

УДК 524.1+524.7

О. Б. Суцов¹, О. О. Кобзар¹, Б. І. Гнатик², В. В. Марченко¹

¹Чернігівський національний педагогічний університет імені Т. Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка 53, Чернігів, 14013

²Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ-53, 04053
volodymyr.marchenko@gmail.com

Пошук джерел космічних променів надвисоких енергій. FRI-радіогалактика Centaurus A

Досліджується рух космічних променів надвисоких енергій у галактичному та позагалактичному магнітних полях. Для різних моделей галактичного магнітного поля вивчається рух заряджених частинок різних енергій та хімічного складу. З урахуванням впливу як галактичного, так і позагалактичного турбулентних полів розраховано положення реальних джерел подій, зареєстрованих обсерваторією Auger. Проведено аналіз можливості їхньої кореляції з радіогалактикою Centaurus A.

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ. FRI-РАДИОГАЛАКТИКА CENTAURUS A, Суцёв А. Б., Кобзарь О. А., Гнатык Б. И., Марченко В. В. — Исследуется движение космических лучей сверхвысоких энергий в галактическом и внегалактическом магнитных полях. Для разных моделей галактического магнитного поля изучается движение заряженных частиц различных энергий и химического состава. С учетом влияния как галактического, так и внегалактического турбулентных полей рассчитано положение реальных источников событий, зарегистрированных обсерваторией Auger. Проведен анализ возможности их корреляции с радиогалактикой Centaurus A.

A SEARCH FOR ULTRA-HIGH-ENERGY COSMIC RAY SOURCES. FRI RADIO GALAXY CENTAURUS A, by Sushchov O. B., Kobzar O. O., Hnatyk B. I., Marchenko V. V. — The propagation of ultra-high-energy cosmic rays in the galactic and extragalactic magnetic fields is investigated. The motion of charged particles of different energies and chemical composition is simulated using different galactic magnetic field models. Positions for the real sources' of the events registered at the Auger Observatory are

calculated taking into account the influence of both galactic and extragalactic turbulent fields. The possibility of their correlation with the Centaurus A radio galaxy is analysed.

ВСТУП

Космічні промені (КП) — потоки високоенергетичних субатомних частинок, фотонів чи нейтрино, що породжують широкі атмосферні зливи вторинних частинок при взаємодії з молекулами найбільш поширених у верхніх шарах земної атмосфери елементів — азоту і кисню. Космічні промені з енергією $E > 10^{19}$ еВ потрапляють на Землю з періодичністю менш ніж одна подія за рік на 1 км^2 території в розрахунку на тілесний кут 1 стерадіан (тобто енергетичний потік складає $30 \text{ еВ/см}^{-2}\text{с}$) [30].

Чіткого критерію щодо того, які енергії КП називати надвисокими, немає. Як правило, це енергії понад 10^{19} еВ. Вважається, що космічні промені надвисоких енергій (КПНВЕ) мають позагалактичне походження внаслідок відсутності у межах нашої Галактики джерел, достатньо потужних для їхнього прискорення, та завдяки майже ізотропному великомасштабному розподілу КП за напрямками входження у земну атмосферу [3]. Гіпотеза про астрофізичну природу КПНВЕ підтверджується також спостереженням ефекту Грейзена — Зацепіна — Кузьміна [15, 34] (так званого ГЗК-обрізання енергетичного спектру КП) як в експерименті HiRes [1], так і у спостереженнях обсерваторії Auger [2].

На шляху поширення від своїх джерел до Сонячної системи КП зазнають втрат енергії внаслідок червоного зміщення, утворення піонів та електрон-позитронних пар при взаємодії з реліктовими фотонами. Цими процесами визначається горизонт КП — типова відстань, з якої КП можуть досягти Землі, маючи при цьому кінцеву енергію, що перевищує певну величину. Як для протонів, так і для ядер заліза з енергією $E > 10^{20}$ еВ 70 % можливих джерел мають бути розташовані у межах 70 Мпк від Землі, а для КП з енергією $E > 6 \cdot 10^{19}$ еВ — у межах 250 Мпк [19].

Існування кореляції між КП та галактиками з каталогу активних ядер галактик (АЯГ) Veron-Cetti-Veron (VCV) [33] — одне з можливих пояснень природи КПНВЕ у припущенні, що вони мають позагалактичне походження та залежний від енергії горизонт, що узгоджується з даними про ГЗК-обрізання. Однак лише спостережних даних з кореляції недостатньо для остаточного твердження про те, що джерелами КПНВЕ є АЯГ, оскільки їхній розподіл корелює з розподілом звичайних галактик (тобто, розподілом матерії в цілому), і тому вони можуть бути лише індикатором справжніх джерел [10]. Окрім АЯГ, як прискорювачі позагалактичних космічних променів у різні часи пропонувались такі класи астрофізичних об'єктів, як гамма-спалахи, молоді магнетари та ударні хвилі в областях формування великомасштабної

структури. Теоретичні оцінки вимагають, щоб потенційні джерела КП були достатньо потужними для прискорення частинок до надвисоких значень енергії. З-поміж стабільних астрофізичних об'єктів у межах червоного зміщення $z = 1$ лише декілька (зокрема радіогалактики Фанароффа — Райлі типу I та II) мають фізичні умови, сприятливі для прискорення протонів до надвисоких енергій. Щоправда, ці умови можуть реалізовуватися для деяких класів змінних джерел (тобто таких, для яких тривалість активності є меншою, ніж часова затримка руху КП, спричинена космічними магнітними полями на шляху їхнього поширення), а саме спалахів в АЯГ, молодих магнетарів, гамма-спалахів. Для важких ядер коло потенційних джерел розширюється, тому що їхнє прискорення може відбуватися менш потужними астрофізичними об'єктами. Якщо насправді реалізується цей випадок, то давати внесок у спостережуваний потік КПНВЕ можуть декілька найближчих радіогалактик або навіть одиночна галактика типу Centaurus A. З кола можливих кандидатів також не виключаються «радіотихі» АЯГ та гамма-спалахи [16].

Енергетичний спектр, спостережуваний на земній поверхні, не є ідентичним до початкового спектру генерації КП. На його формування впливають галактичне та позагалактичне магнітні поля та взаємодія КП з мікрохвильовим фоном. Важкі ядра можуть бути прискорені до більших значень енергії, ніж протони, що у високоенергетичній ділянці спектру може призвести до поступового переходу від протонного складу КП до більш важкого (аж до залізного) [13]. Наявність так званої «щиколотки» — зменшення крутизни спектру в околі $5 \cdot 10^{18}$ eV — може трактуватися або як свідчення переходу від галактичних до позагалактичних джерел КПНВЕ при відповідній енергії, або як спотворення переважно протонного спектру КП внаслідок народження пар e^+e^- при взаємодії протонів з фотонами реліктового випромінювання [5].

Результати досліджень хімічного складу КП, отримані обсерваторією Auger, показують, що, починаючи з енергій порядку 10^{19} eV, він змінюється у бік домінування важких ядер вже при енергіях $3 \cdot 10^{19}$ eV. Дані Yakutsk EAS Array [14] про мюонну складову атмосферних злив, також свідчать про зміщення хімічного складу КПНВЕ у бік важких ядер, проте виміри HiRes та попередні дані Telescope Array [18] узгоджуються з гіпотезою про переважно протонний склад КП. Питання про причину розбіжності висновків основних експериментів залишається відкритим.

Анізотропія напрямків приходу КПНВЕ та їхня кореляція з можливими джерелами, зокрема з АЯГ, поряд з енергетичним спектром та хімічним складом є важливими областями дослідження КПНВЕ у спробі зрозуміти їхню природу та походження. Якщо зареєстроване спадання потоку КП дійсно зумовлене ГЗК-ефектом, то є відповідний ГЗК-горизонт порядку 100 Мпк, і КП з початковою енергією порядку 10^{20} eV, що надійшли з більших відстаней, реєструватимуться зі значно меншою енергією. Оскільки розподіл матерії в околі 100 Мпк на-

шої галактики не є ізотропним, це відкриває можливість у перспективі знайти анізотропію в зареєстрованих даних [31].

Згідно з результатами аналізу оновлених (більшої кількості) даних обсерваторії Auger [4] рівень кореляції зареєстрованих КПНВЕ з галактиками каталогу VCV зменшився з 3 до 2 у порівнянні з попереднім набором даних. Як наслідок, лише 30 % КПНВЕ потенційно корелюють з напрямками на АЯГ, а інші демонструють ознаки ізотропного розподілу. Виключення становить лише окіл найближчої до нас активної галактики Centaurus A, в якому зареєстровано ансамбль подій надвисокої енергії, значно численніший, ніж це слід було б очікувати зі статистичних міркувань.

В даній роботі ми перевіряємо можливість приналежності спостережуваних подій з околу Centaurus A КПНВЕ, прискореним саме в цій галактиці, розв'язуючи обернену задачу — відтворюючи траєкторії руху КП, зареєстрованих обсерваторією Auger в околі даної галактики, з урахуванням впливу галактичного та міжгалактичного магнітних полів, а також хімічного вмісту (заряду) частинок.

МОДЕЛЮВАННЯ

Магнітне поле викривляє траєкторію руху заряджених частинок КП внаслідок дії сили Лоренца. Якщо поле постійне в часі, то воно не впливає на енергію частинки. Враховуючи той факт, що типові значення енергії КП значно перевищують енергію спокою частинок, вважатимемо, що вони поширюються зі швидкістю, близькою до швидкості світла. В цьому випадку рівняння руху ультрарелятивістських частинок у магнітному полі $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ мають вигляд

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{qc^2}{E} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v},$$

де q — заряд частинки, E — її енергія; за умови, якщо Лоренц-фактор $\gg 1$ модуль вектора швидкості рівний $|\mathbf{v}| = c\sqrt{1 - 1/\gamma^2}$.

З огляду на складну структуру магнітного поля аналітичний розв'язок цих рівнянь неможливий, тому розрахунок траєкторії провадився шляхом чисельного моделювання.

МАГНІТНІ ПОЛЯ

Моделюючи рух космічних променів надвисоких енергій, ми враховували вплив як галактичного, так і позагалактичного магнітних полів. Магнітне поле галактики має регулярний та випадковий компоненти. Вважається [16, 17], що структура регулярного компонента у загальних рисах повторює розподіл матерії в галактиці. Джерела та структура міжгалактичного магнітного поля на сьогодні достеменно не

відомі. Тому при розв'язанні конкретних задач прийнято вважати, що воно має випадкову структуру [8].

Галактичне магнітне поле. А. Регулярна складова. Є ряд моделей, які описують регулярне магнітне поле галактики [29]. Вони відрізняються між собою як числовими значеннями параметрів, так і наявністю та структурою тих чи інших компонентів поля. Загалом регулярну складову галактичного магнітного поля зручно описувати спіральною структурою з 2-симетрією (осесиметричною, axisymmetric spiral (ASS)) або -симетрією (бісиметричною, bisymmetric spiral (BSS)) [28]. Для наших досліджень ми взяли найсучасніші моделі [20, 23, 24]. Вони передбачають розклад магнітного поля на дискову складову та поле галактичного гало. Зазначимо, що в роботах [23] і [20] для дискового поля приймається симетрія типу BSS (в роботі [24] розглядаються два різні типи симетрії дискового поля — як ASS, так і BSS, які далі ми вважатимемо окремими моделями).

Дискове поле має радіальну та азимутальну складові, які у площині диска в циліндричних координатах задаються виразами

$$\begin{aligned} B_r &= B(r, \varphi) \sin(p), \\ B_\varphi &= B(r, \varphi) \cos(p), \end{aligned}$$

де пітч-кут p — це кут між вектором індукції поля в даній точці та перпендикуляром до радіуса-вектора \mathbf{r} в цій точці.

Функція $B(r, \varphi)$ задається рівнянням логарифмічної спіралі:

$$B(r, \varphi) = B(r) \cos \left(\frac{1}{\text{tg}p} \ln \frac{r}{r_0} \right), \quad (1)$$

або

$$B(r, \varphi) = B(r) \cos \left(\frac{1}{\text{tg}p} \ln \frac{r}{R_\odot} \right). \quad (2)$$

Параметри в формулах (1) та (2) задаються виразами

$$\begin{aligned} \frac{1}{\text{tg}p} \ln \frac{r}{r_0} &= \frac{d}{R_\odot} - \frac{\varphi}{2}, \\ r_0 &= (R_\odot - d) \exp \left(-\frac{\varphi}{2 \text{tg}p} \right), \end{aligned}$$

де $R_\odot = 8.5$ кпк — відстань від центра Галактики до Сонячної системи, d — відстань від Сонячної системи до найближчої точки інверсії поля.

Функція радіального профілю $B(r)$ задається як

$$\begin{aligned} B(r) &= B_\odot \frac{R_\odot}{r \cos \varphi} = B_0 \frac{R_\odot}{r} \quad \text{для } r < R_c, \\ B(r) &= B_\odot \frac{R_\odot}{R_c \cos \varphi} = B_0 \frac{R_\odot}{R_c} \quad \text{для } r > R_c, \end{aligned}$$

де B_\odot — локальне поле поблизу Сонячної системи.

Таблиця 1. Параметри дискової складової галактичного магнітного поля

Модель поля	ρ , град	R_C , кпк	d , кпк	ρ_0 , кпк	z_0 , кпк	B_ϕ , нТл	B_0 , нТл
[23]	-10	4.0	—	9.0	1.0	—	0.3
[20]	-8	4.0	-0.5	—	0.2	0.2	—
[24] ASS	-5	5.0	-0.6	—	1.0	0.2	—
BSS	-6	5.0	-0.6	—	1.0	0.2	—

Висотний профіль дискового поля над галактичною площиною та під нею вважається експоненціально спадним:

$$B(r, z) = B(r) \exp\left(-\frac{|z|}{z_0}\right).$$

Відмінності застосованих моделей полягають головним чином у виборі форми поля — (1) або (2), та значеннях параметрів, які наведено у табл. 1.

У моделях [23] і [20] поле галактичного гало містить дипольну та тороїдальну складові, а у моделі [24] — лише тороїдальну. Для тороїдального поля використовується модель дисків, розташованих над галактичною площиною та під нею. Компоненти тороїдального поля задаються виразами

$$B_x = B_T \text{sign}(z) \left(1 - \frac{|z|}{h}\right)^{2-1} \cos \theta,$$

$$B_y = B_T \text{sign}(z) \left(1 - \frac{|z|}{h}\right)^{2-1} \sin \theta,$$

де h — висота дисків над галактичною площиною та під нею, w — півширина розподілу Лоренца.

Функція B_T у моделі [23] має вигляд

$$B_T = B_{T \max} \left(1 - \frac{r}{R_T}\right) \exp\left(-\frac{r}{R_T}\right),$$

а у моделі [20] —

$$B_T = B_{T \max} \left(1 - \frac{r}{R_T}\right) \exp\left(-\frac{R_T - r}{R_T}\right),$$

де θ — функція Хевісайда, R_T — характерний радіус тора.

У моделі [24]

$$B_T = B_{T \max} \frac{r}{R_T} \exp\left(-\frac{R_T - r}{R_T}\right).$$

Дипольний компонент поля описується стандартними рівняннями:

Таблиця 2. Параметри магнітного поля галактичного гало

Модель поля	R_T , кпк	h , кпк	w , кпк		$B_{T\max}$, нТл		G , нТл кпк ³
[23]	15.0	1.5	0.3		0.1		10.0
[20]	8.5	1.5	0.3		0.1		12.3
[24] ASS	8.0	1.3	0.25 (Вн)	0.4 (Зов)	0.4 (Пн)	0.2 (Пд)	—
BSS	8.0	1.3	0.25 (Вн)	0.4 (Зов)	0.4 (Пн)	0.4 (Пд)	—

$$B_x = 3 G \cos \theta \sin \theta \sin \phi / r^3,$$

$$B_y = 3 G \cos \theta \sin \theta \cos \phi / r^3,$$

$$B_z = G(1 - 3 \cos^2 \theta) / r^3,$$

де $\sqrt{r^2 - z^2}$, $\cos \theta = z/r$, $\sin \theta = r/\sqrt{r^2 - z^2}$, G — магнітний дипольний момент. Числові значення параметрів вибраних моделей наведено в табл. 2.

Б. Випадкова складова. Вважається [6], що вплив випадкового компонента галактичного магнітного поля зводиться до розширення діапазону можливих напрямків прибуття КПНВЕ відносно напрямку, який визначається відхиленням траєкторії в регулярному полі, приховуючи таким чином важливу інформацію щодо реального положення джерела КП. За певних умов це може призвести до так званого ефекту «лінзування» КП у магнітному полі та утворення декількох зображень джерела КП [13]. Проте дослідження такого впливу може бути корисним для вивчення властивостей галактичного магнітного поля та руху КП.

Для надвисоких енергій КП характерні значення ларморівського радіуса набагато перевищують довжину когерентності поля l_0 , під якою розуміють відстань, на якій відбувається випадкова зміна орієнтації поля. Тому для врахування ефекту, спричиненого випадковим магнітним полем, достатньо двох параметрів: l_0 та величини поля B_{rms} [12]. Поле B_{rms} характеризується експоненціально спадним висотним профілем $B_{rms} = B_{rms0} \exp(-|z|/z_0)$ [11].

Згідно зі спостережними даними випадковий компонент галактичного магнітного поля є сумірним з регулярною складовою [23]. В даній роботі ми використували значення $l_0 = 50$ пк, $B_{rms0} = 0.4$ нТл, $z_{rms0} = 3$ кпк [13].

Відхилення КП у випадковому магнітному полі на пройденому шляху L задається виразом [9]

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{2}{9} \frac{Ze}{E} c^2 \langle B^2 \rangle L l_0, \quad (3)$$

де Ze — заряд частинки, E — її енергія.

Для космічних променів надвисоких енергій, які реєструються наземними детекторами, відстань, пройдену в галактичному турбулентному полі, можна оцінити як

$$L_{gal} = \min(z_0 / \sin b_G; L_{max} = 20 \text{ кпк}),$$

де b_G — галактична широта напрямку приходу КП. Звідси отримаємо величину кінцевого відхилення КП

$$= 22^\circ Z \frac{L_{gal}}{1 \text{ кпк}}^{1/2} \frac{E}{10^{18} \text{ еВ}}^{-1}.$$

Міжгалактичне магнітне поле. Всесвіт містить структури, що складаються з кластерів галактик, філаментів, шарів підвищеної густини та пустот (войдів) з пониженою густиною. Припускають, що магнітне поле у структурних елементах посилюється внаслідок утворення великомасштабної структури, а різні чисельні моделювання цього процесу показують, що розподіл міжгалактичного магнітного поля узгоджується з розподілом матерії [26, 27]. Астрофізичні об'єкти, в тому числі джерела КПНВЕ, зазвичай розміщуються всередині структурованих областей. Таким чином, ці магнітні структури, як і галактичне магнітне поле, обов'язково впливають на поширення космічних променів. Структуроване міжгалактичне магнітне поле впливає як на відхилення КП, так і на час їхнього поширення до спостерігача.

Згідно з останніми дослідженнями в гамма-діапазоні міжгалактичне магнітне поле у войдах складає величину порядку 10^{-19} Тл [7], що правда ці оцінки є суперечливими; попередня оцінка нижньої границі магнітного поля складає 10^{-21} — 10^{-23} Тл [31].

В наших розрахунках ми дотримувалися найпростішої моделі, згідно з якою простір розбито на кубічні комірки розміром l_k , поле вважається однорідним у межах окремої комірки, а його напрямок змінюється від однієї комірки до іншої випадковим чином. Для обмеження величини поля B ми використали оцінку, що впливає зі спостережних даних фарадеевого обертання площини поляризації далеких об'єктів [22]:

$$\langle B \rangle \sqrt{l_{0eg}} = 10^{-13} \text{ Тл Мпк}^{1/2},$$

де l_{0eg} — довжина когерентності магнітного поля. Взагалі l_{0eg} не строго дорівнює l_k , проте для задачі поширення КПНВЕ у міжгалактичному магнітному полі ця відмінність не є критичною.

Для випадкового міжгалактичного магнітного поля, як і для випадкового компонента галактичного поля, відхилення КП знаходиться за формулою (3).

Враховуючи обмеження на величину позагалактичного магнітного поля, отримаємо числові значення відхилень для КП з енергією E і зарядом Z , які надходять від довільних джерел, розташованих на відстані L_0 :

$$= 25^\circ Z \frac{L_0}{1 \text{ Мпк}}^{1/2} \frac{E}{10^{18} \text{ еВ}}^{-1}.$$

РЕЗУЛЬТАТИ

Загальний вплив магнітного поля на відхилення космічних променів. У першому наближенні ми відтворювали рух КП у магнітному полі, врахувавши лише регулярну складову. При цьому було застосовано метод зворотних траєкторій («back tracking»), суть якого полягає в наступному. Після висновку щодо заряду частинки, яка відповідає зареєстрованій події, моделюється рух античастинки, що вилітає з Землі протилежно до напрямку надходження зареєстрованого КП, і має таку саму енергію. За цих умов траєкторія руху античастинки відтворюватиме траєкторію реального КП. Таким чином, можна розрахувати можливі положення реального джерела кожної зареєстрованої події залежно від її хімічного складу.

Другим уточнювальним кроком було врахування випадкового магнітного поля. Його вплив полягає у розширенні області можливої локалізації джерела, при тому що його положення, розраховане у першому наближенні, залишалось незмінним. Ми можемо оцінити тільки величину середнього відхилення траєкторії у випадковому полі, тоді як напрям відхилення, який залежить від конкретної реалізації випадкового поля вздовж траєкторії, залишається невизначеним. Тому без додаткових знань про структуру випадкового компонента метод зворотних траєкторій можна застосовувати до відносно близьких об'єктів та до КП з невеликим зарядом, коли випадковий компонент несуттєво спотворює відтворені траєкторії.

На рис. 1 наведено картини відхилення траєкторій КПНВЕ в галактичних координатах, розраховані з використанням різних моделей регулярного магнітного поля Галактики. Точками позначено напрямки, в яких запускались із Землі ядра з енергією 10^{20} еВ. Кругами позначено напрям їхнього руху в позагалактичному просторі після відхилення в регулярному галактичному полі. Світлі точки віддаляються від чорних у порядку зростання заряду ядер, що запускаються з Землі, від 1 до 10.

Слід зазначити, що зображення на рис. 1 є спотвореними, особливо у приполярних областях. Тому для визначення реальної кутової відстані на небесній сфері між двома точками з координатами $(l_{G1}; b_{G1})$ і $(l_{G2}; b_{G2})$ слід застосовувати формулу

$$\arccos(\sin b_{G1} \sin b_{G2} + \cos b_{G1} \cos b_{G2} \cos(l_{G2} - l_{G1})).$$

Порівнюючи результати, отримані для різних моделей, можна виділити такі закономірності.

1. Для всіх моделей має місце асиметрія відхилень КП відносно галактичної площини. Це можна пояснити різними типами симетрії складових поля відносно цієї ж площини (дискова складова є симетричною, а тороїдальна — антисиметричною).

2. В області низьких широт ($|b_G| < 30^\circ$) має місце сильна залежність поведінки поля від конкретної моделі. Очевидно, що при наближенні

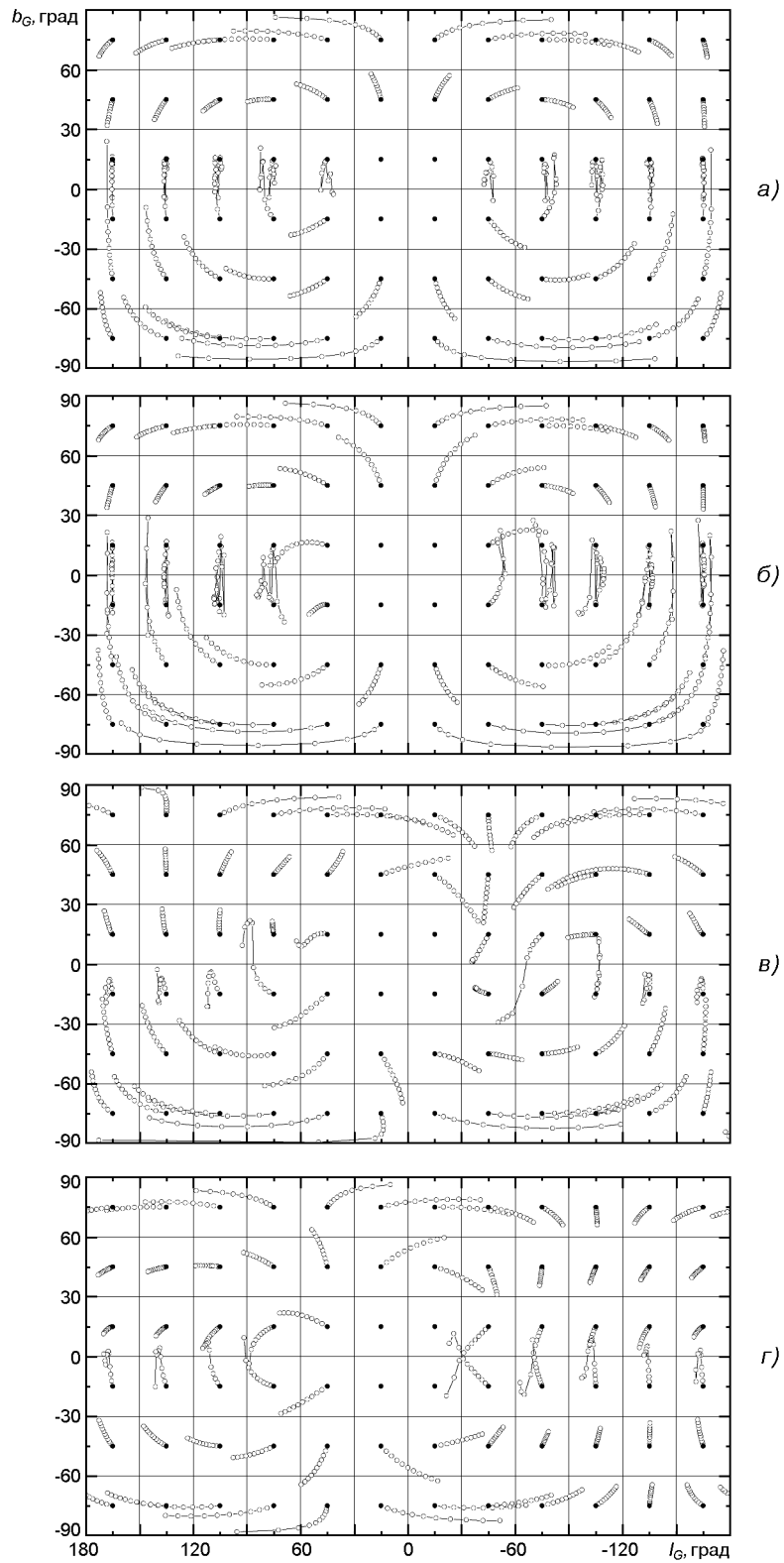


Рис. 1. Відхилення космічних променів в регулярному галактичному полі, розраховані за різними моделями: *а* — модель [24], симетрія типу ASS, *б* — модель [24], симетрія типу BSS, *в* — модель [23], *г* — модель [20]

до галактичної площини траєкторії руху зазнають впливу головним чином дискової складової поля. Тому вони стають більш чутливими до нюансів моделей, пов'язаних зі спіральною структурою цього компонента, а саме вибору значення пітч-кута, відстані від Сонячної системи до найближчої точки інверсії поля тощо.

3. В околі центру Галактики структура поля достеменно невідома, і його величина може сягати величин значно більших, ніж на периферії. Тому при наближенні до цієї точки дуже суттєвою стає залежність від способів, якими в різних моделях задається магнітне поле в центральній області для якісно правильного описання характеру спостережуваних філаментів [23]. Внаслідок різкої немонотонності розрахованих траєкторій ми виключили з розгляду центральну область, оскільки вона заслуговує детальнішого дослідження.

4. В областях $|b_G| > 30^\circ$ загальна картина розрахованих відхилень КП цілковито узгоджується з наявністю тороїдального компонента поля. Відсутність дипольної складової в обох моделях [24] пояснює якісну симетрію відхилень відносно меридіана, який проходить через напрямок на галактичний центр (рис. 1, а, б). Наявність дипольної складової в моделях [23] та [20] призводить до повороту цієї площини симетрії відносно нульового меридіана на деякий кут (рис. 1, в, г). При цьому в північній та південній частинах кут повороту дещо відрізняється (рис. 1, в).

5. В цілому спільні закономірності, отримані для різних моделей магнітного поля, можна пояснити подібною структурою поля (спіральне дискове поле та поле галактичного гало), а відмінності — наявністю дипольної складової в одних моделях та її відсутністю в інших, а також різними значеннями параметрів, що використовуються в різних моделях.

Centaurus A. В околі найближчої до Сонячної системи активної галактики Centaurus A обсерваторією Auger було зареєстровано групу КПНВЕ, походження яких імовірно пов'язане з даною галактикою [4]. Ми промодельювали рух цих КП у магнітному полі згідно з описаною вище методикою.

На рис. 2 наведено результати розрахунків, виконаних з використанням різних моделей регулярного галактичного магнітного поля. Кружками з цифровими позначеннями показано положення подій, зареєстрованих обсерваторією Auger. Кружки з позначеннями хімічних елементів відповідають розрахованим положенням джерел КПНВЕ для зазначеного типу частинок. Радіуси всіх кругів відповідають експериментальній похибці детекторів Auger в довірчому інтервалі 1σ . Результати, приведені на рис. 2, а, було отримано для моделі [23], а на рис. 2, б — для моделі [20]. На рисунках також показано контури областей радіовипромінювання Centaurus A. В цих областях, як відомо [25], є умови, необхідні для прискорення космічних променів до надвисоких енергій.

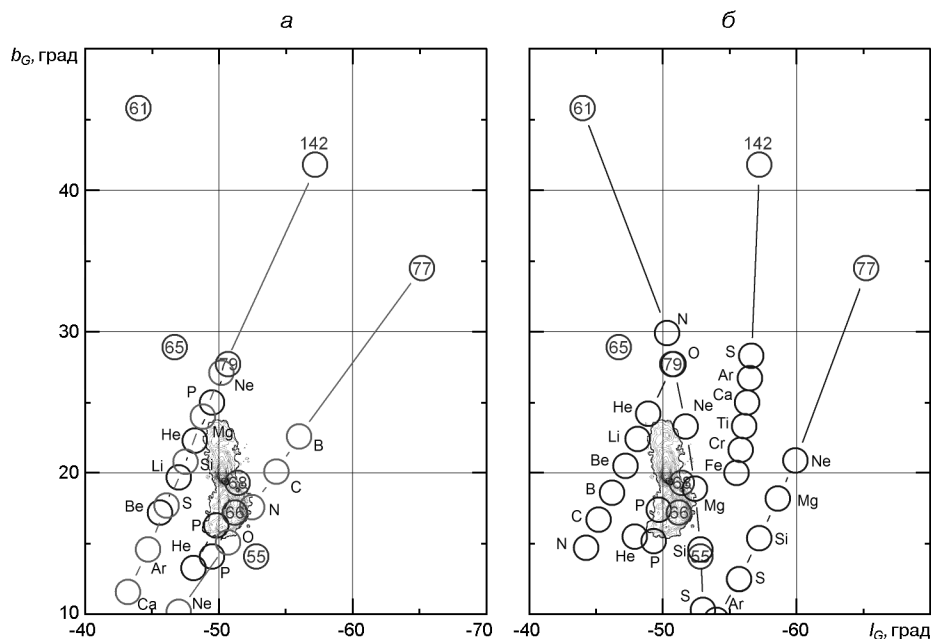


Рис. 2. Положення джерел космічних променів надвисоких енергій, розраховані за різними моделями: *а* — модель [23], *б* — модель [21]

Накладання кіл, що відповідають розрахованим положенням джерел, на зображення Centaurus A було вибрано в якості критерію, за яким встановлювалась кореляція цих подій з даною галактикою. Причому врахування випадкового компонента галактичного поля, а також міжгалактичного поля лише розширювало область можливої локалізації джерела, не змінюючи його положення.

В результаті було виявлено, що не всі промені з околу Centaurus A можуть походити від цієї галактики, а лише шість — з енергіями 61, 66, 68, 77, 79 та 142 EeV. У табл. 3 для подій заданої енергії вказано хімічний склад частинок, що корелюють з Centaurus A за двома обраними моделями галактичного поля при врахуванні впливу різних компонентів магнітного поля (РГ — регулярне галактичне поле, ВГ — випадкове галактичне поле, МГ — міжгалактичне поле).

На рис. 3 наведено розміри областей локалізації КП, що корелюють з Centaurus A, оцінені з урахуванням можливих відхилень як у випадковому галактичному, так і у міжгалактичному магнітному полі.

ВИСНОВКИ

В рамках сучасних моделей галактичного та міжгалактичного магнітного полів для радіогалактики Centaurus A як найближчого об'єкта, що міг би бути джерелом деяких спостережуваних КПНВЕ, було отримано, що Centaurus A може бути джерелом ряду подій, зареєстрованих

Таблиця 3. Кореляція космічних променів надвисоких енергій з Centaurus A

Енергія КП, ЕеВ	Хімічний склад космічних променів					
	РГ	РГ+ВГ	РГ+ВГ+МГ	РГ	РГ+ВГ	РГ+ВГ+МГ
	Модель [23]			Модель [20]		
142	Mg	Mg — Ar	Ne — Ca	—	Ca — Fe	S — Fe
79	He	He — Li	p — Be	He — Li	He — C	He — N
77	N — O	C — Ne	B — Ne	—	Mg — Ar	Ne — Ar
68	p	p	p — He	p	p — He	p — He
66	—	p	p	p	p	p
61	—	—	—	Ne — Mg	O — S	N — S
	Модель [24] — симетрія ASS			Модель [24] — симетрія BSS		
68	p	p	p	—	—	p
66	p	p	p	—	—	p

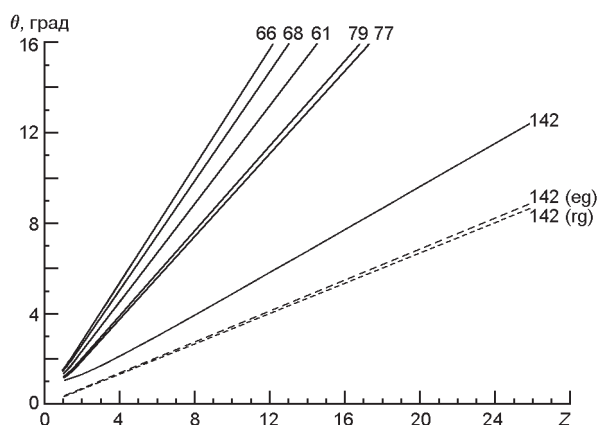


Рис. 3. Розміри областей локалізації космічних променів внаслідок відхилень у випадкових магнітних полях. Суцільні лінії — результуюче відхилення з урахуванням міжгалактичного та галактичного випадкових полів, а також похибки детектора Auger. Штрихові лінії побудовано з урахуванням відхилень лише в міжгалактичному (eg) або галактичному (rg) випадкових полях на прикладі космічних променів з енергією 142 ЕеВ

обсерваторією Auger в його околі, причому моделі [23] і [20] дають подібні результати. Згідно з розрахунками за моделлю [23] п'ять подій корелюють з Centaurus A, у випадку моделі [20] таких подій шість. У всіх випадках можливої кореляції з досліджуваним об'єктом для обох моделей спостерігається спільна тенденція — зміщення хімічного складу КП у бік важких ядер при збільшенні енергії відповідної події. Цей результат узгоджується з висновками обсерваторії Auger щодо хімічного складу КПНВЕ.

З іншого боку, при врахуванні моделей, запропонованих в роботі [24], лише два з досліджуваних КП корелюють з Centaurus A у тому випадку, якщо вони є протонами. Цей результат узгоджується з висновками обсерваторії HiRes.

Урахування впливу випадкових полів, як галактичного, так і міжгалактичного, призводить до збільшення кількості можливих типів

ядер, які корелюють з Centaurus A, однак при цьому зменшується рівень достовірності приналежності подій до джерела Centaurus A.

Таким чином, відносна близькість джерела Centaurus A до нашої Галактики дозволяє застосувати метод зворотних траєкторій до оцінки можливого вкладу Centaurus A у спостережуваний потік КПНВЕ, зокрема у події, напрямки приходу яких близькі до напрямку на Centaurus A. В рамках сучасних моделей галактичного магнітного поля ряд спостережуваних детектором Auger подій відповідають КПНВЕ, прискореними в Centaurus A. Подальше збільшення кількості спостережуваних подій з області Centaurus A та вдосконалення моделей галактичного та міжгалактичного магнітного полів будуть мати вирішальне значення для підтвердження можливості прискорення КПНВЕ в активних галактиках типу Centaurus A.

1. *Abbasi R. U., Abu-Zayyad T., Allen M., et al. (HiRes Collaboration)*. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression // *Phys. Rev. Lett.*—2008.—**100**.—id. 101101.
2. *Abraham J., Abreu P., Aglietta M., et al. (The Pierre Auger Collaboration)*. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above $4 \cdot 10^{19}$ eV // *Phys. Rev. Lett.*—2008.—**101**.—id. 061101.
3. *Abraham J., Abreu P., Aglietta M., et al. (The Pierre Auger Collaboration)*. Astrophysical sources of cosmic rays and related measurements with the Pierre Auger Observatory // *arXiv:0906.2347 [astro-ph.HE]*.—2009.
4. *Abreu P., Aglietta M., Ahn E. J., et al. (The Pierre Auger Collaboration)*. Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter // *Astroparticle Phys.*—2010.—**34**.—P. 314—326.
5. *Abreu P., Aglietta M., Ahn E. J., et al. (The Pierre Auger Collaboration)*. Search for first harmonic modulation in the right ascension distribution of cosmic rays detected at the Pierre Auger Observatory // *arXiv:1103.2721v1 [astro-ph.HE]*.—2011.
6. *Abreu P., Aglietta M., Ahn E. J., et al. (The Pierre Auger Collaboration)*. Search for signatures of magnetically-induced alignment in the arrival directions measured by the Pierre Auger Observatory // *arXiv:1111.2472v1 [astro-ph.HE]*.—2011.
7. *Ando S., Kusenko A.* Evidence for gamma-ray halos around active galactic nuclei and the first measurement of intergalactic magnetic fields // *Astrophys. J. Lett.*—2010.—**722**.—P. L39—L44.
8. *Beck R.* Galactic and extragalactic magnetic fields // *Space Sci. Revs.*—2001.—**99**.—P. 243—260.
9. *Berezinsky V. S., Grigorieva S. I., Hnatyk B. I.* Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at 10^8 — 10^9 GeV // *Astroparticle Phys.*—2004.—**21**, N 6.—P. 617—625.
10. *Farrar G. R., Zaw I., Berlind A. A.* Correlations between ultrahigh energy cosmic rays and AGNs // *arXiv:0904.4277v1 [astro-ph.HE]*.—2009.
11. *Giacinti G., Derks X., Semikoz D. V.* Search for single sources of ultra high energy cosmic rays on the sky // *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*—2010.—N 3.—P. 022—041.
12. *Giacinti G., Kachelriess M., Semikoz D. V., Sigl G.* Ultrahigh energy nuclei in the turbulent Galactic magnetic field // *Astroparticle Phys.*—2010.—**35**.—P. 192—200.
13. *Giacinti G., Kachelriess M., Semikoz D. V., Sigl G.* Propagation of ultrahigh energy nuclei in the magnetic field of our Galaxy // *arXiv:1108.0362v2 [astro-ph.HE]*.—2011.

14. *Glushkov A. V., Makarov I. T., Pravdin M. I., Sleptsov I. E.* Muon content of ultrahigh-energy air showers: Yakutsk data versus simulations // *JETP Lett.*—2008.—**87**.—P. 190—194.
15. *Greisen K.* End to the cosmic-ray spectrum? // *Phys. Rev. Lett.*—1966.—**16**.—P. 748—750.
16. *Han J. L.* New knowledge of the Galactic magnetic fields // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.*—2008.—**175**.—P. 62—69.
17. *Han J. L.* The magnetic structure of our Galaxy: a review of observations // *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium.*—2009.—**259**.—P. 455—466.
18. *Jui C. C. H. (The Telescope Array Collaboration).* Cosmic ray in the northern hemisphere: results from the telescope array experiment // *arXiv:1110.0133v1 [astro-ph.IM]*.—2011.
19. *Kachelriess M., Parizot E., Semikoz D. V.* The GZK horizon and constraints on the cosmic ray source spectrum from observations in the GZK regime // *JETP Lett.*—2009.—**88**.—P. 553—557.
20. *Kachelriess M., Serpico P. D., Teshima M.* The Galactic magnetic field as spectrograph for ultra-high energy cosmic rays // *Astroparticle Phys.*—2007.—**26**.—P. 378—386.
21. *Kronberg P. P.* Extragalactic magnetic fields // *Repts Progr. Phys.*—1994.—**57**.—P. 325—382.
22. *Murase K., Takami H.* The role of structured magnetic fields on constraining properties of transient sources of ultra-high-energy cosmic rays // *arXiv:1110.3245v1 [astro-ph.HE]*.—2011.
23. *Prouza M., Smida R.* The Galactic magnetic field and propagation of ultra-high energy cosmic rays // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**410**.—P. 1—10.
24. *Pshirkov M. S., Tinyakov P. G., Kronberg P. P., Newton-McGee K. J.* Deriving global structure of the galactic magnetic field from Faraday rotation measures of extragalactic sources // *arXiv:1103.0814v2 [astro-ph.HE]*.—2011.
25. *Rieger F. M., Aharonian F. A.* Centaurus A as TeV gamma-ray and possible UHE cosmic-ray source // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**506**.—P. L41—L44.
26. *Ryu D., Kang H., Cho J., Das S.* Turbulence and magnetic fields in the large-scale structure of the universe // *Science.*—2008.—**320**.—P. 909.
27. *Sigl G., Miniati F., Ensslin T. A.* Ultrahigh energy cosmic ray probes of large scale structure and magnetic fields // *Phys. Rev. D.*—2004.—**70**.—id. 043007.
28. *Stanev T.* Ultra high energy cosmic rays and the large scale structure of galactic magnetic field // *Astrophys. J.*—1997.—**479**.—P. 290—295.
29. *Sutherland M. S., Baughman B. M., Beatty J. J.* CRT: A numerical tool for propagating ultra-high energy cosmic rays through Galactic magnetic field models // *Astroparticle Phys.*—2010.—**34**.—P. 198—204.
30. *Taylor A. M., Ahlers M., Aharonian F. A.* The need for a local source of UHE CR nuclei // *arXiv:1107.2055v1 [astro-ph.HE]*.—2011.
31. *Taylor A. M., Vovk I., Neronov A.* EGMF constraints from simultaneous GeV-TeV observations of blazars // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**529**.—id. A144.
32. *Veberic D. (The Pierre Auger Collaboration)* The end of the cosmic ray spectrum // *arXiv:1110.0615v1 [astro-ph.HE]*.—2011.
33. *Veron Cetty M.-P., Veron P.* A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**518**.—id. A10.
34. *Zatsepin G., Kuzmin V.* On cosmic ray interactions with photons // *Can. J. Phys.*—1967.—**46**.—P. 617—625.