmini, E. Osoba, S. Palomares-Ruiz, *Phys. Rev. D* **81**, 063529 (2010).
- [63] F. Takayama, M. Yamaguchi, *Phys. Lett.* **B485**, 388 (2000).
- [64] J. L. Feng, S. Su, F. Takayama, *Phys. Rev. D* **70**, 063514 (2004).
- [65] W. Buchmuller, L. Covi, K. Hamaguchi, A. Ibarra, T. Yanagida, *J. High. Energ. Phys.* **03**, 037 (2007).
- [66] J. P. Conlon, F. Quevedo, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0708**, 019 (2007).

- [67] A. Boyarsky, D. Iakubovskiy, O. Ruchayskiy, V. Savchenko, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **387**, 1361 (2008).
- [68] A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, M. Shaposhnikov, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **59**, 191 (2009).
- [69] A. Boyarsky, A. Neronov, O. Ruchayskiy, M. Shaposhnikov, I. Tkachev, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 261302 (2006).
- [70] A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy, A. V. Maccio', D. Malyshev, arXiv:0911.1774 [astro-ph.CO] (2009).
- [71] G. Bertone, W. Buchmuller, L. Covi, A. Ibarra, J. Cosmol. Astropart. Phys. **0711**, 003 (2007).
- [72] M. Cirelli *et al.*, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **3**, 51 (2011).
- [73] J. Carr, G. Lamanna, J. Lavalley, *Rep. Prog. Phys.* **69**, 2475 (2006).
- [74] L. Bergstrom, *J. Phys.: Conf. Ser.* **120**, 042005 (2008).
- [75] D. Hooper, E. A. Baltz, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **58**, 293 (2008).
- [76] T. Bringmann, X. Huang, A. Ibarra, S. Vogl, C. Weniger, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **7**, 54 (2012).
- [77] C. Weniger, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **8**, 7 (2012).
- [78] E. Tempel, A. Hektor, M. Raidal, arXiv:1205.1045 [hep-ph] (2012).
- [79] M. Su, D. P. Finkbeiner, arXiv:1206.1616 [astro-ph.HE] (2012).
- [80] M. Ackermann *et al.*, *Phys. Rev. D.* **86**, 022002 (2012).
- [81] S. Profumo, T. Linden, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **7**, 11 (2012).
- [82] L. Bergström, *Ann. Phys. (Leipzig)* **524**, 479 (2012).
- [83] A. Rajaraman, T. M. P. Tait, D. Whiteson, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **9**, 003 (2012).
- [84] A. Boyarsky, D. Malyshev, O. Ruchayskiy, arXiv:1205.4700 [astro-ph.HE] (2012).
- [85] F. Aharonian, D. Khangulyan, D. Malyshev, *Astron. Astrophys.* **547**, 114 (2012).
- [86] L. Bergström, G. Bertone, J. Conrad, C. Farnier, C. Weniger, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **11**, 025 (2012).
- [87] H. T. Liu, J. M. Bai, *Astrophys. J.* **653**, 1089 (2006).
- [88] F. Aharonian *et al.*, *Astrophys. J.* **664**, L71 (2007).
- [89] J. Albert *et al.*, *Astrophys. J.* **669**, 862 (2007).
- [90] G. Ghisellini, F. Tavecchio, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **386**, L28 (2008).
- [91] G. Ghisellini, F. Tavecchio, G. Bodo, A. Celotti, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **393**, L16 (2009).
- [92] D. Giannios, D. A. Uzdensky, M. C. Begelman, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **395**, L29 (2009).
- [93] R. Narayan, T. Piran, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420**, 604 (2012).
- [94] L. Foschini, G. Ghisellini, F. Tavecchio, G. Bonnoli, A. Stamerra, *Astron. Astrophys.* **530**, A77 (2011).
- [95] T. Sbarrato, L. Foschini, G. Ghisellini, F. Tavecchio, *Adv. Space Res.* **48**, 998 (2011).
- [96] A. Neronov, Ie. Vovk, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **412**, 1389 (2011).
- [97] J. Poutanen, B. Stern, *Astrophys. J. Lett.* **717**, L118 (2010).
- [98] B. Stern, J. Poutanen, *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **417**, L11 (2011).
- [99] D. Grasso, H. R. Rubinstein, *Phys. Rep.* **348**, 163 (2001).
- [100] P. P. Kronberg, *Rep. Prog. Phys.* **57**, 325 (1994).
- [101] R. M. Kulsrud, E. G. Zweibel, *Rep. Prog. Phys.* **71**, 0046091 (2008).
- [102] L. M. Widrow, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 775 (2002).
- [103] A. Neronov, Ie. Vovk, *Science* **328**, 73 (2010).
- [104] F. Tavecchio *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **406**, L70 (2010).
- [105] K. Dolag, M. Kachelriess, S. Ostapchenko, R. Tomas, *Astrophys. J.* **727**, L4 (2011).
- [106] A. Taylor, Ie. Vovk, A. Neronov, *Astron. Astrophys.* **529**, A144 (2011).
- [107] Ie. Vovk, A. M. Taylor, D. Semikoz, A. Neronov, *Astrophys. J. Lett.* **747**, L14 (2012).
- [108] S. Pinsonneault, H. Martel, M. Pieri, *Astrophys. J.* **725**, 2087 (2010).
- [109] J. Germain, P. Barai, H. Martel, *Astrophys. J.* **704**, 1002 (2009).
- [110] R. Plaga, *Nature* **374**, 430 (1995).
- [111] A. Neronov, D. Semikoz, *Phys. Rev.* **D80**, 1230121 (2009).
- [112] A. Neronov, D. Semikoz, M. Kachelriess, S. Ostapchenko, A. Elyiv, *Astrophys. J. Lett.* **719**, 130 (2010).
- [113] R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson, *Astrophys. J. Lett.* **182**, L85 (1973).
- [114] L. Piro *et al.*, *Astron. Astrophys.* **331**, L41 (1998).
- [115] R. Salvaterra *et al.*, *nature* **461**, 1258 (2009).
- [116] E. P. Mazets *et al.*, *Astrophys. Space Sci.* **80**, 3 (1981).
- [117] Ch. Kouveliotou *et al.*, *Astrophys. J.* **413**, L101 (1993).
- [118] A. I. MacFadyen, S. E. Woosley, *Astrophys. J.* **524**, 262 (1999).
- [119] E. Pian *et al.*, *Astrophys. J.* **536**, 778P (2000).
- [120] S. E. Woosley, J. S. Bloom, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **44**, 507W (2006).
- [121] Yu. Kaneko *et al.*, *Astrophys. J.* **654** 385K (2007).
- [122] S. D. Barthelmy *et al.*, *Nature* **438**, 994 (2005).
- [123] J. P. U. Fynbo *et al.*, *Nature* **444**, 1047 (2006).
- [124] S. Campana *et al.*, *Nature* **480**, 69C (2011).
- [125] D. N. Burrows *et al.*, *Nature* **476**, 421 (2011).
- [126] K. Hurley *et al.*, *Nature* **434**, 1098 (2005).
- [127] F. Ryde, *Astrophys. J. Lett.* **625**, 95 (2005).
- [128] K. L. Page *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **416**, 2078 (2011).
- [129] G. Ghirlanda, A. Celotti, G. Ghisellini, *Astron. Astrophys.* **406**, 879 (2003).
- [130] R. Ruffini, C. L. Bianco, F. Fraschetti, S. S. Xue, P. Chardonnet, *Astrophys. J. Lett.* **555**, 113 (2001).
- [131] T. Piran, *Phys. Rep.* **333**, 529 (2000).
- [132] Yu. Kaneko *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **166**, 298 (2006).
- [133] V. Savchenko, A. Neronov, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **396**, 935 (2009).
- [134] F. Ryde *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **709**, 172 (2010).
- [135] M. V. Medvedev, S. S. Pothapragada, S. J. Reynolds, *Astrophys. J. Lett.* **702**, 91 (2009).
- [136] A. Neronov, V. Savchenko, *Astron. Astrophys.* **520**, 1 (2010).
- [137] E. J. Schneid *et al.*, *Astron. Astrophys.* **255**, L13 (1992).
- [138] A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **706**, L138 (2009).
- [139] G. Ghisellini, G. Ghirlanda, L. Nava, A. Celotti, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403**, 926 (2010).
- [140] A. Rau *et al.*, *Astrophys. J.* **720**, 862R (2010).
- [141] D. Gotz *et al.*, *GRB Coordinates Network* **13434**, 1 (2012).
- [142] B. B. Zhang *et al.*, *Astrophys. J.* **730**, 141 (2011).
- [143] A. A. Abdo *et al.*, *Science* **323**, 1688 (2009).
- [144] R. Hascoët, F. Daigne, R. Mochkovitch, V. Vennin, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **421**, 525 (2012).

- [145] A. Maxham, B. B. Zhang, B. Zhang, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415**, 77 (2011).
- [146] T. Piran, E. Nakar, *Astrophys. J. Lett.* **718**, 63 (2010).
- [147] F. Ryde *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415**, 3693 (2011).
- [148] H. N. He, B. B. Zhang, X. Y. Wang, Z. Li, P. Mészáros, *Astrophys. J.* **753**, 178 (2012).
- [149] GLAST-GS-ICD-0006. Fermi Science Data Product Interface Control Document.
- [150] A. M. Hillas, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **31**, R95 (2005).
- [151] S. P. Reynolds, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 89 (2008).
- [152] M. Ostrowski, *Astron. Astrophys.* **345**, 256 (1999).
- [153] M. Catanese, T. Weekes, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111**, 1193 (1999).
- [154] S. Funk, *Advances in Space Research* **41**, 464 (2008).
- [155] F. Aharonian, J. Buckley, T. Kifune, G. Sinnis, *Rep. Prog. Phys.* **71**, 096901 (2008).
- [156] L. C. O'Drury, *Rep. Prog. Phys.* **46**, 973 (1983).
- [157] F. C. Jones, D. C. Ellison, *Space Sci. Rev.* **58**, 259 (1991).
- [158] M. A. Malkov, L. O'C Drury, *Rep. Prog. Phys.* **64**, 429 (2001).
- [159] A. Bell, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **353**, 550 (2004).
- [160] F. Aharonian *et al.*, *Astron. Astrophys.* **449**, 223 (2006).
- [161] E. G. Berezhko, H. J. Völk, *Astron. Astrophys.* **451**, 981 (2006).
- [162] A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **706**, L1 (2009).
- [163] Z. H. Fan, S. M. Liu, Q. Yuan, L. Fletcher, *Astron. Astrophys.* **517**, L4 (2010).
- [164] A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J.* **734**, 28 (2011).
- [165] O. Petruk, V. Beshley, F. Bocchino, S. Orlando, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **395**, 1467 (2009).
- [166] V. Beshley, O. Petruk, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **419**, 1421 (2012).
- [167] S. Orlando, O. Petruk, F. Bocchino, M. Miceli, *Astron. Astrophys.* **526**, A129 (2011).
- [168] M. Chernyakova, A. Neronov, *Int. J. Mod. Phys. D* **17**, 1917 (2008).
- [169] J. Albert *et al.*, *Science* **312**, 1771 (2006).
- [170] M. de Naurois, *Astrophys. Space Sci.* **309**, 277 (2007).
- [171] G. Maier, the VERITAS Collaboration, *Americ. Inst. Phys.* **1505**, 362 (2012).
- [172] M. Chernyakova *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **747**, L29 (2012).
- [173] C. Aragona *et al.*, *Astrophys. J.* **698**, 514 (2009).
- [174] A. A. Zdziarski, A. Neronov, M. Chernyakova, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403**, 1873 (2010).
- [175] R. A. Downes *et al.*, *PASP.* **113**, 764 (2001).
- [176] A. A. Abdo *et al.*, *Science* **329**, 817 (2010).
- [177] S. Razzaque, P. Jean, O. Mena, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **302**, 253 (1999).
- [178] J. Tueller *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **186**, 378 (2010).
- [179] A. A. Zdziarski *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **421**, 2956 (2012).
- [180] A. A. Abdo *et al.*, *Science* **326**, 1512 (2009).
- [181] G. Piano *et al.*, *Astron. Astrophys.* **545**, 110 (2012).
- [182] A. M. Atoyan, F. A. Aharonian *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **302**, 253 (1999).
- [183] G. E. Romero, D. F. Torres, M. M. Kaufman Bernadó, I. F. Mirabel *Astron. Astrophys.* **410**, L1 (2003).
- [184] G. Dubus, B. Cerutti, G. Henri, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404**, L55 (2010).
- [185] A. A. Abdo *et al.*, *Science* **325**, 848 (2009).
- [186] F. Camilo *et al.*, *Astrophys. J.* **705**, 1 (2009).
- [187] R. Buehler *et al.*, *Astrophys. J.* **749**, 26 (2012).
- [188] A. Neronov, D. Malyshev, M. Chernyakova, A. Lutovinov, *Astron. Astrophys.* **543**, L9 (2012).

COSMIC GAMMA-RAY SOURCES AND PROSPECTS OF THEIR OBSERVATIONS WITH INTERNATIONAL COSMIC OBSERVATORY GAMMA-400

V. Beshley¹, Ie. Vovk², D. Malyshev³, V. Marchenko⁴, O. Petruk¹, V. Savchenko², D. Iakubovskiy^{3,5}

¹*Institute for Applied Problems in Mechanics and Mathematics, 3-b, Naukova St., Lviv, UA-79060, Ukraine*

²*ISDC Data Centre for Astrophysics, 16, Ch. d'Ecogia, 1290, Versoix, Switzerland*

³*Bogolyubov Institute of Theoretical Physics, 14-b, Metrologichna St., Kyiv, UA-03680, Ukraine*

⁴*Astronomical Scientific Research Center of Taras Shevchenko Chernigiv National Pedagogical University, 53, Getmana Polubotka St., Chernigiv, UA-14013, Ukraine*

⁵*National University of Kyiv-Mohyla Academy, 2, Skovorody St., Kyiv, UA-04070, Ukraine*

The GAMMA-400 space observatory scheduled to be launched in 2018 by the Russian Space Agency is one of the most interesting forthcoming projects working in the MeV–TeV range. In this paper, we provide a detailed overview of possible scientific opportunities for GAMMA-400, especially concentrating on several topics to which Ukrainian scientific groups can add significant value. These topics include: indirect search of dark matter signatures, determination of parameters of cosmological magnetic fields and studies of a wide class of astrophysical objects such as supernova remnants, active galactic nuclei, gamma-ray bursts and transient gamma-ray sources.