

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.03.047>

УДК 524.1-52, 524.1-65

Р. Гнатик¹, В. Войцеховський²

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ, 04053
roman_hnatyk@ukr.net

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Проспект Академіка Глушкова 2, Київ, 03022
v.voytsehovsky@gmail.com

Космічні промені екстремально високих енергій ($E > 10^{20}$ eV): потенційні джерела

Однією з невирішених проблем фізики космічних променів залишається встановлення природи та джерел космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ, $E > 10^{18}$ eV). Високий ступінь ізотропії спостережуваної інтенсивності КПНВЕ, зумовлений головно відхиленнями їхніх траєкторій у міжгалактичних та галактичних магнітних полях, разом із суттєвою невизначеністю хімічного вмісту (атомної маси) КПНВЕ не дозволяють здійснити прив'язку спостережуваних подій до їхніх джерел та встановити механізми їхнього прискорення. Зменшити вплив магнітного відхилення можна двома шляхами — розглядом подій з екстремально високою енергією (КПЕВЕ, $E > 10^{20}$ eV) та врахуванням сучасних моделей галактичного магнітного поля для корекції його впливу на траєкторії КПЕВЕ. В нашій роботі для вибірки КПЕВЕ за даними детекторів Pierre Auger Observatory («Auger») та Telescope Array (TA) спостережувані напрямки приходу скориговані за вплив галактичного та випадкового позагалактичного магнітних полів. Нові положення КПЕВЕ на небесній сфері зіставлені з використовуваними «Auger» вибірками потенційних джерел: 17 активних ядер галактик (АЯГ) з потужним гамма-випромінюванням (з 2FHL-каталогу) та 23 галактики зі спалахом зореутворення (відібраних за радіопотоком), а також з вибірками 42 радіогалактик з параметризованого каталогу радіогалактик та магнетарів. З врахуванням пробігів ядерного компонента (H, He, C, Si, Fe) КПЕВЕ у міжгалактичному середовищі і очікуваних типових відстаней до потенційних джерел (порядку 100 Мпк для H і Si-Fe та 50 Мпк для He, C) виділено аст-

рофізичні об'єкти вищезгаданих вибірок, що можуть бути джерелами відповідних подій. Проаналізовано потенційні механізми прискорення у виділених об'єктах, оцінено вклад можливих галактичних джерел у потік КПЕВЕ.

Ключові слова: космічні промені, ядра активних галактик, радіогалактики, магнетари.

ВСТУП

Останніми роками в астрономії відбуваються революційні зміни — реєстрація гравітаційних хвиль від злиття чорних дір та нейтронних зір у подвійних системах зоряних мас започаткувала гравітаційно-хвильову астрономію як нову галузь експериментальної астрономії та нову епоху багатоканальної астрономії (multimessenger astronomy) — спостереження астрономічних об'єктів в каналах електромагнітного та гравітаційного випромінювання. Спостереження високоенергетичного ($E = 270$ TeV) нейтрино з просторовою та часовою прив'язкою до спалаху гамма-активності блазара XS 0506+056 (червоне зміщення $z = 0.34$) відкрило епоху високоенергетичної нейтринної астрономії (досі фіксувались тільки нейтрино від Сонця та від спалаху Наднової SN1987A з енергіями порядку кількох MeV). Разом з тим все ще чекає свого народження астрономія космічних променів (КП), якщо не враховувати сонячні КП. Це високоенергетичні частинки, що влітають у земну атмосферу з кінетичними енергіями, що суттєво перевищують їхню енергію спокою (приблизно 1 GeV для протона) з квазістепенним енергетичним спектром $F(E) \propto E^{-k}$, де показник степеня залежить від енергії і змінюється у межах 2.6...3.2 [37]. В області енергій $E \sim 4 \cdot 10^{19}$ eV спостерігається різке зменшення потоку КП, що може бути зумовлено так званим ГЗК-обрізанням внаслідок взаємодії протонного компонента з реліктовим фоном [8, 9, 37] чи фізичним обмеженням на максимально досяжні енергії в космічних прискорювачах (досі верхню межу енергії визначають зареєстровані ще у 1993 р. КП з енергією $3.2 \cdot 10^{20}$ eV [14, 28]).

Основна причина, чому досі не встановлені астрофізичні об'єкти, які є джерелом космічних променів, пов'язана із відхиленням траєкторій аж до дифузійного поширення космічних променів як заряджених частинок у галактичному та міжгалактичному магнітних полях. Спостережуваний потік космічних променів з енергіями до 10^{18} eV може забезпечити прискорення частинок міжзоряного середовища на ударних фронтах галактичних залишків Наднових зір механізмом Фермі першого порядку [37, 43]. Однак КП надвисоких енергій (КПНВЕ) з енергіями понад 10^{18} eV не утримуються галактичним магнітним полем [13], і повинні прискорюватись у позагалактичних джерелах [11, 37, 42]. До потенційних позагалактичних джерел КПНВЕ належать активні ядра галактик (АЯГ) [21, 44], космологічні гамма-спалахи [26, 31, 54], галактики із спалахом зореутворення (ГСЗ)

[13, 40], новонароджені мілісекундні пульсари і магнетари [10, 20, 36], явища припливного руйнування зір у гравітаційних полях надмасивних чорних дір [21, 22], гігантські спалахи магнетарів (спостерігаються і в нашій Галактиці) [27].

Детектування КПНВЕ зараз здійснюється головню двома найбільшими установками — масивами детекторів Pierre Auger Observatory («Auger») у південній півкулі [3] та Telescope Array (TA) — у північній [7]. Незважаючи на багатий спостережний матеріал, досі не отримано надійних даних щодо кореляції напрямків приходу КПНВЕ із їхніми потенційними джерелами. Детектор «Auger» виявив тільки дипольний компонент великомасштабної анізотропії з амплітудою 6.5 % у розподілі КПНВЕ з енергією $E > 8 \text{ EeV}$ [18], тоді як TA-детектор виявив більш жорсткий спектр КПНВЕ приполярної області небесної сфери ($24.8 < \theta < 90^\circ$) у порівнянні із спектром приекваторіальної області ($-16 < \theta < 24.8^\circ$): злам спектру відбувається при значеннях $\lg(E/\text{eV}) = 19.85 \pm 0.03$ і $\lg(E/\text{eV}) = 19.59 \pm 0.06$ відповідно [16]. На середніх кутових масштабах обидва детектори виявили (при використанні різних мінімальних енергій вибірок для вирівнювання інтегральних потоків КПНВЕ $E_{\text{TA}} = 53.2 \text{ EeV}$, $E_{\text{Auger}} = 40 \text{ EeV}$) в своїх півкулях «гарячі плями» — в крузі радіуса 15° навколо $\theta = 9^{\text{h}}30^{\text{m}}$, $\delta = +54^\circ$ і у крузі радіуса 20° навколо $\theta = 12^{\text{h}}50^{\text{m}}$, $\delta = -50^\circ$ на рівні 1.5 та 2.2 відповідно (post-trial significance, [18]).

На малих кутових масштабах проводяться пошуки кореляцій напрямків приходу КПНВЕ із небесними координатами потенційних джерел різних класів. Так, при аналізі 15-річних рядів даних «Auger» виявлено суттєву кореляцію із вибірками ГСЗ, активних АЯГ, галактик з каталогів Swift-BAT та 2MRS (4.5, 3.1, 3.7 та 3.72 відповідно для КПНВЕ з $E = 40 \text{ EeV}$ на кутовій відстані $\theta = 15^\circ$ від потенційних джерел) разом із надлишками подій наколо АЯГ Cen A та ГСЗ NGC 253 [15].

Пошуки джерел КПНВЕ ускладнюються труднощами зі встановленням атомної маси частинок, що влітають в атмосферу, за результатами спостереження породжених ними широких атмосферних злив (ШАЗ), зокрема з оцінок середньої глибини максимуму розвитку зливи $\langle X_{\text{max}} \rangle$ та її флуктуацій (X_{max}). Дані «Auger» свідчать, що середня маса $\langle A \rangle$ зі збільшенням енергії КПНВЕ до $\lg(E/\text{eV}) = 18.3$ зменшується до домінування легких елементів (H + He) і надалі збільшується до $\langle \ln A \rangle = 2-3$ (C-N-O) в останньому біні FD-детектора $\lg(E/\text{eV}) = 19.7 \dots 19.8$ (35 подій) [46, 53]. Водночас дані TA щодо $\langle X_{\text{max}} \rangle$ і (X_{max}) узгоджуються як з домінуванням легких елементів для всіх КПНВЕ в рамках моделі адронних взаємодій QGSJET II-04, так і з вкладом важких ядер, зокрема складу 75 % H + He, 17 % N, 8 % Fe [29].

Як вже відмічалось вище, основною причиною втрати кореляції напрямків приходу КПНВЕ із їхніми джерелами є відхилення траєкторій заряджених частинок, які становлять переважну кількість (якщо не всю) КП, у міжгалактичних та галактичних магнітних полях. Тому в

нашій роботі досліджуються потенційні джерела подій, зареєстрованих детекторами «Auger» та ТА, з екстремально високими енергіями космічних променів (КПЕВЕ) — понад 10^{20} еВ, для яких згадувані вище кореляції із потенційними джерелами стають незначними [15], і немає надійних оцінок хімічного вмісту [29, 46, 53]. Суттєві енергетичні втрати, зумовлені головно фотодезінтеграцією складних ядер та фотопіонними втратами протонів (ГЗК-обрізання спектру), обмежують відстань до астрофізичних джерел КПЕВЕ значенням 100 Мпк. Натомість зменшення відстані до джерел при збільшенні енергії КПЕВЕ суттєво зменшує вплив міжгалактичного магнітного поля на відхилення їхніх траєкторій, підвищуючи долю спостережуваних подій, що зберегли кореляційний зв'язок із джерелом. Напрямки входу кожного конкретного КПЕВЕ у магнітне поле Галактики, відновлені в роботі на основі моделей галактичного магнітного поля [32, 33] із величиною заряду Z як вільним параметром, доповнюються оцінками як додаткового відхилення його траєкторії у міжгалактичному магнітному полі [34], так і його пробігу, зумовленого енергетичними втратами. Пооб'єктний аналіз відповідності параметрів конкретного КПЕВЕ із параметрами об'єктів вибірок потенційних джерел КПЕВЕ дозволить виділити фізично обґрунтовані потенційні джерела для частини спостережуваних КПЕВЕ.

КОСМІЧНІ ПРОМЕНІ ЕКСТРЕМАЛЬНО ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ЗА ДАНИМИ ДЕТЕКТОРІВ «AUGER» І ТА

Опубліковані дані спостережень КПЕВЕ із вказанням координат подій включають тільки шість таких подій для детектора «Auger» (з січня 2004 р. до березня 2014 р.) [2] та десять подій для детектора ТА (від травня 2008 р. до травня 2014 р.) [1, 6, 25]. Перевищення кількості подій ТА над даними «Auger» при значно меншій сумарній апертурі (5400 км^2 стер рік для ТА та 51753 км^2 стер рік для «Auger») пояснюється систематичними похибками визначення енергії детектованих подій в кожному з детекторів (14 % в «Auger» і 21 % в ТА). Порівняльний аналіз спектрів КПЕВЕ детекторів «Auger» та ТА вимагає для їхнього узгодження систематичного зміщення енергій КПЕВЕ на +5.2 % для «Auger» і -5.2 % для ТА до 10^{19} еВ і подальшого вже залежного від енергії систематичного зміщення +10 % для «Auger» та -10 % для ТА на декаду на вищих енергіях [16]. Шляхом моделювання спостережених спектрів КПЕВЕ детектора «Auger» отримано значення калібрувального коефіцієнта для енергетичного спектру $k_{\text{Auger}} = 1.15 \dots 1.26$ [17, 41]. Тому в нашій роботі ми використовуємо вибірку з 11 подій $E > 10^{20}$ еВ «Auger», отриману після калібрування початкової вибірки [2] зі значенням $k = 1.2$. Натомість початкову вибірку ТА [1, 6, 25] доповнено даними про нові 12 ТА-подій з енергіями $E > 10^{20}$ еВ із рис. 5 [35], яким приписано мінімальну енергію $E = 10^{20}$ еВ. Нова ТА-вибірка містить 22 події, включно з дублетом $l = 151$, $b = 51$ (дві

події у межах кутового розділення детектора 1.4°) і триплетом подій в області $32 < l < 37$, $-4.7 < b < -3.3$ (дублет «Auger» + ТА та подія на відстані 3.7° від нього) [35]. Крім того, ми включили в розгляд зареєстровану в 1993 р. детектором «Fly's Eye» подію з досі рекордною енергією $(3.2 \pm 0.9) \cdot 10^{20}$ еВ з координатами приходу $l = 85.2 \pm 0.2$, $b = 48 \pm 5.2$ (галактичні координати $l = 163.4$, $b = 9.6$) та з глибиною максимуму зливи $X_{\max} = 815 \pm 60$ г/см² [14].

Розподіл на небесній сфері сформованої таким чином вибірки КПЕВЕ приведено на рис. 1 разом із положеннями скупчень та надскупчень галактик, що визначають великомасштабний розподіл маси у Локальному всесвіті (в радіусі 100 Мпк): надскупчення Centaurus (С, 60 Мпк), скупчення Coma (Сo, 90 Мпк), скупчення Eridanus (Е, 30 Мпк), скупчення Fornax (F, 20 Мпк), надскупчення Hydra (Hy, 50 Мпк), надскупчення Norma (N, 65 Мпк), надскупчення Pavo-Indus (PI, 70 Мпк), надскупчення Perseus-Pisces (PP, 70 Мпк), групи Ursa Major (UM, 20 Мпк), скупчення Virgo (V, 20 Мпк).

У моделі прискорення КПЕВЕ в астрофізичних об'єктах — АЯГ, гамма-спалахах, ГСЗ тощо — можна було б очікувати кореляції напрямків приходу КПЕВЕ із елементами великомасштабної структури — скупченнями та надскупченнями галактик, що формують супергалактичну площину, та антикореляції із положенням Локального войда — області практичної відсутності галактик з галактичними координатами центра $l = 47.7$, $b = 11.0$, що межує з Місцевою групою та простягається на 40...60 Мпк [51, 52]. Однак з рис. 1 така відповідність не підтверджується. КПЕВЕ не виявляють також надлишків в околах АЯГ Cen A ($l = 309.51$, $b = 19.41$) [2] та гарячої плями ($l = 177.1$, $b = 49.6$) [6], виявлених в даних «Auger» та ТА на нижчих енергіях $E < 40$ ЕеВ. Із застереженням щодо малої кількості зареєстрованих подій, з рис. 1 можна зробити попередній висновок: розподіл КПЕВЕ близький до очікуваного у випадку проміжних (С-N-O) та важких (група Fe) ядер, відхилених магнітним полем Галактики. Альтернативна версія домінування легких ядер (H + He) у потоці КПЕВЕ з квазібалістичними траєкторіями не пояснює події з області Локального войда.

Для більш реалістичної оцінки кореляцій напрямків приходу КПЕВЕ з їхніми потенційними джерелами ми визначаємо напрямки векторів швидкості КПЕВЕ при їхньому входженні у магнітне поле Галактики. Для цього для кожної події з зареєстрованою енергією E будується її зворотна траєкторія в Галактичному магнітному полі: для вибраного заряду частинки Ze із Землі запускається частинка із зарядом $-Ze$ в напрямку зареєстрованої події і розраховується її траєкторія в галактичному магнітному полі, представленому регулярним та випадковим компонентами відповідно до моделі Янссон — Фаррар [24, 25].

На відстанях $R_{gal} > 20$ кпк від центра Галактики частинка рухається у випадковому міжгалактичному полі з амплітудою $B_{rms} \sim 10^{10}$ Гс та з довжиною когерентності $l = 1$ Мпк [18, 33, 48]. Космічний промінь з

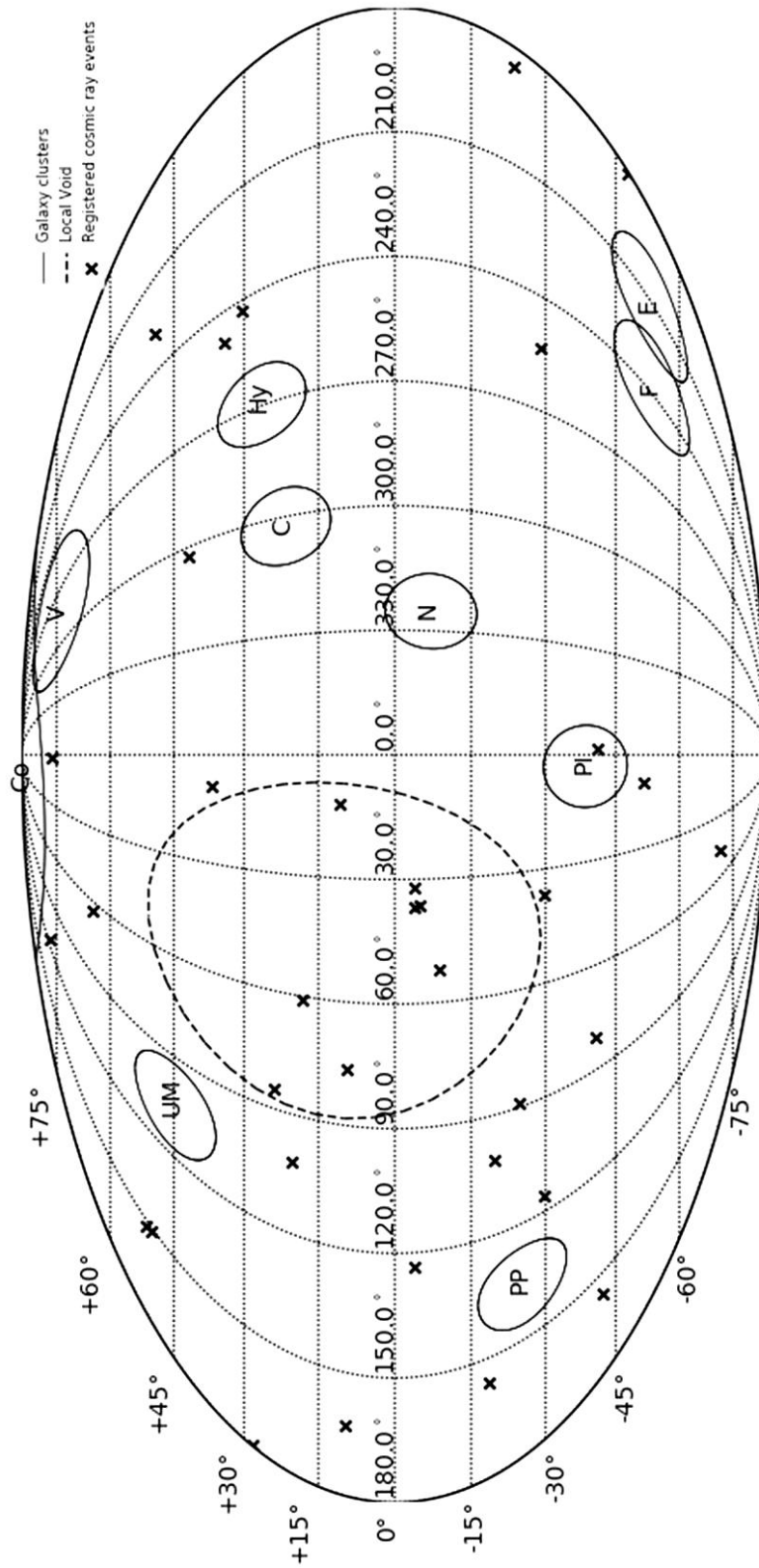


Рис. 1. Розподіл КПЕВЕ (хрестики) разом із положеннями скупчень та надскупчень галактик Локального всесвіту (до 100 Мпк) в галактичних координатах. С — надскупчення Centaurus, Co — скупчення Coma, E — скупчення Eridanus, F — скупчення Fornax, HU — надскупчення Hydra, N — надскупчення Norma, PI — надскупчення Perseus-Pisces, PP — надскупчення Perseus-Pisces, UM — Ursa Major, V — скупчення Virgo. Штрихований контур — Місцевий вийд, що межує з Місцевою групою

енергією E від джерела на відстані D в такому полі відхиляється на кут θ_{rms} і затримується на час t_{rms} [48]:

$$\theta_{rms}(E, D) \approx 0.8^\circ Z \frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \frac{D}{50 \text{ Мпк}}^{1/2} \frac{l}{1 \text{ Мпк}}^{1/2} \frac{B_{rms}}{10^{10} \text{ Гс}}, \quad (1)$$

$$t_{rms}(E, D) \approx 0.38 Z^2 \frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \frac{D}{50 \text{ Мпк}}^2 \frac{l}{1 \text{ Мпк}} \frac{B_{rms}}{10^{10} \text{ Гс}}^2 \text{ тис. років.}$$

Крім відхилення траєкторій у магнітних полях, на детектування КПЕВЕ суттєво впливають їхні енергетичні втрати, пов'язані із взаємодією із фоновим електромагнітним (мікрохвильовим та інфрачервоним) випромінюванням в міжгалактичному середовищі. Ці втрати (при $E > 10^{20}$ eВ домінують фотодезінтеграція складних ядер та фотопіонні втрати протонів) суттєво обмежують пробіг КПЕВЕ, обмежуючи можливу відстань до потенційних джерел до величин порядку 100 Мпк для протонів та важких ядер (Si, Ca, Fe) і до 50 Мпк для проміжних ядер (He, C-N-O) з врахуванням їхнього вторинного походження від фотодезінтеграції важчих ядер. Дочірнє ядро $N_i(A_i, Z_i)$ матиме лоренц-фактор початкового ядра $N_0(A_0, Z_0)$ і енергію $E(N_i)$ (A_i/A_0) $E(A_0)$) (для заліза Fe(56,26) $E(N_i) = (A_i/56)E(\text{Fe})$) (див. таблицю) [24, 30, 49, 50].

ВИБІРКИ ПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ ЕКСТРЕМАЛЬНО ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

Виправлені за вплив галактичного магнітного поля напрямки приходу КПЕВЕ зіставлялись із сформованими в роботі [5] вибірками:

— вибірка А: активні в гамма-діапазоні АЯГ (АЯГ: 17 блазарів і радіогалактик на відстані до 250 Мпк із каталогу Fermi-LAT 2FHL з інтегральним потоком в 50 ГеВ ... 2 ТеВ як оцінкою (проксі) для очікуваного потоку КПНВЕ, зокрема Cen A, M87, Mrk 421, Mrk 501 та ін.);

— вибірка В: 23 ГСЗ на відстані до 250 Мпк з потоком понад 0.3 Ян на 1.4 ГГц як оцінкою (проксі) для очікуваного потоку КПНВЕ, зокрема сім гамма-джерел Fermi-LAT (M82, NGC253 та ін.).

Крім того, розглядалися вибірки:

— вибірка С: параметризований каталог радіогалактик [47] (42 галактики на відстанях до 300 Мпк, відібрані на основі теоретичного опису енергетики джетів, прискорення космічних променів, їхнього релятивістського фокусування та хімічного складу);

— вибірка D: каталог магнетарів в нашій Галактиці та у Магелланових Хмарах [45], що містить 29 магнетарів (23 підтверджені, 6 кандидатів), зокрема три магнетари зі спостережуваними гігантськими спалахами в жорсткому X- та м'якому гамма-діапазонах, які можуть супроводжуватись прискоренням КПНВЕ (від SGR 0526-66 05 березня 1979 р., від SGR 1900+14 27 серпня 1998 р. і від SGR 1806-20 27 грудня 2004 р.);

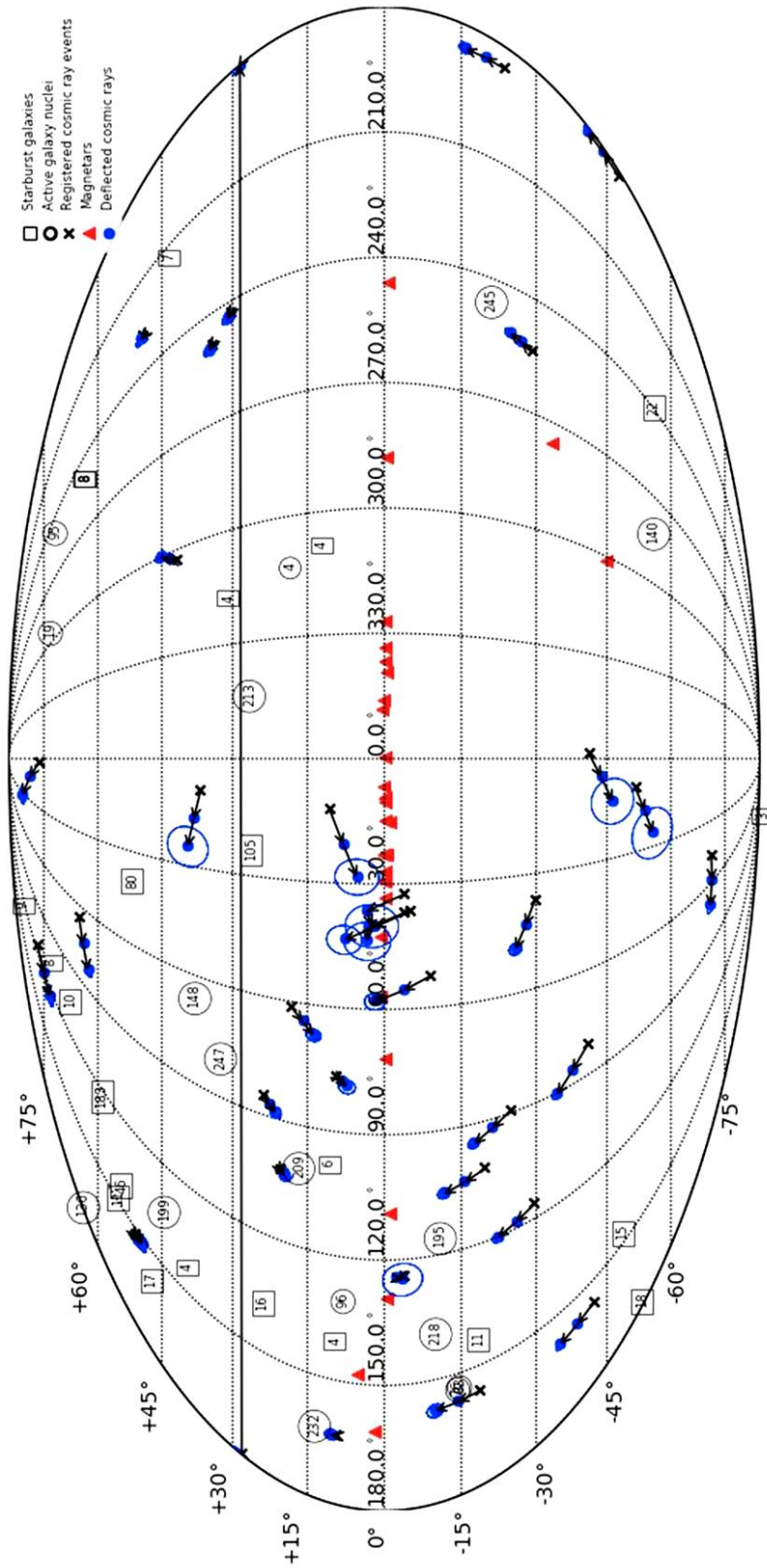


Рис. 2. Спостережуваний розподіл КПЕВЕ (хрестики), напрямки їхнього входу в галактичне магнітне поле (вершини стрілок) та 1σ -кružки сумарного відхилення у випадкових галактичному та позагалактичному та позагалактичному магнітних полях до відстані 50 Мпк для ядер Н та He. Квадратики — положення ГСЗ, трикутники — магнетарів, кружки — АЯГ (вказано відстані у Мпк)

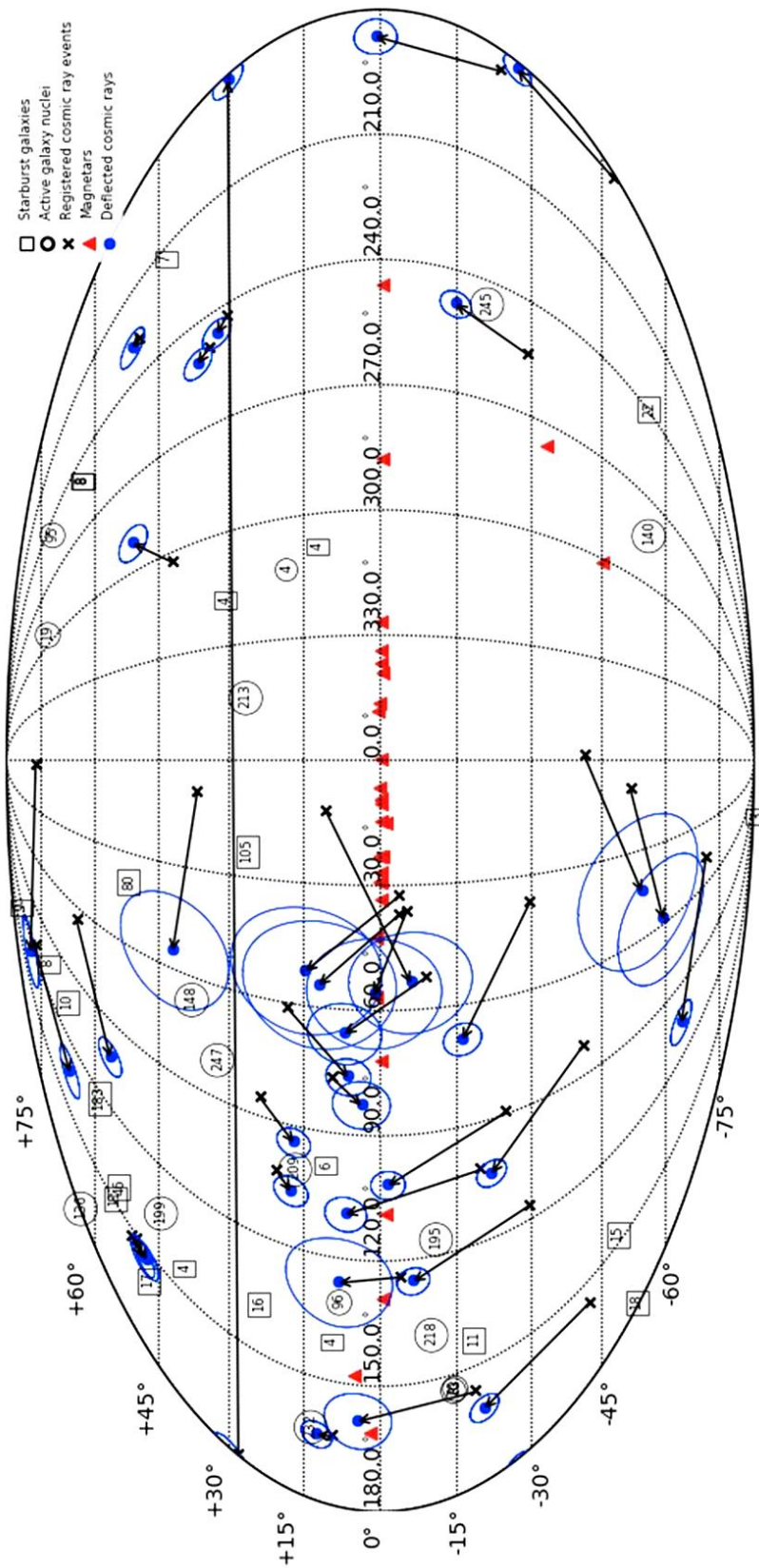


Рис. 4. Те ж для випадку ядер С

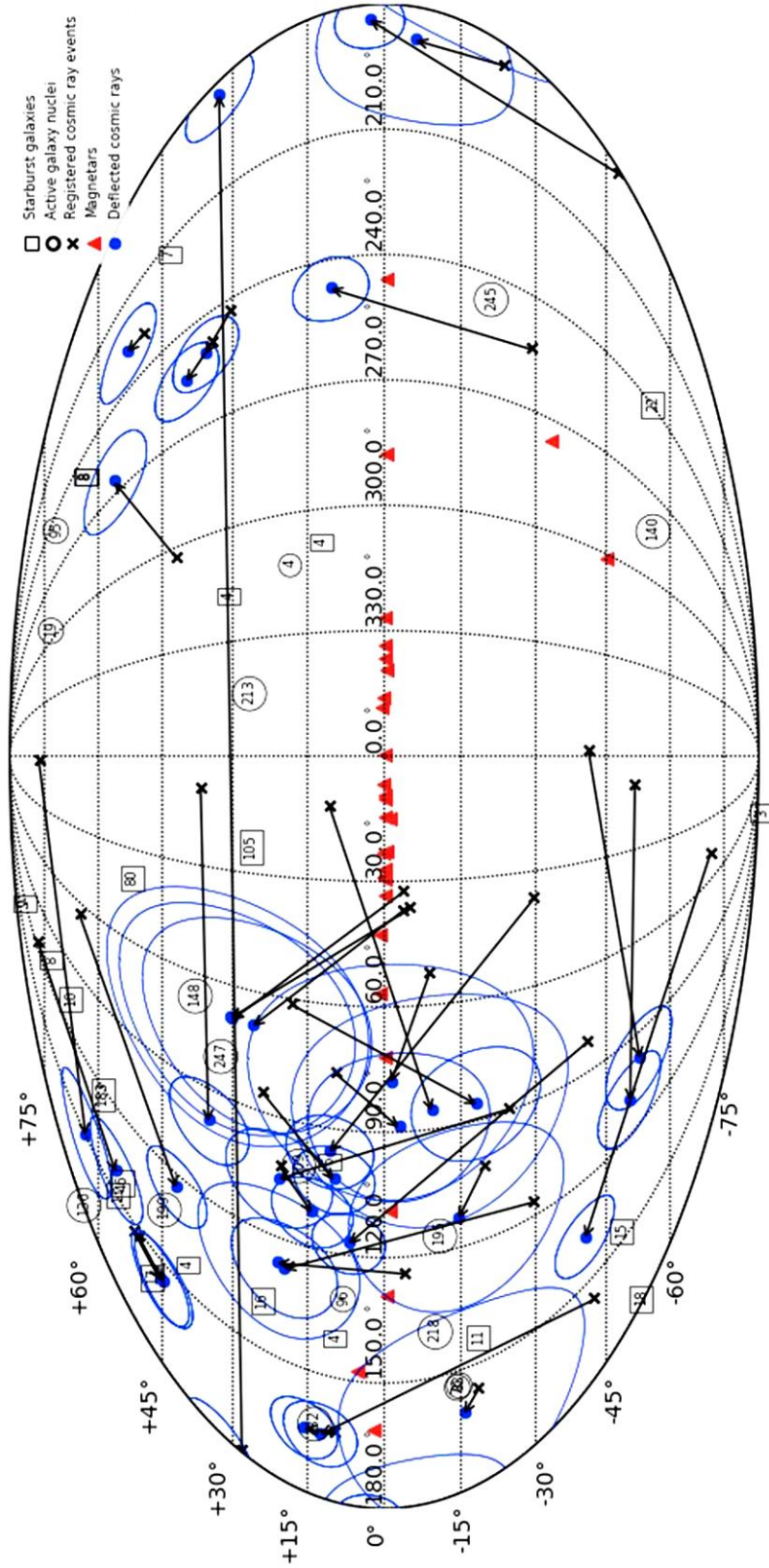


Рис. 6. Те ж для випадку ядер Si

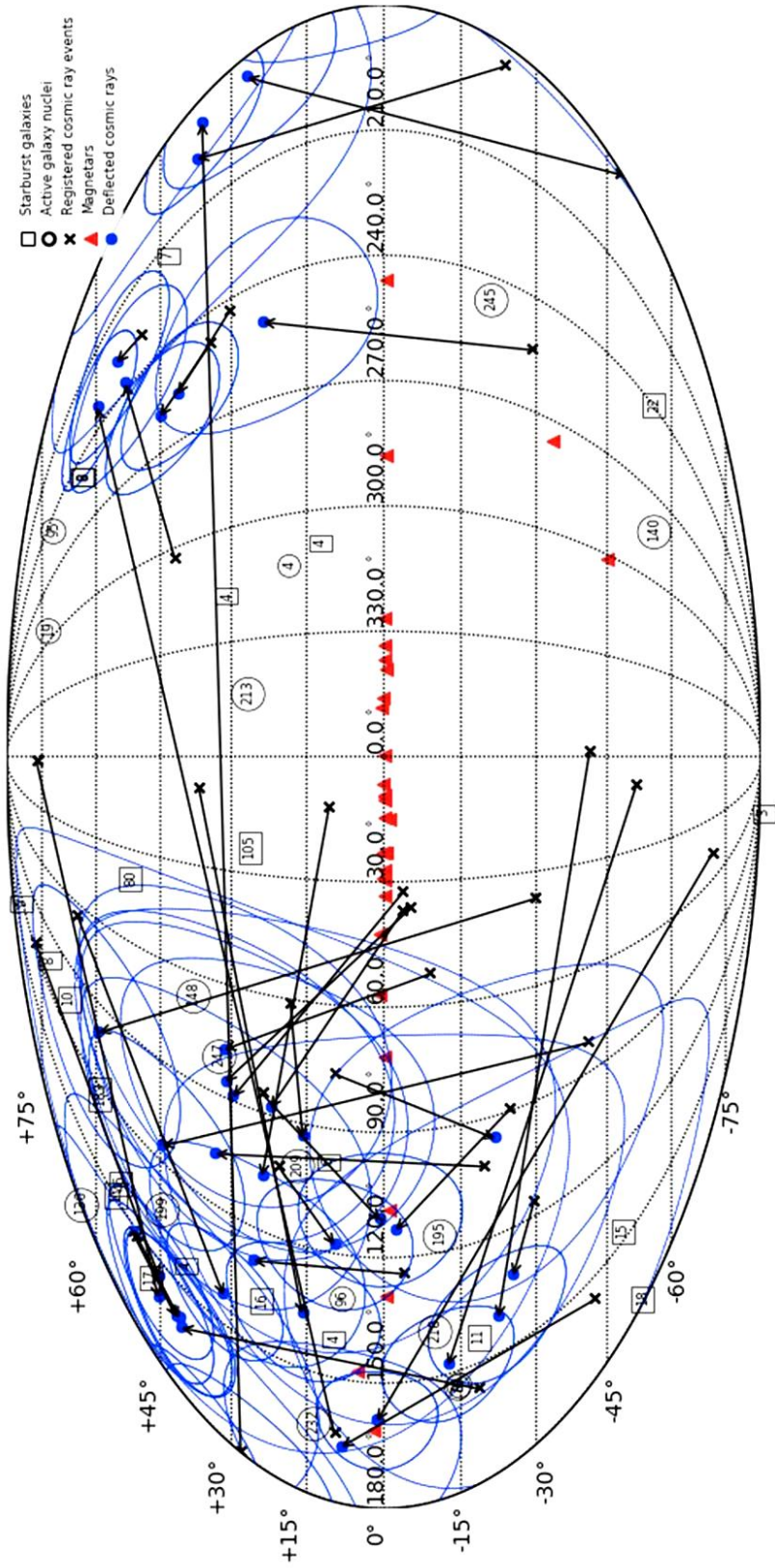


Рис. 8. Те ж для випадку ядер Fe

— вибірка E: масивні скупчення та надскупчення галактик на відстані до 100 Мпк.

КОРЕЛЯЦІЇ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ ЕКСТРЕМАЛЬНО ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ІЗ ПОТЕНЦІЙНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Відносні положення КПНВЕ та вибраних класів астрофізичних об'єктів — кандидатів на їхні джерела — приведено на рис. 2...9. На рис. 2 і 3 показано кореляції координат потоків легких ядер (H та He) із потенційними джерелами. Магнітні поля (головно галактичне) відносно слабо відхиляють легкі ядра, явних кореляцій з позагалактичними джерелами (з урахуванням відстаней до них, які часто перевищують пробіг КПЕВЕ) не виявляється, однак потенційними джерелами для випадку ядер H і He можуть бути галактичні магнетари, зокрема в області галактичної площини $60 > l > 30$. Важливо відмітити, що магнетари тут розглядаються разом із позагалактичними об'єктами, оскільки джерелом КПЕВЕ в усіх об'єктах вважаються джети з високою кінетичною ($L_{\text{кін}}$) та магнітною ($L_{\text{маг}} \sim L_{\text{кін}}$) світністю, для яких максималні енергії прискорених частинок дорівнюють [38]

$$\frac{E_{\text{max}}}{10^{20} \text{ eV}} \sim \frac{Ze}{10^{20} \text{ eV}} \frac{L_{\text{кін}}^{1/2}}{c\Gamma^2} \sim 0.1Z \frac{L_{\text{кін}}^{1/2}}{10^{45.5} \text{ ерг/с}} \frac{2/\Gamma^2}{100}^{1/2}, \quad (2)$$

де e — елементарний заряд, c — швидкість світла, v/c безрозмірна швидкість джета, $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ — його лоренц-фактор. Для типових світностей джетів $\lg(L_{\text{кін}}/\text{ерг/с}) = 44...47$ як ультрарелятивістські ($\Gamma \gg 1$) так і слабкорелятивістські ($\Gamma \sim 0.1$) джети можуть прискорювати ядра (особливо з великим Z) до енергій понад 10^{20} еВ. Крім того, КПЕВЕ як від галактичних, так і від позагалактичних джерел, згідно із рівнянням (1) рухатимуться квазібалістично, мало відхиляючись у магнітних полях і не переходячи на дифузійний режим поширення. Тому для ототожнення їхніх джерел ми можемо зіставляти індивідуальні зареєстровані події із конкретними астрофізичними об'єктами.

Легкі ядра H та He мінімально відхиляються від балістичних траєкторій, тому їхнє ототожнення найбільш інформативне. Однак з рис. 2, 3 та даних таблиці випливає, що їхня доля в зареєстрованих КПЕВЕ незначна.

Окрім того, малий пробіг ядер He суттєво обмежує їхню можливу наявність у зареєстрованих подіях порівняно із ядрами H.

Ядра проміжних мас (групи C-N-O) $Z = 6...8$ суттєвіше відхиляються головно галактичним та частково — позагалактичним магнітними полями (рис. 4, 5).

Збільшення розкиду траєкторій випадковими компонентами галактичного та позагалактичного магнітних полів при збільшенні заряду Z призводить до збільшення кількості потенційних джерел, однак малі пробіги ядер проміжних мас КПЕВЕ суттєво зменшують їхню можливу долю у спостережуваних подіях (табл. 1).

Граничні відстані до джерел (пробіги) КПЕВЕ та їхні потенційні джерела

Елемент	Пробіги КПЕВЕ $E=10^{20}$ еВ / $E=3 \cdot 10^{20}$ еВ, Мпк	Потенційні джерела КПЕВЕ			
		Вибірка А	Вибірки В та D	Вибірка С	Вибірка Е
H	120 / 20	IC310, NGC1275	NGC5055, SGR 1935+2154, 3XMM J185246+003317	–	Pavo-Indus
He	3 / 3.5	–	SGR1900+14	–	–
C	4 / 0.9	–	NGC3079, 4U 0142+61,	–	Ursa-Major
N	6 / 0.8		SGR 0501+4516,		
O	7.5 / 0.7		SGR 1935+2154, 3XMM J185246+0033176, SGR1900+14		
Si	100 / 2.5	TXS0149+ 710, IC310, NGC1275	Arp299, NGC 3079, NGC2146, NGC891, NGC6946, NGC3628, NGC3627, 1E2259+586, SGR 2013+34, 4U 0142+61, SGR 0501+4516, SGR 1935+2154	3C386, 3C129, Perseus A	Ursa-Major, Coma
Ca	150 / 4.5	TXS0149+ 710,	Arp220, NGC6946, M51, NGC5055, NGC2146, IC342,	3C40, 3C129,	Hydra, Perseus-Pisces,
Fe	270 / 18	IC310, NGC1275	NGC891, M82, NGC660, Arp299, NGC4631, NGC3556, NGC3079, NGC1068, SGR 0418+5729, 1E2259+586, SGR 2013+34, 4U 0142+61, SGR 0501+4516, SGR 1935+2154	3C66B, 3C31, 3C386, Perseus A	Ursa-Major, Coma

Розкиди положень ядер великих мас $Z = 14...26$ (групи Si-Ca-Fe) вже сягають десятків градусів і забезпечують значну кількість потенційних джерел для спостережуваних КПЕВЕ цієї масової групи (рис. 6...9), хоча зв'язок з джерелами залишається достатньо чітко детермінованим — переходу на дифузійний режим ще не досягається. Додатковим сприятливим фактором є великий (понад 100 Мпк) пробіг ядер цієї масової групи (таблиця).

ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Дані спостережень КПЕВЕ-подій з енергіями понад 10^{20} еВ належать до найбільш перспективних для виявлення фізичних джерел та механізмів прискорення ширшого класу — позагалактичних космічних променів надвисоких енергій з $E > 10^{18}$ еВ. У галактичному та міжгалактичному магнітних полях космічні промені таких енергій поширюються квазібалістично, не переходячи на дифузійний режим поширення навіть для важких ядер групи заліза. Крім того, їхній пробіг скорочується до 100 Мпк внаслідок збільшення енергетичних втрат зі збільшенням енергії (на фотодезінтеграцію у випадку складних ядер

та фотоіонні втрати у випадку протонів). Ці дві обставини дозволяють провести пошук джерел зареєстрованих КПЕВЕ шляхом пошуку збігів напрямків приходу КПЕВЕ, виправлених за вплив магнітного поля, та положень потенційних джерел на небесній сфері для кожної з подій та кожного з потенційних джерел.

Найбільш ефективним такий аналіз очікується для легких ядер ($Z = 1-2$), які найменше відхиляються магнітним полем. В ряді робіт [4, 12, 41] відмічається, що у потоці КПНВЕ легкий компонент з енергією $E > 50$ Еев може складати помітну долю подій. Зокрема, проведений в роботі [41] аналіз даних «Auger» спостережуваного потоку для $E > 50$ Еев відкриває шанси на астрономію КПЕВЕ. Однак рис. 2, 3 не виявляють зв'язку компонентів Н та He із потенційними джерелами.

Як відмічалось вище, дані «Auger» щодо хімічного вмісту свідчать про домінування ядер проміжних мас у потоці КПНВЕ з $E > 10^{19}$ еВ. Зокрема, для 34 подій «Auger» з $\lg(E/eV) > 19.9$ середня атомна маса становить $\langle \ln A \rangle = 2.6$ (C-N-O-група) в рамках моделі QGSJetII-04 і $\langle \ln A \rangle = 4.1$ (Fe-група) в рамках моделі EPOS-LHC [46]. Однак для ядер C-N-O-групи, пробіг яких менший за 10 Мпк, майже для всіх спостережуваних подій КПЕВЕ немає потенційних джерел. Водночас теоретично ці ядра могли утворитись в околі 10 Мпк від Землі внаслідок фотодеінтеграції важких ядер групи заліза, але в такому випадку мав би спостерігатись і більш інтенсивний потік цих важких ядер на енергіях вище 10^{20} еВ (A_{Fe}/A_C).

Елементи групи Si і особливо групи Fe мають досить багато потенційних джерел (табл. 1). Головно це зумовлено великими пробігами і суттєвим відхиленням траєкторій у випадкових магнітних полях (переважно галактичному). При цьому ефективність методу індивідуальних порівнянь напрямків приходу та положень об'єктів суттєво знижується.

Про домінування проміжних та важких ядер в потоці КПЕВЕ може свідчити ще й такий факт. З рис. 1, 2 видно, що в розподілі напрямків приходу КПЕВЕ спостерігається лакуна в області Галактичного центра при достатньо ізотропному розподілі їхніх потенційних джерел. Зміна напрямків приходу через вплив галактичного магнітного поля посилює цю анізотропію — напрямки входу КПЕВЕ у магнітне поле нашої Галактики концентруються у протяжній області $40 < l < 270$, $b > 0$ зі збільшенням їхнього заряду Z (що рівноцінно зменшенню їхньої жорсткості $R = E/Ze$, яка визначає відхилення частинки у магнітному полі, від $R = 10^{20}$ В для Н до $R = 3.8 \cdot 10^{18}$ В для Fe при $E = 10^{20}$ еВ). Така властивість магнітного лінзування галактичного магнітного поля — підсилувати вклад в загальний потік позагалактичних КПНВЕ одних ділянок неба і послаблювати вклад інших — обговорюється в роботі [23]. Для протонного компонента КПЕВЕ з $E > 10^{20}$ еВ ($R > 10^{20}$ В) цей ефект незначний, і всі ділянки неба даватимуть вклад у потік відповідно до наявних там джерел.

Звичайно, кількості проаналізованих в роботі подій реєстрування КПЕВЕ (31 подія) недостатньо для отримання більш строгих виснов-

ків про їхні потенційні джерела. Накопичення нових даних спостережень, зокрема оновленими масивами детекторів «Auger» та ТА, можливо навіть до введення в дію нових детекторів (JEM-EUSO, GRAND, РОЕММА) допоможе виявити довгоочікувані джерела КПЕВЕ.

ПОДЯКИ

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України у рамках конкурсного проєкту номер Ф82/46932.

Висловлюємо подяку за використання: ATFF Pulsar Catalogue (<http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>), The McGill Magnetar Catalog (<http://www.physics.mcgill.ca/pulsar/magnetar/main.html>), SNR Catalog (<http://www.physics.umanitoba.ca/snr/SNRcat/>). В роботі використано базу даних SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France.

REFERENCES

1. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (2014) Searches for large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays detected above energy of 10^{19} eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array. *Astrophys. J.* 794(2). 172.
2. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (2015) Searches for anisotropies in the arrival directions of the highest energy cosmic rays detected by the Pierre Auger Observatory. *Astrophys. J.* 804(1). 15.
3. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (2015) The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A.* 798. 172—213.
4. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (2017) *Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 EeV using the water-Cherenkov detectors of the Pierre Auger Observatory.* eprint arXiv:1710. 07249.
5. Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al. (2018) An indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources. *Astrophys. J.* 853(2). id. L29.
6. Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T., et al. (2014) Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment. *Astrophys. J.* 790(2). id. L21.
7. Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M., et al. (2012) The surface detector array of the Telescope Array experiment. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A.* 689. 87—97.
8. Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M., et al. (2015) Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique. *Astropart. Phys.* 61. 93—101.
9. Aloisio R., Berezhinsky V., Blasi P., et al. (2007) A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays. *Astropart. Phys.* 27(1). 76—91.
10. Arons J. (2003) Magnetars in the metagalaxy: An origin for ultra high energy cosmic rays in the nearby Universe. *Astrophys. J.* 589(2). 871—892.
11. Berezhinsky V. (2014) Extragalactic cosmic rays and their signatures. *Astropart. Phys.* 53. 120—129.
12. Bergman D. R. (2019) Combined fit of the spectrum and composition from Telescope Array. *Proc. Sci. ICRC2019.* id. 190.
13. Biermann P. L., Caramete L. I., Frascetti F., et al. (2016) *The nature and origin of ultra-high energy cosmic ray particles.* eprint arXiv:1610. 00944.
14. Bird D. J., Corbato S. C., Dai H. Y., et al. (1995) Detection of a cosmic ray with measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to cosmic microwave radiation. *Astrophys. J.*, Part 1. 441(1). 144—150.

15. Caccianiga L. (2019) Anisotropies of the highest energy cosmic-ray events recorded by the Pierre Auger Observatory in 15 years of operation. *Proc. Sci. ICRC2019*. id. 206.
16. Deligny O. (2019) The energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays measured at the Pierre Auger Observatory and at the Telescope Array. *Proc. Sci. ICRC2019*. id. 234.
17. Dembinski H. P., Engel R., Fedynitch A., et al. (2017) Data-driven model of the cosmic-ray flux and mass composition from 10 GeV to 10^{11} GeV. *Proc. Sci. ICRC2017*. id. 533.
18. di Matteo A., Bister T., Biteau J., et al. (2019) Full-sky searches for anisotropies in UHECR arrival directions with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array. *Proc. Sci. ICRC2019*. id. 439.
19. Durrer R., Neronov A. (2013) Cosmological magnetic fields: their generation, evolution and observation. *Astron. and Astrophys. Rev.* 21. 62.
20. Fang K., Kotera K., Olinto A. V. (2012) Newly-born pulsars as sources of ultrahigh energy cosmic rays. *Astrophys. J.* 750(2). 118.
21. Farrar G. R., Gruzinov A. (2009) Giant AGN flares and cosmic ray bursts. *Astrophys. J.* 693(1). 329—332.
22. Farrar G. R., Piran T. (2014) *Tidal disruption jets as the source of ultra-high energy cosmic rays*. arXiv:1411.0704 astro-ph. HE.
23. Farrar G. R., Sutherland M. S. (2019) Deflections of UHECRs in the Galactic magnetic field. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 05. id. 004.
24. Fitoussi T., Medina-Tanco G., D’Olivo J.-C. (2019) Legacy from Fly’s Eye: Making sense of the highest energy cosmic ray ever observed. *Proc. Sci. ICRC2019*. id. 256.
25. Fukushima M. (2015) *Recent results from Telescope Array*. arXiv:1503.06961 astro-ph. HE.
26. Globus N., Allard D., Mochkovitch R., et al. (2015) UHECR acceleration at GRB internal shocks. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 451(1). 751—790.
27. Guépin C., Kotera K. (2017) Can we observe neutrino flares in coincidence with explosive transients? *Astron. and Astrophys.* 603. id. A76.
28. Halzen F., Vázquez R. A., Stanev T., et al. (1995) The highest energy cosmic ray. *Astropart. Phys.* 3(2). 151—156.
29. Hanlon W. (2019) Telescope Array 10 year composition. *Proc. Sci. ICRC2019*. id. 280.
30. Hooper D., Sarkar S., Taylor A. M. (2008) The intergalactic propagation of ultra-high energy cosmic ray nuclei: An analytic approach. *Phys. Rev. D.* 77(10). id. 103007.
31. Horiuchi S., Murase K., Ioka K., et al. (2012) The survival of nuclei in jets associated with core-collapse supernovae and gamma-ray bursts. *Astrophys. J.* 753. 69.
32. Jansson R., Farrar G. R. (2012) The galactic magnetic field. *Astrophys. J.* 761(1). id. L11.
33. Jansson R., Farrar G. R. (2012) A new model of the galactic magnetic field. *Astrophys. J.* 757(1). 14.
34. Jedamzik K., Saveliev A. (2019) Stringent limit on primordial magnetic fields from the cosmic microwave background radiation. *Phys. Rev. Lett.* 123(2). id. 021301.
35. Kawata K., di Matteo A., Fujii T., et al. (2019) TA anisotropy summary. *EPJ Web Conf.* 210. id. 01004.
36. Kotera K., Amato E., Blasi P. (2015) The fate of ultrahigh energy nuclei in the immediate environment of young fast-rotating pulsars. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 8. id. 026.
37. Kotera K., Olinto A. V. (2011) The astrophysics of ultrahigh energy cosmic rays. *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 49(1). 119—153.
38. Kuempel D. (2014) *Extragalactic propagation of ultra-high energy cosmic rays*. arXiv:1409.3129v2 astro-ph.HE.
39. Lemoine M., Waxman E. (2009) Anisotropy vs chemical composition at ultra-high energies. *JCAP.* 11. 009.
40. Mészáros P. (2014) Ultra-high energy cosmic rays and neutrinos from gamma-ray bursts, hypernovae and galactic shocks. *Nuclear Phys. B (Proc. Suppl.)*. 256. 241—

- 251.
41. Muzio M. S., Unger M., Farrar G. R. (2019) Progress towards characterizing ultrahigh energy cosmic ray sources. *Phys. Rev. D.* 100(10). id. 103008.
 42. Nagano M., Watson A. (2000) Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays. *Rev. Mod. Phys.* 72(3). 689—732.
 43. Neronov A. (2017) Supernova origin of cosmic rays from a γ -ray signal in the constellation III region of the Large Magellanic Cloud. *Phys. Rev. Lett.* 119(19). id. 191102.
 44. Norman C. A., Melrose D. B., Achterberg A. (1995) The origin of cosmic rays above $10^{18.5}$ eV. *Astrophys. J.* 454. 60.
 45. Olausen S. A., Kaspi V. M. (2014) The McGill magnetar catalog. *Astrophys. J. Suppl.* 212(1). 6.
 46. Peixoto C. J. T. (2019) Estimating the depth of shower maximum using the surface detectors of the Pierre Auger Observatory. *Proc. Sci. ICRC2019.* id. 440.
 47. Rachen J. P., Eichmann B. (2019) A parameterized catalog of radio galaxies as ultra-high energy cosmic ray sources. *Proc. Sci. ICRC2019.* id. 396.
 48. Takami H., Murase K., Dermer C. D. (2016) Isotropy constraints on powerful sources of ultrahigh-energy cosmic rays at 10^{19} eV. *Astrophys. J.* 817(1). 59.
 49. Taylor A. M. (2013) The need for hard spectra sources of nearby heavy cosmic rays. *EPJ Web Conf.* 53. id. 06007.
 50. Taylor A. M., Ahlers M., Aharonian F. A. (2011) Need for a local source of ultrahigh-energy cosmic-ray nuclei. *Phys. Rev. D.* 84(10). id. 105007.
 51. Tully R. B., Fisher J. R. (1987) *Nearby galaxies atlas.* Cambridge: Univ. Press.
 52. Tully R. B., Pomarède D., Graziani R., et al. (2019) Cosmicflows-3: Cosmography of the Local Void. *Astrophys. J.* 880(1). id. 24.
 53. Yushkov A. (2019) Mass composition of cosmic rays with energies above $10^{17.2}$ eV from the hybrid data of the Pierre Auger Observatory. *Proc. Sci. ICRC2019.* id. 482.
 54. Zhang B. T., Murase K., Kimura S. S., et al. (2018) Low-luminosity gamma-ray bursts as the sources of ultrahigh-energy cosmic ray nuclei. *Phys. Rev. D.* 97(8). id. 083010.

Р. Гнатюк¹, В. Войцеховский²

¹Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВИСОКИХ ЭНЕРГИЙ ($E > 10^{20}$ эВ): ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Одной из нерешенных проблем физики космоса остается установление природы и источников космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ, $E > 10^{18}$ эВ). Высокая степень изотропии наблюдаемой интенсивности КЛСВЭ, обусловленная главным образом отклонениями их траекторий в межгалактических и галактических магнитных полях, вместе с существенной неопределенностью химического содержания (атомной массы) КЛСВЭ не позволяют осуществить привязку наблюдаемых событий к их источникам и установить механизмы их ускорения. Уменьшить влияние магнитного отклонения можно двумя путями — рассмотрением событий с экстремально высокой энергией (КЛЭВЭ, $E > 10^{20}$ эВ) и учетом современных моделей галактического магнитного поля для коррекции его влияния на траектории КЛЭВЭ. В нашей работе для выборки КЛЭВЭ по данным детекторов Pierre Auger Observatory (Auger) и Telescope Array (TA) наблюдаемые направления прихода скорректированы за влияние галактического и случайного внегалактического магнитных полей. Новые положения КЛЭВЭ на небесной сфере сопоставлены с используемыми Auger выборками потенциальных источников: 17 активных ядер галактик (АЯГ) с мощным гамма-излучением (из 2FHL-каталога) и 23 галактики со

вспышкой звездообразования (отобранных по радиопотоком), а также с выборками 42 радиогалактик из параметризованого каталога радиогалактик и магнетаров. С учетом пробега ядерного компонента (H, He, C, Si, Fe) КЛЭВЭ в межгалактической среде и ожидаемых типичных расстояний до потенциальных источников (порядка 100 Мпк для H и Si-Fe и 50 Мпк для He и C) выделены астрофизические объекты вышеуказанных выборок, которые могут быть источниками соответствующих событий. Проанализированы потенциальные механизмы ускорения в выделенных объектах, оценен вклад возможных галактических источников в поток КЛЭВЭ.

Ключевые слова: космические лучи, ядра активных галактик, радиогалактики, магнетары.

R. Hnatyk¹, V. Voitsekhovskiy²

¹Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv ,
Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

EXTREMELY HIGH ENERGY ($E > 10^{20}$ eV) COSMIC RAYS: POTENTIAL SOURCES

One of the unsolved problems of cosmic ray physics, is the establishment of the nature and sources of ultrahigh energy cosmic rays (UHECR, $E > 10^{18}$ eV). The observed high degree of isotropy of the observed UHECR intensity, caused mainly by the deviations of the UHECR trajectories in extragalactic and Galactic magnetic fields, with the significant uncertainty in their chemical composition (atomic mass), don't allow observed events to be linked to their sources and mechanisms for their acceleration established. It is possible to reduce the influence of magnetic deflection in two ways — by considering events with extremely high energy (EHECR, $E > 10^{20}$ eV) and taking into account modern models of the Galactic magnetic field to correct its influence on the EHECR trajectory. In our work, the observed directions of arrival EHECR, according to the Auger and TA detectors, are adjusted for the influence of Galactic and random extragalactic magnetic fields. New celestial EHECR provisions are compared to samples of potential sources: 17 AGNs with powerful gamma radiation (from the 2FHL catalog) and 23 star-burst galaxies (radioflux-selected), as well as with selections of 42 radio galaxies from the parameterized catalog of radio galaxies and magnetars. Taking into account the energy loss lengths of the nuclear component (H, He, C, Si, Fe) EHECR in the extragalactic environment and the expected typical distances to potential sources (~ 100 Mpc for H and Si-Fe and ~ 50 Mpc for He, C), the astrophysical objects of the above samples that could be sources of relevant EHECR events are highlighted. The potential acceleration mechanisms in the selected objects are analyzed, and the contribution of possible Galactic sources to the observed EHECR flux is evaluated.

Key words: cosmic rays, active galactic nuclei, radiogalaxies, magnetars.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2019

Після доопрацювання 29.01.2020

Прийнята до друку 14.02.2020