

УДК 524.1+524.7

А. А. Елиїв, Б. І. Гнатик

Науково-дослідна лабораторія «Астрономічна обсерваторія»  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
04053 Київ-53, вул. Обсерваторна 3

### Формування спектру космічних променів в області надвисоких енергій: вплив міжгалактичних магнітних полів та очікуваний вклад окремих джерел

*Досліджено вплив позагалактичного магнітного поля на поширення космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ). Розподіл магнітного поля у Місцевому Всесвіті відтворено на основі каталогу інфрачервоних галактик IRAS PSCz. Використовувалась степенева залежність між величиною поля та густиною інфрачервоної світності галактик ( $B = K\rho^\beta$ ). На відміну від попередніх робіт, де показник степеня  $\beta = 2/3$  відповідав умові вмороженості, параметри  $K$  та  $\beta$  визначалися на основі нормування величини поля на його очікувані максимальні («сильне поле») та мінімальні («слабке поле») значення в скупченнях галактик та пустотах відповідно. Побудовані карти відхилень КПНВЕ для цих моделей магнітного поля. Виявлено, що величина відхилення протонів з  $E > 4 \cdot 10^{19}$  eV від джерел у сфері з радіусом 100 Мпк є незначною (сумірна з похибками сучасних детекторів) лише у випадку моделі слабого магнітного поля. Досліджено модифікацію спектру КПНВЕ позагалактичним магнітним полем у випадку потенційних джерел Діва А та ARP 299.*

**ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: ВЛИЯНИЕ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ОЖИДАЕМЫЙ ВКЛАД ОТДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ, Элиев А. А., Гнатык Б. И.** — Исследовано влияние внегалактического магнитного поля на распространение космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ). Распределение магнитного поля в Местной Вселенной восстановлено на основе каталога инфракрасных галактик IRAS PSCz. Использовалась степенная зависимость между величиной поля и плотностью инфракрасной светимости галактик ( $B = K\rho^\beta$ ). В отличие от предыдущих работ, где показатель степени  $\beta = 2/3$  отвечал условию вмороженности, параметры  $K$  и  $\beta$  определялись на основе нормирования величины поля на его ожидаемые максимальные («сильное поле») и минимальные («слабое поле») значения в скоплениях галактик и в пустотах соответственно. Построены карты отклонений КЛСВЭ для этих моделей магнитного поля. Выведено, что величина отклонения протонов с  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ от источников в сфере радиуса 100 Мпк незначительна (соизмерима с погрешностями современных детекторов) только в случае модели слабого магнитного поля. Исследована модифи-

кація спектра КЛСВЭ внегалактическим магнитным полем в случае потенциальных источников Дева А и ARP 299.

*COSMIC RAY SPECTRUM FORMATION IN THE ULTRA-HIGH ENERGY REGION: THE EFFECT OF INTERGALACTIC MAGNETIC FIELD AND EXPECTED CONTRIBUTION FROM INDIVIDUAL SOURCES*, by Elyiv A. A., Hnatyk B. I. — *The effect of extragalactic magnetic field on the propagation of ultra-high energy cosmic rays (UHECR) is investigated. We used the IRAS PSCz catalogue in order to reconstruct the magnetic field in the Local Universe taking into account the power-law dependence between the magnetic field and infrared galaxy luminosity density ( $B = K\rho^\beta$ ). Contrary to the previous works with exponent  $\beta = 2/3$  corresponding to the freezing-in condition, we estimated  $K$  and  $\beta$  according to the expected maximum («strong field») and minimum («weak field») values of magnetic field in galaxy clusters and voids of the Local Universe, respectively. We constructed full-sky maps of expected deflection angles of UHECR in these extragalactic magnetic field models. It is found that average deflections of protons with energies above  $E > 4 \cdot 10^{19}$  eV from the sources in the sphere with a radius of 100 Mpc are negligible (comparable with errors of modern detectors) only in the case of the «weak» extragalactic magnetic field model. The modification of the UHECR spectrum by extragalactic magnetic field is investigated in case of Virgo A and ARP 299 as potential sources.*

#### ВСТУП

З'ясування природи космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) з енергіями понад  $4 \cdot 10^{19}$  еВ досі залишається нерозв'язаною астрофізичною проблемою [1, 15]. Окрім питання прискорення до таких високих енергій, актуальною є проблема поширення космічних променів (КП) на значні відстані у міжгалактичному просторі. Теоретичні розрахунки взаємодії КПНВЕ з мікрохвильовим фоном суттєво обмежують відстань до їхніх джерел внаслідок так званого ГЗК-обрізання (обрізання Грайзена—Зацепіна—Кузьміна) [12, 28]. Якщо результати японського експерименту AGASA, що вказують на відсутність ГЗК-границі [13, 15], не підтвердяться, джерела спостережуваних КПНВЕ з енергіями  $E \approx 10^{20}$  еВ повинні перебувати не далі ніж 50 Мпк.

Ситуація з відсутністю потенційних кандидатів на джерела КПНВЕ в околі 50 Мпк додатково ускладнюється впливом позагалактичного магнітного поля на поширення КПНВЕ (зокрема збільшенням шляху внаслідок викривлення траєкторій). Для оцінки ролі позагалактичного магнітного поля принципове значення має реалістичне моделювання його параметрів. Відомо кілька способів відтворення можливого розподілу позагалактичного магнітного поля. В історичному плані слід зазначити роботи [23, 17], в яких розподіл магнітного поля описувався простими моделями і був прив'язаний до таких великомасштабних структур, як Місцева Надкупчення, супергалактична стіна тощо. Досконалішим та реалістичнішим є спосіб відтворення магнітного поля на основі чисельних розрахунків еволюції речовини у Всесвіті, урахування темної матерії, використання магнітогідродинамічних процесів підсилення малого затравочного поля в ранню епоху до нинішніх величин та прив'язки до розподілу спостережуваних об'єктів [7, 8, 21]. Одночасно реалістичним та відносно простим є метод, представлений в роботі [22], де побудову моделі позагалактичного магнітного поля здійснено на основі залежності між густиною світності галактик в інфрачервоному діапазоні та енергією магнітного поля.

Нижче, використовуючи цей підхід, ми також відтворюємо позагалактичне магнітне поле, але при іншому калібруванні величини поля. Якщо в роботі [22] калібрування здійснювалося за значеннями поля 40 пТл в скупченні в Діві при  $\beta = 2/3$  в залежності між індукцією та густиною світності  $B = K\rho^\beta$ , то в нашій роботі параметри  $K$  та  $\beta$  визначалися на основі нормування величини поля на його очікувані максимальні («сильне поле») та мінімальні («слабке поле») значення у порожнинах та скупченнях галактик.

Для прийнятої моделі магнітного поля досліджувались кути відхилень КПНВЕ та будувались відповідні карти відхилень. З урахуванням взаємодії КПНВЕ з реліктовим випромінюванням [3] розраховано енергетичний спектр КПНВЕ в області енергій  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ від потенційних джерел КП зі степеневим спектром генерації ( $\gamma = 2.7$ ) — активної близької галактики Діва А та групи взаємодіючих галактик ARP 299. У припущенні, що ARP 299 є джерелом трьох КПНВЕ з  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ (детектор AGASA), кореляція з якими була виявлена в роботі [2], оцінено його світність в даному діапазоні.

#### МОДЕЛЮВАННЯ МІЖГАЛАКТИЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛУ ГАЛАКТИК КАТАЛОГУ IRAS PSCz

Позагалактичне магнітне поле ще й досі залишається мало вивченим та важкодоступним для спостереження. У деяких роботах [8, 20], присвячених моделюванню еволюції великомасштабної структури з врахуванням магнітного поля, показано, що магнітні поля відслідковують розподіл баріонної речовини. З іншого боку, спостереження надлишку величини фарадеївського обертання площини поляризації в напрямку на близькі скупчення галактик та спостереження рентгенівських гало навколо них вказують на тісний зв'язок між магнітним полем та розподілом галактик у Всесвіті [27].

В нашій роботі ми відтворюємо позагалактичне магнітне поле в рамках гіпотези про зв'язок індукції магнітного поля та густини баріонної речовини, яка, в свою чергу, пропорційна до світності IRAS-галактик в даному об'ємі [9, 22]. Для цього ми використали каталог галактик IRAS PSCz, відстань до яких менша за 100 Мпк. За процедурою, описаною в роботі [22], ми доповнили його до однорідного по світності та відтворили магнітне поле на основі нового способу калібрування його двопараметричної апроксимації — використовуючи результати спостережень скупчення галактик у Волосі Вероніки та оціночні значення поля у відомих порожнинах Місцевого Всесвіту.

Каталог галактик з фотометричними даними в інфрачервоній ділянці спектру, отриманий орбітальним телескопом IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) широко використовується для моделювання структури Місцевого Всесвіту. Супутник — спільний проект Великобританії, США та Нідерландів — працював упродовж січня — листопада 1983 р. За цей час він оглянув 84 % площі небесної сфери на довжинах хвиль  $\lambda = 12, 25, 60$  і 100 мкм. Одним з основних результатів роботи телескопа став каталог точкових джерел IRAS PSC (Point Source Catalog) [14], на основі якого було створено каталог PSCz з даними про червоні зміщення об'єктів [24]. Каталог містить 14677 галактик з відомими значеннями червоних зміщень та з потоком, вищим ніж 0.6 Ян на довжині хвилі 60 мкм. Для галактик скоректовано їхню швидкість на рух Сонця у Місцевій Групі галактик та обчислено відстань до них при  $H_0 = 71$  км/с. В нашій роботі для моделювання магнітного поля ми використали 6268 галактик у сфері радіусом 100 Мпк.

Для доповнення каталогу IRAS PSCz до однорідного за світністю відповідно до процедури [22] ми зробили такі кроки.

Згідно з [25] обчислено світність  $L_{60}$  галактик на довжині хвилі  $\lambda = 60$  мкм в одиницях повної світності Сонця  $L_{\odot} = 3.83 \cdot 10^{26}$  Дж/с:

$$L_{60} = 4\pi D^2 v_{60} f_{60} / L_{\odot},$$

де  $D$  — відстань,  $v_{60}$  — частота хвилі довжиною 60 мкм,  $f_{60}$  — потік на довжині хвилі 60 мкм. У приєкваторіальній області є зона уникання галактиками, пов'язана з інтенсивним поглинанням випромінювання в галактичному диску. Крім цього, через інструментальні особливості телескопа IRAS є ще кілька значно менших за площею подібних зон. Щоб позбутися даного ефекту, ми заповнили їх паралельним переносом галактик із найближчих сусідніх областей. Таким чином ми зберегли основну структуру розподілу речовини (скупчення, пустоти, філаменти).

Для досягнення однорідності каталогу за світністю використано метод, запропонований в роботі [22], що полягає у певній процедурі додавання у каталог нових галактик. Для цього повинна бути відомою функція світності галактик на довжині  $\lambda = 60$  мкм. Для каталогу PSCz вона взята з роботи [19]:

$$\varphi(L) = \varphi_* \left( \frac{L}{L_*} \right)^{1-\alpha} \exp \left( - \frac{1}{2\sigma^2} \left[ \lg \left( 1 + \frac{L}{L_*} \right) \right]^2 \right)$$

з параметрами:

$$L_*/L_{\odot} = (4.34 \pm 1.75) \cdot 10^8 h^{-2},$$

$$\alpha = 1.23 \pm 0.04, \quad \sigma = 0.724 \pm 0.01,$$

$$\varphi_* = (0.026 \pm 0.003) \cdot h^{-3} \text{ Мпк}^{-3}$$

[22].

Згідно з означенням  $\varphi(L)$  визначає об'ємну концентрацію галактик на декаду світностей [19]:

$$\varphi(L) = - \frac{d\Phi(L)}{d \lg L},$$

де  $\Phi(L)$  — концентрація галактик, яскравіших за  $L$ . На основі функції світності обчислено селекційну функцію  $\eta(r)$ , тобто відношення кількості видимих галактик до кількості всіх галактик на даній відстані  $r$ :

$$\eta(r) = \frac{\int_{L_{\min}(r)}^{\infty} \varphi(L) d \lg L}{\int_0^{\infty} \varphi(L) d \lg L},$$

де  $L_{\min}(r)$  — мінімальна світність галактик, спостережуваних на відстані  $r$ , що відповідає потоку  $f_{60} > 0.6$  Ян. Практично нижня та верхня межі інтегрування у знаменнику бралися рівними  $10^6 L_{\odot}$  та  $10^{12} L_{\odot}$  відповідно. Поділивши об'єм вибірки на концентричні сферичні шари товщиною 1 Мпк, та маючи селекційну функцію, можна обчислити кількість  $N_{add}$  невидимих телескопом IRAS галактик в даному шарі із світністю  $L > 10^6 L_{\odot}$ :

$$N_{add}(r) = N_{IRAS}(r) \left( \frac{1}{\eta(r)} - 1 \right),$$

де  $N_{IRAS}(r)$  — кількість галактик з оригінального каталогу PSCz в шарі

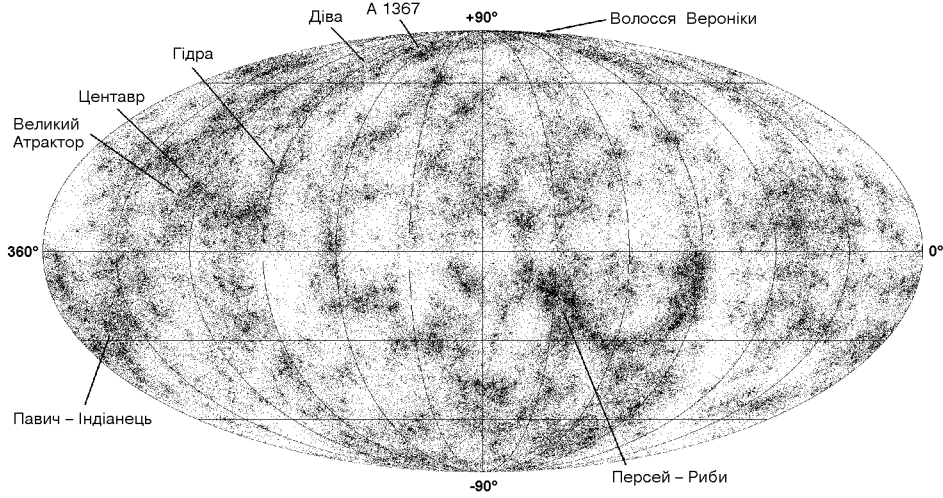


Рис. 1. Розподіл 291984 галактик зі світністю, вищою за  $10^6 L_{\odot}$  після додавання нових галактик. Галактична система координат

радіусом  $r$ . Для того щоб вибірка була повною, необхідно для кожного шару додати  $N_{add}(r)$  галактик. Доданим галактикам шару надано випадкові світності, розподілені згідно із законом  $\varphi(L)$  у межах від  $10^6 L_{\odot}$  до  $L_{min}(r)$ . Положення додаткових галактик визначалось так: випадково вибиралась оригінальна галактика каталогу PSCz з даного сферичного шару, далі згідно з нормальним розподілом задавалась відстань  $p$  від неї до доданої:

$$f(p, r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{l(r)} \exp\left(-\frac{p^2}{2l(r)^2}\right).$$

Тут характерна відстань  $l(r)$  між галактиками каталогу PSCz на даній глибині  $r$  вибірки визначається з умови

$$\frac{4\pi}{3} l(r)^3 n(r) = 1,$$

де  $n(r)$  — середня концентрація оригінальних галактик в шарі радіусом  $r$ . Насамкінець випадково вибирались кутові координати доданої галактики в системі відліку оригінальної. Таким чином, після додавання нових галактик, отримано всього 291984 галактик, що становлять однорідну за світністю та за відстанню вибірку в околі 100 Мпк (рис. 1, 2). Як видно з рис. 1, після додавання нових галактик зберігся загальний вигляд розподілу речовини та підсилюється контраст великомасштабних структур.

Для відтворення позагалактичного магнітного поля використано степеневу залежність індукції магнітного поля від густини світності галактик в інфрачервоному діапазоні  $B \propto \rho_L^\beta$ . Для зручності простір вибірки до 100 Мпк поділено на кубічні елементи з ребром 1 Мпк. Сумуючи світності галактик в кожному з них, ми обчислили просторовий розподіл густини світності галактик. Приймалось, що середня величина магнітного поля в кожному кубіку складає

$$B(\mathbf{r}) = B_0 \left( \frac{\rho_L(\mathbf{r})}{\rho_{L_0}} \right)^\beta.$$

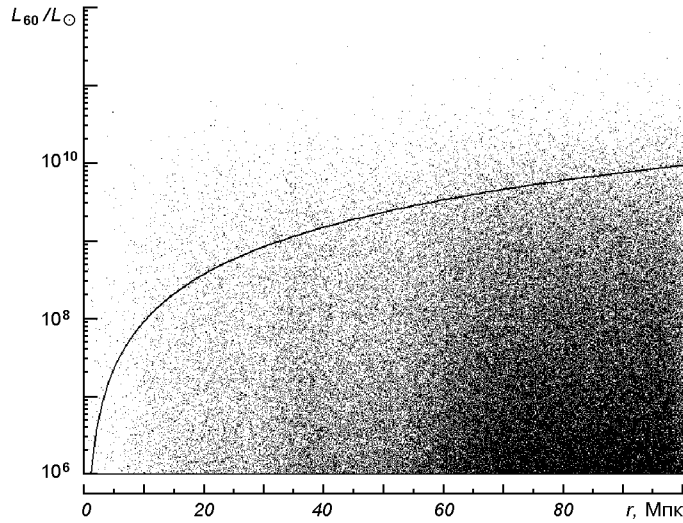


Рис. 2. Розподіл світність галактик  $L_{60}$  — відстань. Лінія відповідає потоку  $f_{60} = 0.6$  Ян. Вище лінії — оригінальні галактики каталогу PSCz, нижче — додані галактики

Для калібрування поля нами взято одне з найбільш вивчених скупчень галактик у Волосі Вероніки ( $l = 58^\circ$ ,  $b = 88^\circ$ ,  $r = 96$  Мпк), та порожнини Місцевого Всесвіту. Згідно з отриманим повним каталогом галактик густина світності в центрі скупчення Волосся Вероніки дорівнює  $1.1 \cdot 10^{10} L_\odot \text{ Мпк}^{-3}$ . Значення індукції магнітного поля, визначені різними методами для центральної частини даного скупчення, можна поділити на дві групи:  $B > 100$  пТл та  $B < 100$  пТл. Так, вимірювання величини фарадеївського обертання дають значення поля 200 [18] та 850 пТл [24], тоді як спостереження в радіодіапазоні дають 10 [5] та 20 пТл [10]. Для першої групи взято характерне поле 200 пТл, а для другої 30 пТл. Для магнітних полів у войдах взято два крайні оціночні значення 10 та 0.1 фТл [26]. Приймаючи, що границя кожного войда являє собою сферу радіусом 10 Мпк, ми обчислили густину світностей відомих войдів у Місцевому Всесвіті [15]. Середнє значення густини світності войдів склало  $9.9 \cdot 10^6 L_\odot \text{ Мпк}^{-3}$ .

Використовуючи ці дані, отримаємо дві залежності між магнітним полем та густиною світності.

1) Для мінімальних значень полів у скупченнях та войдах (модель «слабкого поля»):

$$B(r) = 30 \left( \frac{\rho_L(r)}{1.1 \cdot 10^{10} L_\odot} \right)^{1.8} \text{ пТл.} \quad (1)$$

2) Для максимальних значень (модель «сильного поля»):

$$B(r) = 200 \left( \frac{\rho_L(r)}{1.1 \cdot 10^{10} L_\odot} \right)^{1.4} \text{ пТл.} \quad (2)$$

Отримані залежності узгоджуються з даними [8], де при моделюванні магнітогідродинамічного підсилення малого затравочного поля до спостережуваних нині величин отримано близьку до степеневі залежність між магнітним полем та густиною баріонної речовини з показником степеня від 1.0 до 1.5.

## ВІДХИЛЕННЯ КПНВЕ В ПОЗАГАЛАКТИЧНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Для вивчення залежності величини відхилення КПНВЕ від моделі позагалактичного магнітного поля простір до 100 Мпк поділено на кубічні елементи з ребром 1 Мпк. В кожному з них на основі густини світності галактик обчислюємо індукцію магнітного поля  $B$ . Природним для позагалактичного поля є випадковий характер зміни напрямку вектора індукції. Зі спостережень довжина когерентності поля у скупченнях галактик становить  $l_c = 10 \dots 100$  кпк [6] та приблизно 1 Мпк для міжгалактичного простору, де  $B < 0.1$  пТл [11]. Значна доля об'єму до 100 Мпк має магнітне поле значно менше за 100 пТл, і для КП з енергією  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ  $r_l > l_c$ , тому можна розглядати рух заряджених частинок КП як квазіпрямолінійний. В такому випадку відхилення частинки із зарядом  $Z$  та енергією  $E$ , яка поширюється у випадковому полі з довжиною когерентності  $l_c$  та з індукцією  $B$  на відстань  $r$  визначається співвідношенням [20]

$$\theta(E, r) = 0.8^\circ Z \left( \frac{E}{10^{20} \text{ еВ}} \right)^{-1} \left( \frac{r}{10 \text{ Мпк}} \right)^{1/2} \left( \frac{l_c}{1 \text{ Мпк}} \right)^{1/2} \left( \frac{B}{0.1 \text{ пТл}} \right), \quad (3)$$

а час затримки —

$$\tau(E, r) = 1500 Z^2 \left( \frac{E}{10^{20} \text{ еВ}} \right)^{-2} \left( \frac{r}{10 \text{ Мпк}} \right)^2 \left( \frac{l_c}{1 \text{ Мпк}} \right) \left( \frac{B}{0.1 \text{ пТл}} \right)^2 \text{ років}. \quad (4)$$

Вважатимемо, що величина поля в елементарних кубиках 1 Мпк є постійною і описується виразом (1) чи (2), тоді як напрям поля випадково розподілений в кожному підкубіку розміру  $l_c$ . Тому для дослідження відхилень КП в такому полі ізотропно із Землі запускаємо антипротони (оскільки найімовірнішими кандидатами на КПНВЕ є протони [15]) та обчислюємо середні відхилення  $\theta(E, r)$  частинок після проходження кожного кубика відповідно до (3). Напрямок руху частинки після виходу з кубика змінюємо на обчислений кут у випадковому напрямку, при цьому враховуємо втрати енергії на взаємодію з мікрохвильовим фоном [4], беручи до уваги час затримки (4). Так повторюємо доти, поки енергія частинки не перевищить значення  $10^{22}$  еВ (максимальна енергія генерації), або не вийде за межі сфери радіусом 100 Мпк. Обчислення проводилися для довжин когерентності 250, 50 та 10 кпк в об'ємах, де  $B > 0.1$  пТл, і 1 Мпк для областей із слабшим полем.

Як видно з таблиці, для всіх енергій середнє значення відхилення сильно залежить від параметрів магнітного поля. Так, при енергії реєстрації частинок  $4 \cdot 10^{19}$  еВ величина відхилення у середньому в 2—5 разів більша у випадку моделі сильного магнітного поля, ніж у випадку слабкого. При зменшенні довжини когерентності поля у п'ять разів для енергії  $4 \cdot 10^{19}$  еВ, приблизно у два рази зменшується відхилення КПНВЕ.

Середні кутові відхилення  $\theta$  протонів різних енергій у моделях позагалактичного магнітного поля. В дужках — середні квадратичні відхилення

$l_c$ , кпк	Номер моделі	$\theta$			
		$E = 4 \cdot 10^{19}$ еВ	$6 \cdot 10^{19}$ еВ	$10^{20}$ еВ	$3 \cdot 10^{20}$ еВ
250	1	9.5° (23°)	7.1° (18°)	2.5° (8°)	0.4° (1.9°)
	2	23° (31°)	19° (28°)	11° (23°)	2.9° (10°)
50	1	5.3° (13°)	3.4° (9°)	1.2° (3.8°)	0.2° (0.9°)
	2	18° (29°)	14° (26°)	7° (17°)	1.3° (4.5°)
10	1	2.4° (6°)	1.5° (4°)	0.5° (1.7°)	0.1° (0.4°)
	2	12° (25°)	9.2° (19°)	3.3° (9°)	0.6° (2.0°)

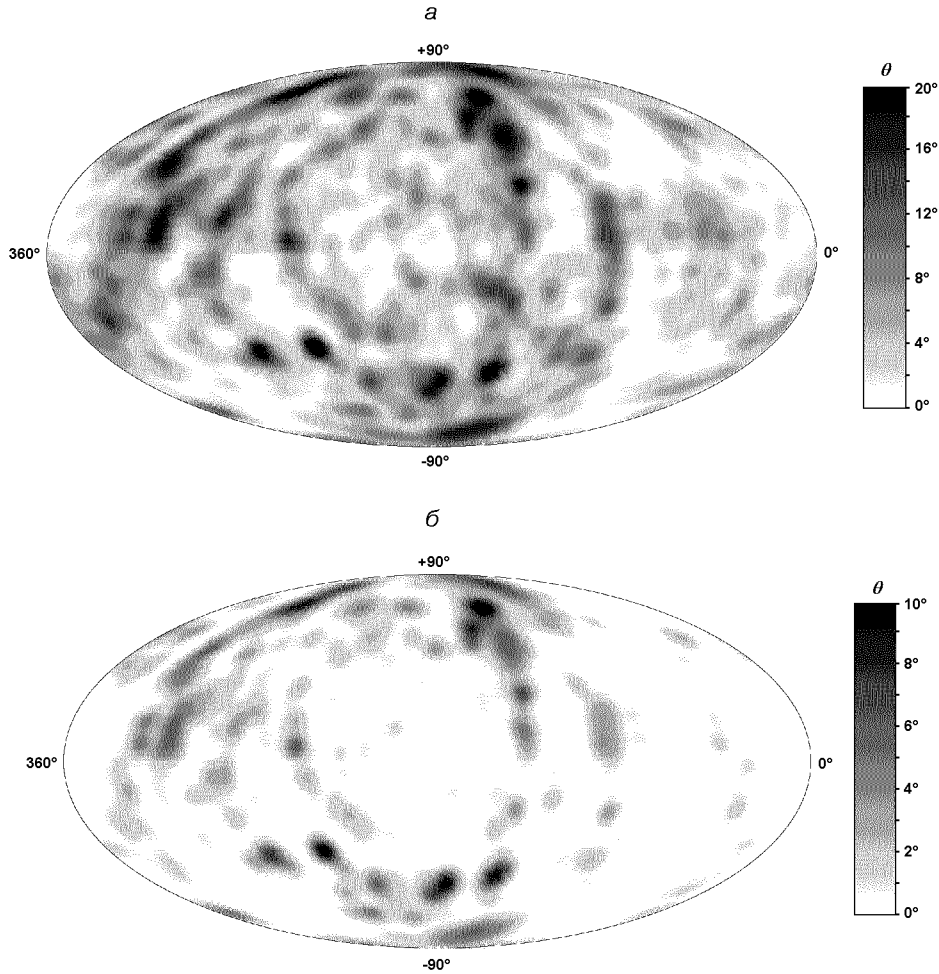


Рис. 3. Карта відхилень протонів з енергіями  $4 \cdot 10^{19}$  еВ (а) та  $10^{20}$  еВ (б) у моделі слабого позагалактичного поля з  $l_c = 50$  кпк (галактична система координат). Карту усереднено гауссівським фільтром шириною  $3^\circ$

На рис. 3 показано карту відхилення  $\theta$  протонів у моделі слабого магнітного поля для  $l_c = 50$  кпк. Карта відтворює положення основних скупчень галактик, де відхилення складають понад  $14^\circ$  для значення енергії  $4 \cdot 10^{19}$  еВ. Також на карті розподілу відхилень можна бачити положення близьких областей з потужним магнітним полем, що пов'язані з галактиками високої світності. Більшість площі небесної сфери зайнята районами із значенням відхилення  $\theta < 3^\circ$ .

На карті відхилень КПНВЕ з енергією  $10^{20}$  еВ бачимо дещо іншу картину. Це пов'язано з меншою відстанню до потенційних джерел ( $\approx 70$  Мпк), від яких ми можемо зареєструвати частинки таких високих енергій. Виділяється скупчення в Діві, де відхилення КП становить  $\theta > 6^\circ$ , а також скупчення Центавр, Павич — Індіанець та Великий Атрактор з відхиленнями  $\theta \approx 3...4^\circ$ . При цьому переважну частину площі неба займають області з малою концентрацією галактик, де відхилення менші за  $1^\circ$ .



Відхилення КПНВЕ у випадку моделі сильного магнітного поля виявляються більшими приблизно в 3—5 разів. Отже, ми можемо очікувати кореляцій напрямків прибуття КПНВЕ з енергією вище  $4 \cdot 10^{19}$  еВ з їхніми можливими джерелами на масштабах до  $10^\circ$  лише у випадку магнітного поля з характеристиками, близькими до нашої моделі слабкого поля.

**ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІСЦЕВОГО ВСЕСВІТУ  
НА СПЕКТР ТА ПОТОКИ КПНВЕ ВІД ПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ  
ДІВА А ТА ARP 299**

Для аналізу впливу різних моделей позагалактичного магнітного поля на формування потоку та спектру КПНВЕ від дискретних джерел ми провели чисельне моделювання інжекції частинок з окремого джерела, їхнього поширення у міжгалактичному просторі та детектування. Для вибраного джерела було задано степеневий спектр генерації КП в діапазоні енергій від  $E_{\min} = 4 \cdot 10^{19}$  еВ до  $E_{\max} = 10^{22}$  еВ з показником  $\gamma_g$ :

$$N(E)dE = A \cdot E^{-\gamma_g} dE.$$

Повна енергія КП у вказаному діапазоні складає

$$W = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} EN(E)dE.$$

Ізотропно інжектуючи частинки від вибраного джерела, простежуємо рух кожного КП у міжгалактичному просторі, як це було показано вище, поки він не досягне границі модельованого нами магнітного поля (100 Мпк), або не потрапить в «детектор». В останньому випадку зараховуємо даний КП до зареєстрованих. Маючи енергетичний спектр зареєстрованих частинок  $N_{\det}(E)$  та задаючи світність  $L_{CR}$  джерела в КП з енергіями в діапазоні від  $4 \cdot 10^{19}$  еВ до  $10^{22}$  еВ можна перейти до енергетичного спектру очікуваного потоку:

$$j(E) = N_{\det}(E) \frac{1}{S\Omega} \cdot \frac{L_{CR}}{W},$$

де  $S$  — площа поверхні «детектора»,  $\Omega$  — тілесний кут зони видимості «детектора»,  $L_{CR}/W$  — величина, обернена до тривалості генерації КП. «Детектором» вважається круг радіусом 3 Мпк з центром, суміщеним з положенням Землі. При кожному запуску частинки положення вектора нормалі площини детектора вибиралося випадковим чином, причому кут між цим вектором та віссю обертання Землі залишався сталим і рівним  $90^\circ - \varphi$ , де  $\varphi$  — широта установки. Для прикладу в нашій роботі розглянуто установку AGASA з  $\varphi = 35.8^\circ$ . Оскільки установка AGASA може надійно реєструвати лише ті частинки, що приходять із zenітної віддалі, меншої за  $45^\circ$ , тому зареєстрованими в нашому моделюванні вважалися лише ті частинки, які перетинають «детектор» під кутом, меншим за  $45^\circ$  до нормалі поверхні «детектора».

Найперше оцінимо вплив позагалактичного магнітного поля на формування спектру КПНВЕ від близької активної галактики Діва А ( $l = 283.7^\circ$ ,  $b = 74.5^\circ$ ,  $D = 16$  Мпк). Інжектують 1266735 частинок в діапазоні енергій від  $4 \cdot 10^{19}$  до  $10^{22}$  еВ з показником спектру  $\gamma_g = 2.7$ . На рис. 4 показано отриманий спектр у випадку світності джерела в космічних променях  $10^{35}$  Дж/с в діапазоні енергій від  $4 \cdot 10^{19}$  до  $10^{20}$  еВ. Як видно, форма спектру мало залежить від моделі магнітного поля. Це передовсім пов'язано з близькістю галактики Діва А. Проходячи відстань 16 Мпк у магнітному полі з середньою індукцією 10 пТл, КПНВЕ не можуть розсіятися чи

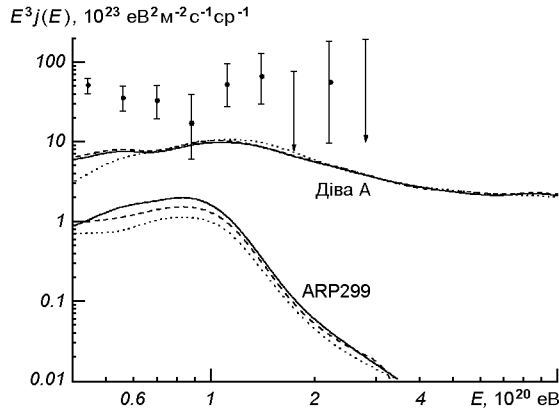


Рис. 4. Порівняння розрахованих спектрів КПНВЕ від Диви А та ARP299 зі спектром установки AGASA для різних моделей магнітного поля з  $l_c = 50$  кпк. Показник спектру генерації  $\gamma_g = 2.7$ . Світність джерел  $L_{CR} = 10^{35}$  Дж/с

затриматися на час, достатній для суттєвих втрат енергії. Для обох моделей магнітного поля, як і для випадку без поля, енергія ГЗК-обрізання близька до  $1.5 \cdot 10^{20}$  еВ, тому можна оцінити верхню межу світності в цьому діапазоні. Якщо  $t' = 2.2 \cdot 10^8$  с — час роботи установки AGASA,  $S' = 10^8$  м<sup>2</sup> — її площа,  $n$  — кількість зареєстрованих частинок при чисельному моделюванні ( $n = 2337, 2471, 2003$  відповідно для моделі без поля, для моделі слабого поля та сильного поля),  $m$  — кількість реально зареєстрованих КП від даного джерела, то світність джерела складає

$$L_{CR} = \frac{W}{t'} \frac{m}{n} \frac{S}{S'}$$

Оскільки від Диви А не зареєстровано жодних КП з енергією  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ [2], тому її світність менша за  $10^{34}$  Дж/с, при якій спостерігався б в середньому один КП для даного часу спостережень.

Спектр КП від більш далекого джерела ARP 299 ( $l = 141.9^\circ, b = 55.4^\circ, D = 44$  Мпк) (рис. 4) сильно залежить від моделі магнітного поля. У випадку моделі слабого магнітного поля потік менший у 1.2 рази, ніж у моделі без поля, і у 1.7 разів — у випадку моделі сильного магнітного поля. Як видно з рис. 4, спектр від ARP 299 має чітко виражене ГЗК-обрізання при енергії  $10^{20}$  еВ.

В роботі [2] методом Монте-Карло було знайдено достовірну кореляцію (на рівні  $3.3\sigma$ ) триплету подій AGASA із положенням на небі системи взаємодіючих галактик ARP 299. Якщо припустити, що даний об'єкт є джерелом трьох КП з енергіями  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ, то підрахунки дають його світність в КП  $L_{CR} = 1.8 \cdot 10^{35}$  Дж/с для випадку без магнітного поля,  $L_{CR} = 2.2 \cdot 10^{35}$  Дж/с для моделі слабого магнітного поля і  $L_{CR} = 3.0 \cdot 10^{35}$  Дж/с для моделі сильного магнітного поля.

## ВИСНОВКИ

В роботі досліджено вплив позагалактичного магнітного поля на поширення КПНВЕ. Для цього відтворено магнітне поле на основі припущення про степеневу залежність між густиною світності галактик в інфрачервоному діапазоні енергій і величиною магнітного поля. Для нормування поля запропоновано використання величин поля в скупченнях галактик та у порожнинах. Знайдено параметри залежності між світністю галактик та полем для двох випадків — верхньої межі (модель сильного поля) та нижньої межі (модель слабого поля) для величини магнітного поля у скупченнях та войдах.

Побудовано карти відхилень КПНВЕ з енергіями  $4 \cdot 10^{19}$  та  $10^{20}$  еВ в обох моделях магнітного поля, на яких простежуються основні скупчення галактик та галактики з високою світністю в інфрачервоному діапазоні. Середні значення відхилень КП, що пройшли крізь скупчення галактик для випадку слабкого магнітного поля, виявилися в межах  $14^\circ$ — $20^\circ$  для енергії  $E = 4 \cdot 10^{19}$  еВ та  $5^\circ$ — $10^\circ$  для  $10^{20}$  еВ, що узгоджується з даними [20, 21], але не відповідає даним [8], згідно з якими відхилення складають  $1^\circ$  для всіх енергій.

Більшість площі небесної сфери у моделі слабкого магнітного поля зайнято областями, де відхилення складало менше  $2^\circ$ – $3^\circ$ , так що зберігається кореляція напрямків прибуття протонного компонента КПНВЕ з напрямками на їхні можливі джерела. Усереднені значення відхилень по небу показали залежність від моделей та довжини когерентності магнітного поля. Максимальні значення відповідають моделі сильного магнітного поля з довжиною когерентності 250 кпк і становлять  $23^\circ$  та  $11^\circ$  для енергій  $4 \cdot 10^{19}$  еВ і  $10^{20}$  еВ відповідно, що утруднює пошук кореляцій заряджених КП з їхніми можливими джерелами.

В роботі досліджено модифікацію спектру КП від точкових джерел Діва А та ARP 299 позагалактичним магнітним полем. Форма спектру КП від першого об'єкту майже не залежить від магнітного поля. Це легко пояснити порівняно малою відстанню до Діви А, на якій КП з енергією  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ ще не зазнають значних втрат енергії. Оскільки в роботі [2] не виявлено кореляцій КП з об'єктом Діва А, тому оцінено верхню межу її світності, яка виявилася рівною  $10^{34}$  Дж/с.

ARP 299 — система надсвітних інфрачервоних галактик з активними ядрами, які зливаються, вона є ймовірним прискорювачем КП до надвисоких енергій. Оскільки відстань до джерела ARP 299 сягає 44 Мпк, то спектр КПНВЕ від нього сильно залежить від позагалактичного магнітного поля. Якщо припустити, що даний об'єкт є джерелом триплету подій AGASA з енергіями  $E > 4 \cdot 10^{19}$  еВ [2], то можна оцінити його світність в КП. Підрахунки дають для випадку без магнітного поля  $L_{CR} = 1.8 \cdot 10^{35}$  Дж/с, для моделі слабкого магнітного поля  $L_{CR} = 2.2 \cdot 10^{35}$  Дж/с, для моделі сильного магнітного поля  $L_{CR} = 3.0 \cdot 10^{35}$  Дж/с. Як видно, магнітне поле зумовлює послаблення потоку КПНВЕ від ARP 299.

Автори висловлюють подяку Державному фонду фундаментальних досліджень за фінансову підтримку (проект Ф16/010).

1. Березинский В., Буланов С., Гинзбург В. и др. *Астрофизика космических лучей* — М: Наука, 1990.—528 с.
2. Еліїв А., Гнатик Б. Кореляція космічних променів надвисоких енергій з різними класами позагалактичних об'єктів: внесок найближчих та найяскравіших членів вибірок // *Кінематика і фізика небес. тел.*—2006.—22, № 4.—С. 297—307.
3. Aloisio R., Berezhinsky V., Blasi P., et al. A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays. — 2006.—arXiv:astro-ph/0608219.
4. Berezhinsky V., Grigorieva S. A bump in the ultra-high energy cosmic ray spectrum // *Astron. and Astrophys.*—1988.—199, N 1—2.—P. 1—12.
5. Brunetti G., Setti G., Feretti L., et al. Particle reacceleration in the Coma cluster: radio properties and hard X-ray emission // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—320, N 3.—P. 365—378.
6. Carilli C., Taylor G. Cluster magnetic fields // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2002.—40.—P. 319—348.
7. Dolag K., Bartelmann M., Lesch H. Evolution and structure of magnetic fields in simulated galaxy clusters // *Astron. and Astrophys.*—2002.—387, N 2.—P. 383—395.
8. Dolag K., Grasso D., Springel V., Tkachev I. Constrained simulations of the magnetic field in the Local Universe and the propagation of ultra high energy cosmic rays // *J. Cosmology and Astropart. Phys.*—2005.—N 1.—P. 9—39.

9. *Ensslin T., Vogt C., Pfrommer C.* Magnetic fields in clusters of galaxies // The magnetized plasma in galaxy evolution: Proc. conf.; Krakow, Poland, Jagiellonian University. — Krakow, 2005.—P. 231—238.
10. *Fusco-Femiano R., Orlandini M., Brunetti G., et al.* Confirmation of nonthermal hard X-ray excess in the Coma cluster from two epoch observations // *Astrophys. J.*—2004.—**602**, N 2.—P. 73—76.
11. *Grasso R.* Primordial magnetic fields and electroweak baryogenesis // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international workshop on particle physics and the early universe. — Trieste (Italy), 1999.—P. 261.
12. *Greisen K.* End to the cosmic-ray spectrum? // *Phys. Rev. Lett.*—1966.—**16**.—P. 748—750.
13. *Hayashida N., Honda K., Inoue N., et al.* Updated AGASA event list above  $4 \cdot 10^{19}$  eV // *Astrophys. J.*—2000.—**120**, N 5.—P. 2190—2196.
14. *Helou G., Walker D.* Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases // Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases.—1988.—**7**.—P. 1—265.
15. *Hillas A.* Cosmic rays: Recent progress and some current questions. — 2006.—astro-ph/0607109.
16. *Hoyle F., Vogeley M.* Voids in the point source catalogue survey and the updated Zwicky catalog // *Astrophys. J.*—2002.—**566**, N 2.—P. 641—651.
17. *Isola C., Sigl G.* Large scale magnetic fields and the number of cosmic ray sources above the Greisen—Zatsepin—Kuzmin cutoff // *Phys. Rev. D.*—2002.—**66**, N 8.—P. 969—979.
18. *Kim K., Kronberg P., Dewdney P.* The halo and magnetic field of the Coma cluster of galaxies // *Astrophys. J.*—1990.—**355**, N 1.—P. 29—37.
19. *Saunders W., Rowan-Robinson M., Lawrence A., et al.* The 60-micron and far-infrared luminosity functions of IRAS galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1990.—**242**.—P. 318—337.
20. *Sigl G., Miniati F., Ensslin T.* Ultrahigh energy cosmic ray probes of large scale structure and magnetic fields // *Phys. Rev. D.*—2004.—**70**, N 4.—P. 137—153.
21. *Sigl G., Miniati F., Ensslin T.* Ultrahigh energy cosmic rays in a structured and magnetized universe // *Phys. Rev. D.*—2003.—**68**, N 4.—P. 51—61.
22. *Takami H., Yoshiguchi H., Sato K.* Propagation of ultra-high-energy cosmic rays above  $10^{19}$  eV in a structured extragalactic magnetic field and galactic magnetic field // *Astrophys. J.*—2005.—**639**, N 2.—P. 803—815.
23. *Tanco G.* Ultra high-energy cosmic rays: probing the local Universe // Topics in cosmic-ray astrophysics. — New York: Publ. Nova Science Publishers, Inc, Commack, 1999.—**230**.—P. 287—293.
24. *Saunders W., Sutherland W., Maddox S., et al.* The PSCz catalogue // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**317**, N 1.—P. 55—63.
25. *Vader J., Patricia S.* The optical luminosity function of a 60-micron flux-limited sample of IRAS galaxies // *Astron. J.*—1987.—**94**, N 4.—P. 854—866.
26. *Widrow L.* Origin of galactic and extragalactic magnetic fields // *Rev. Mod. Phys.*—2002.—**74**, N 3.—P. 775—823.
27. *Xu Y., Kronberg P., Habib S., et al.* A Faraday rotation search for magnetic fields in large-scale structure // *Astrophys. J.*—2006.—**637**, N 1.—P. 19—26.
28. *Zatsepin G., Kuzmin V.* Upper bound of cosmic ray spectrum // *Pisma Zh. Experim. Theor. Phys.*—1966.—**4**.—P. 114—116.

Надійшла до редакції 19.09.06