

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Гнатик Роман Богданович

УДК 524.1+524.3+524.7

**ДЖЕРЕЛА, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СПЕКТР ТА ХІМІЧНИЙ ВМІСТ
КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАЙВИЩИХ ЕНЕРГІЙ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Жданов Валерій Іванович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса
Шевченка МОН України, завідувач відділу астрофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Новосядлий Богдан Степанович,
Астрономічна обсерваторія Львівського
національного університету імені Івана Франка
МОН України, головний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук
Бешлей Василь Володимирович,
Інститут прикладних проблем механіки
і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
науковий співробітник.

Захист відбудеться “27” квітня 2017 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий “ 22 ” березня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення джерел та механізмів прискорення космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ, $E > 10^{18}$ eВ) та гранично високих енергій (КПГВЕ, $E > 10^{20}$ eВ) залишається однією з найактуальніших задач сучасної астрофізики. На жаль, за більш ніж сторіччя дослідження досі залишаються невідомими джерела та механізми прискорення КПНВЕ. І це при тому, що за останні десятиліття було реалізовано ряд великомасштабних експериментів з реєстрації КПНВЕ. Зокрема, експерименти Fly's Eye, YAKUTSK, Аkeno-AGASA, HiRes, AUGER, Telescope Array (ТА) дали важливу інформацію про загальний потік, енергетичний спектр, хімічний вміст та анізотропію КПНВЕ [18–20].

Із загальних фізичних міркувань, зокрема з умови утримання їх магнітним полем нашої Галактики, випливає, що космічні промені з енергіями понад 1 EeВ повинні мати позагалактичне походження. Проте останнім часом відбулася зміна парадигми прискорення КПНВЕ. До потенційних джерел додалися компактні об'єкти нашої Галактики, такі як молоді мілісекундні пульсари і магнетари. У першому випадку прискорення відбувається у потужному пульсарному вітрі, а у другому – внаслідок вибухових процесів на поверхні магнетара, викликаних перезамиканням магнітних силових ліній. Також цими моделями можна пояснити наявність важких ядер у потоці КПНВЕ. Однак кількісні самоузгоджені моделі джерел КПНВЕ ще далекі від завершення.

Важливо відзначити, що максимальна енергія зареєстрованих досі КПНВЕ становить $3.2 \cdot 10^{20}$ eВ, що приблизно на 8 порядків перевищує очікувану енергію протона в експерименті ЛНС (Large Hadron Collider) (7 TeВ). Тому дослідження КПНВЕ є надзвичайно важливими для фізики елементарних частинок та фундаментальних взаємодій, астрофізики компактних об'єктів і для кращого розуміння нестационарних процесів у Всесвіті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась під час навчання в аспірантурі на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Виконання проводилось у межах теми № 11БФ023-01 – «Характеристики розподілу матерії у Всесвіті та властивості об'єктів, розташованих на космологічних відстанях» (номер державної реєстрації 0111U006170), теми № 16БФ023-01 – «Фундаментальна фізика та моделі високоенергетичних астрофізичних явищ» (номер державної реєстрації 0116U002525), договору № 14ДФ023-01 – «Вивчення взаємодії космічних променів з фоновими електромагнітними полями, міжгалактичним і галактичним магнітними полями, її вплив на формування спостережуваного спектру космічних променів надвисоких енергій» і договору № 15ДФ023-01 – «Темна енергія та темна матерія в астрофізичних об'єктах та космології». У вищезазначених наукових дослідженнях здобувач брав участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження природи та джерел космічних променів найвищих енергій на основі даних спостережень енергетичного спектру та хімічного вмісту космічних променів надвисоких енергій і

пошук потенційних джерел космічних променів гранично високих енергій з врахуванням їх взаємодії з галактичними та міжгалактичними магнітними полями. Для реалізації цієї мети було поставлено наступні задачі:

- Відтворення хімічного вмісту КПНВЕ на основі нових спостережних даних щодо параметрів широких атмосферних злив у рамках моделей з багатокомпонентним (протони та більш масивні ядра) потоком.
- Дослідження області переходу від домінування галактичного до домінування позагалактичного компонента в загальному потоці космічних променів, розрахунок внеску кожного з компонентів.
- Пошук потенційних галактичних джерел КПГВЕ з врахуванням їх хімічного вмісту та відхилення траєкторій у магнітному полі Галактики.
- Пошук потенційних позагалактичних джерел КПГВЕ з врахуванням відхилень їх траєкторій у галактичних і позагалактичних магнітних полях.
- Аналіз формування кластерів подій в розподілі КПНВЕ, породжуваних транзйентними джерелами в режимі переходу від балістичного до дифузійного поширення КПНВЕ.

Об'єкт досліджень: космічні промені надвисоких та гранично високих енергій, їх потенційні джерела: активні ядра галактик, магнетари, пульсари.

Предмет досліджень: спектр КПНВЕ, хімічний вміст космічних променів, поширення КПНВЕ в галактичних та позагалактичних магнітних полях.

Методи досліджень: теоретичне моделювання енергетичного спектру і хімічного вмісту КПНВЕ, аналіз експериментальних даних для встановлення параметрів моделей, чисельне моделювання поширення КПГВЕ в галактичному магнітному полі.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується використанням сучасних високоякісних даних спостережень, застосуванням фізично обґрунтованих методів аналізу енергетичних спектрів космічних променів, використанням апробованих математичних методів розв'язку рівнянь поширення космічних променів із перевіркою їх на тестових прикладах, збігом результатів з відомими результатами інших досліджень в області їх перетину. Результати роботи були також апробовані на міжнародних конференціях.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведено аналіз відхилень траєкторій космічних променів, відповідальних за події триплету космічних променів з енергіями вище 10^{20} eV, у галактичному магнітному полі, та, на його основі, виділено потенційні галактичні джерела цих подій, зокрема магнетар SGR 1900+14.

2. Вперше проведено аналіз відхилень траєкторії космічного променя, відповідального за подію з найвищою зареєстрованою енергією ($3.2 \cdot 10^{20}$ eV) у галактичному та міжгалактичному магнітних полях, та, на його основі, виділено потенційні позагалактичні джерела цієї події, зокрема галактики UGC 03574 та UGC 03394.

3. Вперше застосовано розв'язки рівнянь кінетики, що описують перехід від балістичного до дифузійного поширення КПНВЕ, для пояснення кластерів подій від транзйентних джерел, та, на їх основі, проведено моделювання появи кластерів від галактичного (пульсар PSR J1846–0258) та позагалактичного (активне ядро галактики (АЯГ) Центавр А) транзйентних джерел.

4. На основі аналізу даних щодо спектру та хімічного вмісту космічних променів в області енергій 10^{17} – 10^{18} еВ, отриманих в експерименті KASCADE-Grande, вперше показано, що виявлений в експерименті потік легких ядер можна пояснити сумою потоків галактичних ядер СНО-групи, що домінують на низьких енергіях (до $2 \cdot 10^{17}$ еВ), та позагалактичних протонів, що домінують на енергіях вище $2 \cdot 10^{17}$ еВ, в повній відповідності із передбаченнями протонної моделі позагалактичного компонента КПНВЕ.

5. Вперше розраховано середні глибини максимумів злив $\langle X_{max}(E) \rangle$ та їх середнє квадратичне відхилення $\sigma(E) = \text{RMS}(\langle X_{max}(E) \rangle)$ як функції енергії КПНВЕ E для потоків, що складаються з суміші протонного, гелієвого та залізного компонентів. Показано, що експериментальні дані детектора AUGER щодо $\langle X_{max}(E) \rangle$ та $\sigma(E)$ не можна самоузгоджено пояснити в рамках цих широковживаних моделей. Показано, що моделі генерації КПНВЕ внаслідок прискорення важких ядер гамма-спалахом у нашій Галактиці суперечать спостережним даним щодо $\langle X_{max}(E) \rangle$.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Відтворені потоки і хімічний вміст КПНВЕ можуть бути використані в моделюванні потенційних джерел та механізмів прискорення КПНВЕ.
2. Обґрунтований у роботі перехід від домінування галактичного до позагалактичного компонента в області $3 \cdot 10^{17}$ еВ, як і передбачалось в протонній моделі КПНВЕ, становить інтерес для обґрунтування подальших експериментальних та теоретичних робіт щодо встановлення природи КПНВЕ.
3. Виділений у роботі список потенційних галактичних та позагалактичних джерел КПНВЕ може бути основою для подальших першочергових експериментальних досліджень цих об'єктів для підтвердження чи спростування їх внеску в прискорення КПНВЕ.
4. Запропонований та обґрунтований у роботі підхід до пошуку джерел КПНВЕ на основі першочергового аналізу подій з гранично високими енергіями – понад 10^{20} еВ внаслідок їх слабкої чутливості до відхилень у магнітних полях та відносної близькості до Землі може бути використаний при плануванні майбутніх експериментів та досліджень КПНВЕ.
5. Проведені в роботі дослідження впливу галактичного магнітного поля на поширення космічних променів становлять інтерес для інтерпретації даних спостережень щодо поширення космічних променів в околах залишків Наднових зір тощо.
6. Проведене в роботі моделювання спектрів КПНВЕ від транзйентних джерел в області енергій космічних променів, де відбувається перехід від балістичного до дифузійного поширення, становить інтерес для широкого класу астрофізичних задач, де дифузійне наближення незастосовне і в потоці космічних променів присутня помітна частка нерозсіяних частинок.

Одержані в дисертації результати можуть бути застосовані в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Львівському національному університеті імені Івана Франка, в інститутах НАН України: Головній астрономічній обсерваторії, Інституті теоретичної фізики, Інституті прикладних проблем механіки і математики, а також в інших наукових установах України та зарубіжжя.

Особистий внесок здобувача. Роботи [1–4] виконані автором самостійно. У роботі [5] автор брав участь у постановці задачі, провів розрахунок спостережних проявів КПНВЕ від пульсара PSR J1846–0258, брав участь у аналізі отриманих результатів та у написанні статті. У роботі [6] автор брав участь у постановці задачі, провів розрахунки відхилення космічних променів з області події з максимальною зареєстрованою енергією (FE-події) в галактичному та позагалактичному магнітних полях, брав участь у аналізі отриманих результатів та написанні статті. У роботі [7] автор брав участь у розрахунку траєкторій космічних променів триплету в галактичному магнітному полі, аналізі результатів та написанні статті.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах:

- Наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (Чернігів, 12–14 травня 2011 р.);
- Міжнародна конференція “Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology” (Київ, 7–10 червня 2011 р.);
- 20th, 21st, 22nd, 23rd, Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics (Київ, квітень 2013, 2014, 2015, 2016 pp.);
- міжнародні конференції «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» (Київ, травень 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 pp.);
- семінари відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 7 статтях у наукових журналах [1–7] та в 10 тезах конференцій [8–17].

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, оглядового розділу, трьох оригінальних розділів, висновків. Обсяг дисертації становить 123 сторінки. Робота містить 65 рисунків, 14 таблиць та 113 джерел у списку використаних посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Подано загальну характеристику роботи. Описано актуальність теми, зв’язок роботи з науковими програмами, планами та темами, мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів,

особистий внесок здобувача. Приведено перелік конференцій, де відбувалася апробація результатів дисертації. Наведено відомості стосовно публікації результатів та опис загальної структури і обсягу дисертації.

Розділ 1 «Космічні промені високих енергій: експериментальні дані та теоретичні моделі» має оглядовий характер.

В підрозділі 1.1 описано історію дослідження явища космічних променів – від перших детектувань до створення сучасних детекторів високоенергетичних частинок.

В підрозділі 1.2 наведено методи детектування, які використовуються сучасними детекторами, описано структуру сучасних детекторів. Зокрема, описано детектори HiRes, Telescope Array, AUGER, KASCADE-Grande та детектор JEM-EUSO, який планується запустити в майбутньому.

В підрозділі 1.3 проаналізовано основні характеристики космічних променів. Описано спектр і його особливості: спектр космічних променів є степеневим $F(E) = k \cdot E^{-\gamma}$ з показником степеня, який залежить від енергії $\gamma = \gamma(E)$ [21–23] (рис. 1). Порівняно спектри, виміряні експериментами AUGER і ТА. Відмічено невідповідність спостережуваних даних цих двох експериментів.

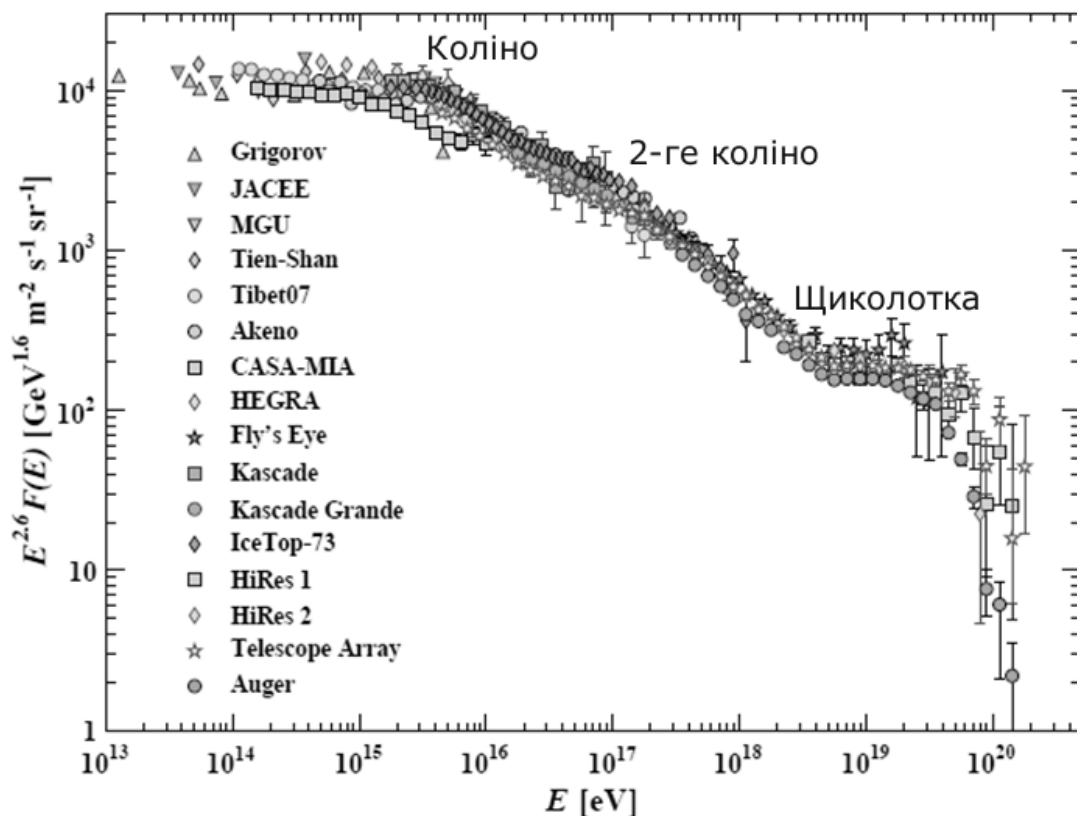


Рис. 1. Сумарний енергетичний спектр космічних променів у представленні $E^{2.6} F(E)$ за даними різних експериментів станом на 2016 рік (рисунок з [24]).

Описано також сучасні дані щодо хімічного вмісту космічних променів на різних енергіях. Приведено дані сучасних експериментів щодо $\langle X_{max}(E) \rangle$ та $\sigma(E)$ які характеризують хімічний вміст космічних променів. Вказано на різницю у

вимірюваннях експериментів AUGER і TA. Розглянуто анізотропію напрямків приходу космічних променів [25].

В підрозділі 1.4 описано основні механізми прискорення та можливі джерела космічних променів найвищих енергій. Космічні промені з енергіями до 10^{17} – 10^{18} eV прискорюються на ударних фронтах галактичних залишків Наднових зір механізмом Фермі першого порядку [21]. Важливим може бути прискорення космічних променів у пульсарно-вітрових туманностях, породжених молодими пульсарами з мілісекундними періодами обертання [26, 27]. Спостережуваний ізотропний потік КПНВЕ з енергіями понад 10^{18} eV вважається позагалактичним, а його основними потенційними джерелами вважаються активні ядра галактик та космологічні гамма-спалахи [21, 23, 28–30].

В підрозділі 1.5 описано результати пошуку точкових джерел колабораціями Pierre Auger Observatory (PAO) і Telescope Array (TA). Відзначено відсутність окремих джерел (кластерів з близькими напрямками приходу) космічних променів, що може свідчити про транзієнтність джерел космічних променів. Також обґрунтовано наявність обрізання спектру в області гранично високих енергій (ГЗК-горизонту) для позагалактичних джерел.

В підрозділі 1.6 описано теоретичні моделі космічних променів надвисоких енергій – протонну модель та ядерну модель. Протонна модель, запропонована Березінським та ін. [19, 23, 31, 32], передбачає, що космічні промені найвищих енергій в усьому діапазоні енергій від 10^{18} eV до 10^{20} eV – це, в основному, протони. Особливості спектру, такі як провал “dip” та ГЗК-обрізання, пояснюються на основі того, що враховується взаємодія космічних променів з реліктовим випромінюванням, яка приводить до народження електрон-позитронних пар (область провалу) та народження піонів (область ГЗК-обрізання). А в ядерній моделі вважається, що перехід від домінування галактичного до позагалактичного компонента відбувається в області провалу ($E \sim 5 \cdot 10^{18}$ eV) [33].

В підрозділі 1.7 описано невирішені проблеми фізики космічних променів. Крім відсутності джерел КПНВЕ, основними невирішеними проблемами є відсутність загальноприйнятої моделі прискорення КПНВЕ, можливість прискорення КПНВЕ в нових потенціальних джерелах: пульсарно-вітрових туманностях, при гігантських спалахах магнетарів, в явищах припливного руйнування зір в околі надмасивних чорних дір та внаслідок розпаду надмасивної темної матерії.

Розділ 2 «Хімічний вміст та енергетичний спектр космічних променів надвисоких енергій». У розділі йдеться про вивчення природи КПНВЕ. Приведено результати визначення внесків різних ядер (водню, гелію, заліза) у загальний потік та сумарний енергетичний спектр КПНВЕ на основі аналізу даних сучасних спостережень.

В підрозділі 2.1 приведено вступ до проблеми встановлення хімічного вмісту та енергетичного спектру космічних променів надвисоких енергій.

В підрозділі 2.2 описано дослідження зміни початкового спектру (спектру генерації) внаслідок взаємодії КПНВЕ з реліктовим фоном. Результат взаємодії

описується перехідною функцією – модифікаційним фактором. Спостережуваний спектр i -того компонента спектру КПНВЕ ($i = p, He, Fe \dots$) $J_i(E)$ буде модифікацією неспотвореного реліктом первісного спектру генерації $J_i^{gen}(E)$, яка описується модифікаційним фактором [34] (рис. 2):

$$\eta_i(E) = J_i(E)/J_i^{gen}(E); J_i(E) = J_i^{gen}(E)\eta_i(E).$$

Використовуючи експоненційну форму представлення модифікаційного фактора, запропоновану у [35], нами розраховано апроксимації для протонного та важкого компонентів і підібрано оптимальні значення для вільних параметрів моделі:

$$\eta(E) = 2 / (\exp(-E_e/E)H^{-1}T_e^{-1} + \exp(-E_p/E)H^{-1}T_p^{-1} + 2),$$

де $\eta(E)$ – модифікаційний фактор; E_e, E_p – характерні енергії утворення електрон-позитронних пар та піонів відповідно; T_e, T_p – характерні часи втрат енергії на утворення електрон-позитронних пар та піонів відповідно; H – стала Габбла, обернено пропорційна до віку Всесвіту як характерного часу втрат енергії при адіабатичному розширенні Всесвіту.

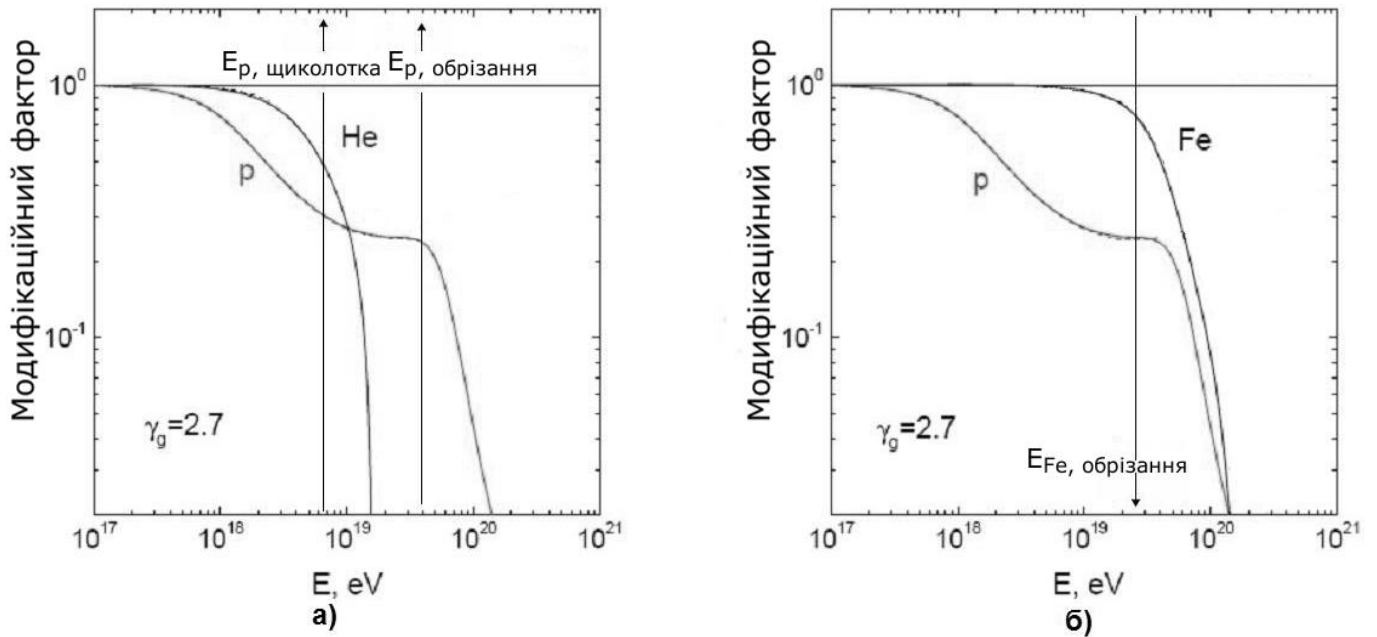


Рис. 2. Модифікаційний фактор для протонів і гелію (а) та заліза (б).

В підрозділі 2.3 описано проведення відновлення внеску протонного та залізного компонентів у загальний потік КПНВЕ на основі даних AUGER 2011 [36]. Використовуючи дані щодо $\langle X_{max}(E) \rangle$ відновлено внесок протонного та залізного компонентів на різних енергіях. Так, для потоку, що складається із суміші потоків двох елементів – заліза J_{Fe} та водню J_p , середня глибина максимуму розвиту злив на певній енергії дорівнює:

$$X_{max}^{p+Fe} = \frac{J_p X_{max}^p + J_{Fe} X_{max}^{Fe}}{J_p + J_{Fe}}.$$

Знаючи цю середню глибину, можемо знайти долю заліза α та водню $(1 - \alpha)$ в загальному потоці на певній енергії:

$$\alpha = \frac{J_{Fe}}{J_p + J_{Fe}} = \frac{X_{p+Fe} - X_p}{X_{Fe} - X_p}.$$

Показано, що основний внесок в загальний потік КПНВЕ дають протони у всьому діапазоні енергій, а форма спектру протонного компонента близька до передбачуваного модифікаційним фактором для показника спектру генерації $\gamma = 2.6$. Залізний компонент дає малий внесок у загальний потік на всіх енергіях, досягаючи максимального внеску $\alpha = 0.32$ при $E = 3 \cdot 10^{19}$ еВ. Форма спектру залізного компонента також близька до передбачуваного модифікаційним фактором заліза, але показник спектру генерації інакший: $\gamma \approx 2.0$, що може свідчити про різні механізми прискорення.

В підрозділі 2.4 описано проведення аналізу моделей, в яких КПНВЕ прискорюються на фронтах ударних хвиль від Гіпернових [37]. В цих моделях всі КПНВЕ мають галактичне походження, на низьких енергіях в загальному потоці домінують протони, на високих – ядра заліза. Показано, що ці моделі не узгоджуються з даними AUGER щодо хімічного вмісту.

В підрозділі 2.5 описано розрахунок $\langle X_{max}(E) \rangle$ для суміші протонів, гелію і заліза з врахуванням модифікаційного фактора. Розглянуто потік, який складається з суміші протонів (p), ядер гелію (He) та заліза (Fe) у пропорції $(1 - \alpha - \beta) : \beta : \alpha$. Для такої суміші середня глибина максимуму розвитку злив на певній енергії з врахуванням модифікаційних факторів та можливих різних нахилів спектрів різних компонентів дорівнює:

$$X_{max}^{p+Fe+He} = \frac{(1 - \alpha_0 - \beta_0) \eta_p X_{max}^p + \beta_0 \eta_{He} (E/E_0)^{\gamma_p - \gamma_{He}} X_{max}^{He} + \alpha_0 \eta_{Fe} (E/E_0)^{\gamma_p - \gamma_{Fe}} X_{max}^{Fe}}{(1 - \alpha_0 - \beta_0) \eta_p + \beta_0 (E/E_0)^{\gamma_p - \gamma_{He}} \eta_{He} + \alpha_0 (E/E_0)^{\gamma_p - \gamma_{Fe}} \eta_{Fe}}.$$

Розглянуто такі часткові випадки цієї формули: суміш ядер гелію та протонів, суміш ядер заліза та протонів, суміш всіх трьох компонентів. Розраховано поведінку середньоквадратичного відхилення $\langle X_{max}(E) \rangle$: $RMS(X_{max}(E)) = \sigma(E)$ від енергії для суміші ядер заліза та протонів, для різних внесків кожного компонента в загальному потоці.

В підрозділі 2.6 описано врахування впливу обмежень зверху на максимальні енергії прискорених частинок при відтворенні хімічного вмісту за даними експерименту AUGER. Вибрано модель, в якій спостережувані протонний та залізний внески будуть відповідно дорівнювати

$$J_p(E) = k_p E^{-\gamma} \exp(-E/E_{max,p}) \eta_p(E),$$

$$J_{Fe}(E) = k_{Fe} E^{-\gamma} \exp(-E/E_{max,Fe}) \eta_{Fe}(E),$$

де η_p, η_{Fe} – модифікаційний фактор протонного та залізного компонента відповідно. Параметрами в моделі виступають: γ – нахил спектру, k_p, k_{Fe} – внески кожного з компонентів у загальний потік ($k_p + k_{Fe} = k_{tot}$), $E_{max,p(Fe)}$ – характерна максимальна енергія для прискорених протонів (ядер заліза). Розраховано залежність сумарного спектру від величини внеску протонного компонента: $k_p/k_{tot} = 0.95/0.1/0.5$, $\gamma = 2.68$, $E_{p,max} = 10^{21}$ еВ (тут $E_{Fe,max} = 2.6 \cdot 10^{22}$ еВ) та залежність сумарного спектру від характерної енергії протонів та ядер заліза ($k_p = 0.95$, $\gamma = 2.68$,

$E_p^{max} = 10^{21}/10^{20}/10^{19}$ eV). Показано, що розглядувана тут суміш протонного та залізного компонентів добре описує спостережені дані.

В підрозділі 2.7 описано дослідження області переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів. Проаналізовано свіжі результати експерименту KASCADE-Grande і показано, що вони підтверджують протонну модель. Проаналізувавши ці дані, можна відзначити певні особливості в спектрі: на $\lg E(\text{eV}) = 16.92$ спостерігається злам у спектрі (друге коліно) та домінування важкого компонента (відповідні зливи бідні на електрони: electron-poor – ядра групи заліза), виположення спектру легкого компонента (відповідні зливи багаті електронами: electron-rich – протони, He, CNO) на $\lg E(\text{eV}) = 17.0$, потоки важкого та легкого компонентів зрівнюються на $\lg E(\text{eV}) = 17.7$. Ці дані інтерпретовано наступним чином: загальний спектр легкого компонента складається з галактичного та позагалактичного компонента. Виположення в спектрі легких ядер (в діапазоні енергій $\lg E(\text{eV}) = 17.1-18.0$) відповідає низькоенергетичній частині позагалактичного спектру космічних променів ($J(E) = k \cdot E^{-\gamma}$ з $\gamma = 2.6-2.7$), в якому домінують протони (протонна модель). На рис. 3 зображено розбиття потоку легких ядер на дві складові – галактичний потік CNO-ядер та позагалактичний потік протонів. Потоки апроксимовано степеневими спектрами $J_p(E) = J_p^{gen}(E) \eta_p(E) G_p(E)$ і $J_{Fe(CNO)} = k_{Fe(CNO)} \cdot E^{-\gamma} \exp(-E/E_{max,Fe(CNO)})$ з врахуванням додаткового модифікаційного фактора $G_p(E)$ для врахування впливу магнітного горизонту. Відтворено сумарний спектр з екстраполяцією на найвищі енергії для різних показників спектру γ . Добре узгодження теоретичних та експериментальних спектрів підтверджує запропоновану інтерпретацію спектру.

У Розділі 3 «Пошук джерел космічних променів з енергіями понад 10^{20} eV: потенційні галактичні джерела» описано проведення пошуку потенційних галактичних джерел для триплету (групи трьох подій у крузі радіуса 2°) і події з найвищою енергією $3.2 \cdot 10^{20}$ eV. Ці події є найперспективнішими для пошуку внаслідок малого відхилення в магнітному полі та обмеження на максимальну відстань до джерела.

В підрозділі 3.1 описано потенційні джерела КПНВЕ та виділено два типи подій – триплет як група трьох подій з енергіями $E > 10^{20}$ eV у крузі радіуса 2° в околі Галактичного центра та широка атмосферна злива з максимальною зареєстрованою досі енергією $3.2 \cdot 10^{20}$ eV (FE-подія), які досліджуватимуться в роботі.

В підрозділі 3.2 наведено спостережувані дані щодо КППВЕ – космічних променів з енергіями вище 10^{20} eV. За період з січня 2004 року до березня 2014 року при сумарній апертурі для подій із zenітним кутом менше 60° в $51753 \text{ км}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{рік}$ РАО зареєстрував тільки 6 таких подій, тоді як ТА за період від травня 2008 року до травня 2014 року при сумарній апертурі для подій із zenітним кутом менше 55° в $5400 \text{ км}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{рік}$ зареєстрував 10 подій. Це можна пояснити систематичними похибками експериментів. У роботах [22, 23] показано, що калібрування спектрів на основі протонної моделі КПНВЕ усуває розбіжності, якщо ввести поправочні

коефіцієнти для різних експериментів. Поправочний коефіцієнт для РАО складає $k = 1.2$, для ТА $k = 1.0$. В подальшому ми будемо розглядати нормовані дані РАО. Описано триплет подій (група з трьох подій, які знаходяться на кутовій відстані не більше 4° одна від одної) та подію з найвищою енергією. Загальна карта подій з енергією більше 10^{20} еВ зображена на рис. 4 в галактичних координатах.

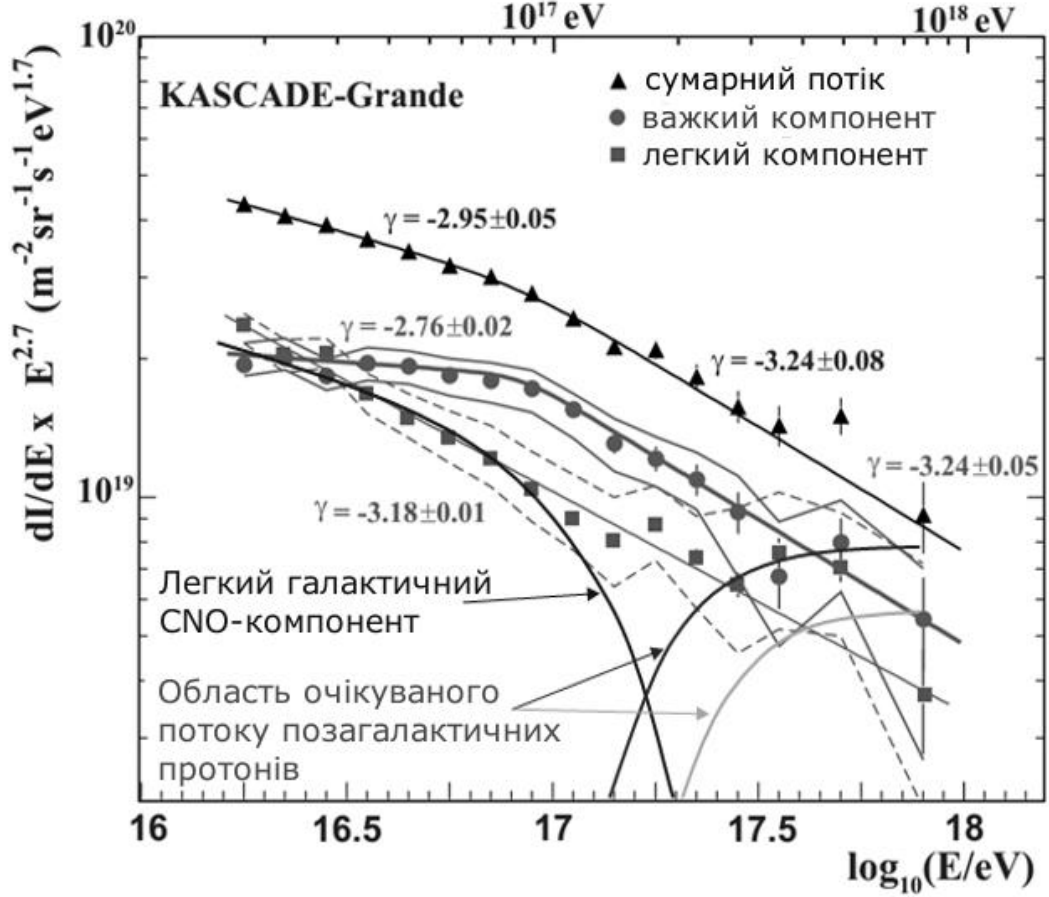


Рис. 3. Дані експерименту KASCADE-Grande [32] та наша інтерпретація спектру легкого компонента як суми галактичних CNO-ядер та позагалактичних протонів (див. детальний опис у тексті).

В підрозділі 3.3 описано оцінки впливу магнітного поля Галактики на поширення галактичних КПГВЕ на основі виразів для оцінки кута відхилення та часової затримки космічного променя при поширенні в магнітному полі Галактики [38]. Зазвичай магнітне поле в астрофізичних об'єктах представляється сумою регулярного та випадкового компонентів. Зокрема, випадковий компонент галактичного поля моделюється комітками з характерним розміром (довжиною когерентності) $\lambda_B \sim 100$ пк з випадковим розподілом в них напрямків магнітного поля з амплітудою $B_{rms} \sim 3 \cdot 10^{-6}$ Гс. Космічний промінь з енергією E від джерела на відстані d в такому полі відхиляється на кут θ_{rms} і затримується на час τ_{rms} :

$$\theta_{rms} \sim \frac{ZeB_{rms}\sqrt{d\lambda_B}}{E} \sim 1^\circ Z \cdot \left(\frac{d}{10 \text{ кпк}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E}{10^{20} \text{ еВ}}\right)^{-1} \left(\frac{B_{rms}}{10^{-6} \text{ Гс}}\right) \left(\frac{\lambda_B}{1 \text{ кпк}}\right)^{1/2},$$

$$\tau_{rms} \sim \frac{1}{4} \frac{d}{c} \theta_{rms}^2 = 1.4 Z^2 \cdot \left(\frac{d}{10 \text{ кпк}} \right)^2 \left(\frac{E}{10^{20} \text{ еВ}} \right)^{-2} \left(\frac{B_{rms}}{10^{-6} \text{ Гс}} \right)^2 \left(\frac{\lambda_B}{1 \text{ кпк}} \right) \text{ років.}$$

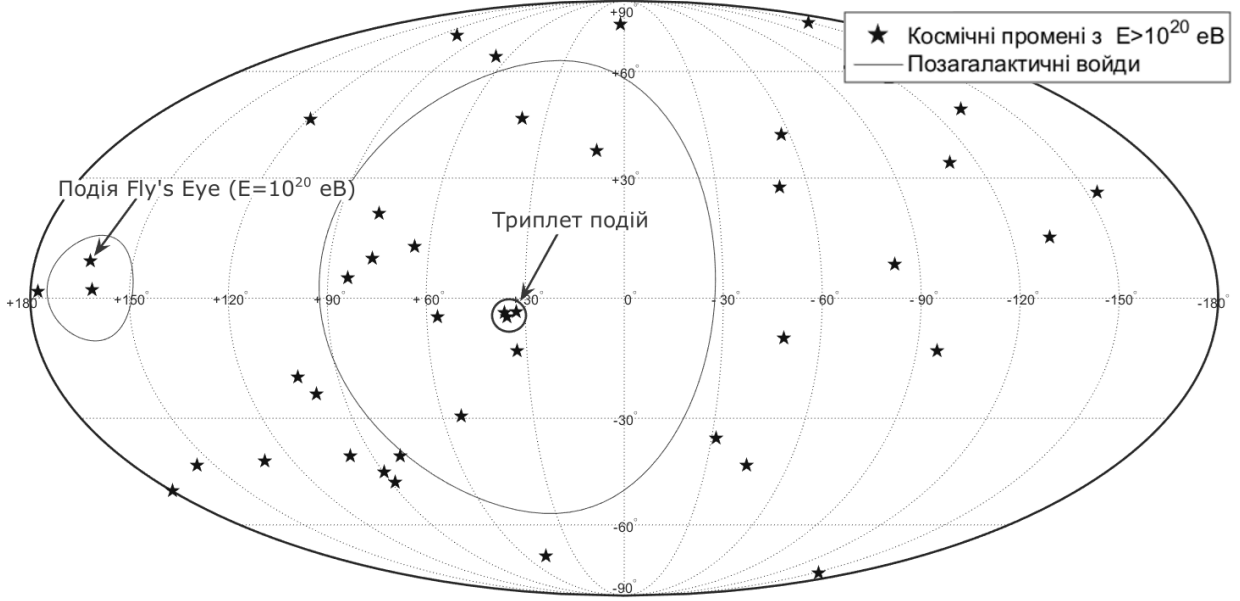


Рис. 4. Карта подій з енергіями більше 10^{20} еВ (до подій із списку [39] додано 9 нових подій РАО [40] після калібрування). Стрілками позначено об'єкти досліджень – триплет і подію Fly's Eye з енергією $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ еВ, кругами навколо них – пустоти-войди, що межують з Місцевою групою [41, 42].

Для відносно близьких до площини Галактики джерел суттєвим може бути відхилення КПНВЕ в області постійного магнітного поля, наприклад в рукаві. В цьому випадку для постійної поперечної складової поля $B_{\perp} \sim 1 \cdot 10^{-6} B_{\perp-6}$ Гс і джерела на відстані $d = 1 \cdot d_{\text{кпк}}$ кпк в Галактиці отримаємо:

$$\theta_{reg} \sim \frac{ZeB_{\perp}D}{E} \sim \frac{d}{R_L} \sim 0.6^{\circ} Z \cdot d_{\text{кпк}} E_{20}^{-1} B_{\perp-6},$$

$$\tau_{reg} \sim \frac{\Delta d}{c} = \frac{1}{24} \frac{d}{c} \theta_{reg}^2 = 1.5 \cdot 10^{-2} Z^2 E_{20}^{-2} B_{\perp-6}^2 d_{\text{кпк}}^3 \text{ років.}$$

В підрозділі 3.4 описано модель магнітного поля JF12 [43, 44]. Параметри моделі визначають на основі вимірювань фарадеевого обернення та інтенсивності і поляризації синхротронного випромінювання. У роботі розглядається регулярне магнітне поле як таке, яке найбільше впливає на відхилення КПГВЕ від початкового напрямку. У моделі JF12 воно складається з дискового поля зі спіральною структурою, яка відповідає структурі спіральних рукавів, із тороїдального поля гало Галактики та з X-подібного осесиметричного полоїдального поля, направлено від південної до північної півкулі Галактики [44]. Детально розглянуто кожен компонент поля, наведено ілюстрації структури компонентів, виконані у власній програмі. Наведено сукупність параметрів моделі регулярного компонента магнітного поля Галактики, які найкраще описують спостережувані дані.

В підрозділі 3.5 здійснено оцінку потенційних джерел в околі триплету та події з максимальною зареєстрованою енергією (FE-події). До можливих галактичних джерел FE-події та триплету відносяться новонароджені мілісекундні пульсари/магнетари (при цьому їх вік повинен узгоджуватись з часом затримки внаслідок відхилення траєкторії в магнітному полі Галактики) та магнетари різного віку, що виявляють активність у вигляді гігантських спалахів. На рис. 5 з роботи [43], де показано структуру регулярного компонента магнітного поля Галактики, нами вказано напрямки на FE-подію ($l = 163.4^\circ$) та триплет ($l = 35^\circ$) і нанесено положення визначених нами потенційних галактичних джерел FE-події та триплету. В роботі наведено карти з можливими галактичними джерелами триплету та FE-події та таблиці з їх характеристиками. Проведено пошук потенційних джерел триплету з врахуванням відхилення космічних променів у магнітному полі – відтворено траєкторію для різних зарядів первинного космічного променя і приведено список кандидатів (рис. 6).

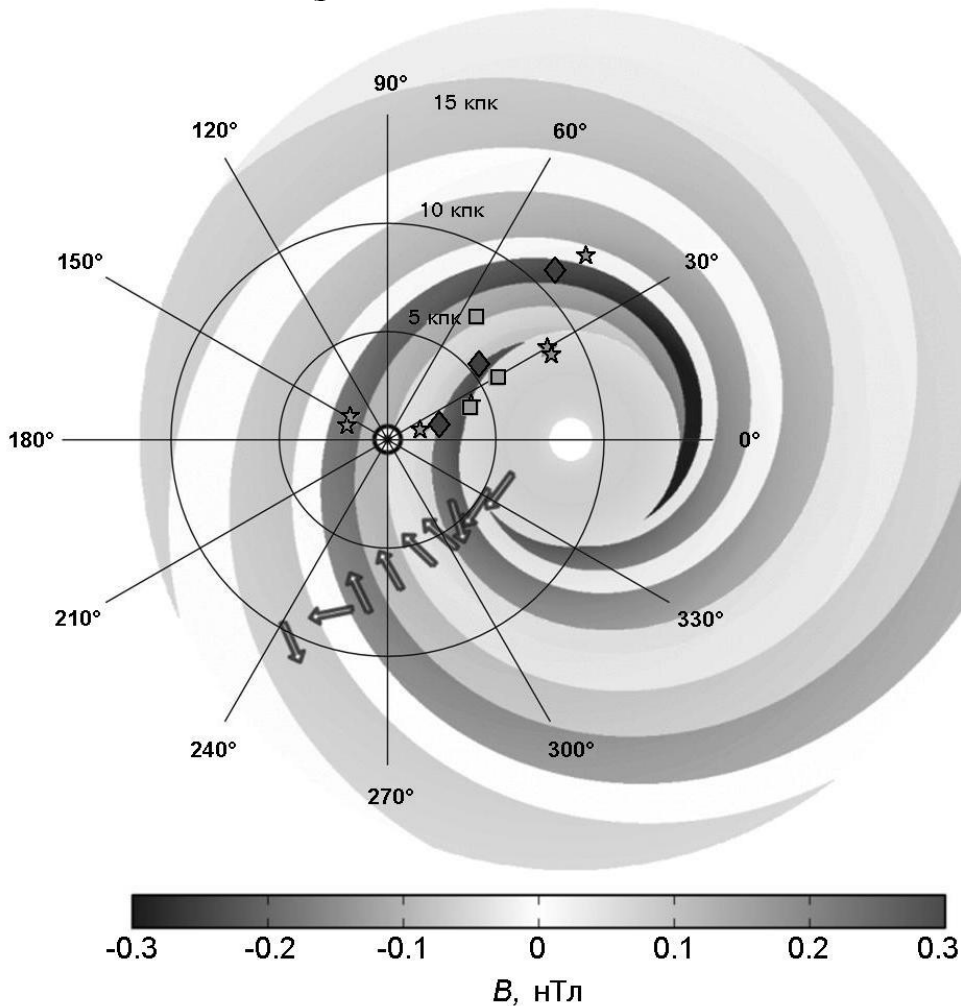


Рис. 5. Положення потенційних галактичних джерел за результатами Розділу 3 в секторах FE-події ($l = 163.4^\circ$) та триплету ($l = 35^\circ$) – молодих пульсарів (квадрати), магнетарів (зірочки) та мікроквazarів (ромби), накладених на карту регулярного компонента магнітного поля Галактики на зрізі $z = 10$ пк з роботи [43]. Стрілки показують напрям магнітного поля.

В підрозділі 3.6 описано методику розрахунку часової еволюції енергетичних спектрів КПНВЕ на основі відомих аналітичних розв'язків рівняння переносу з явним виділенням внеску розсіяних і нерозсіяних частинок. Описано особливості спектрів, які виникають в енергетичній області переходу від балістичного до дифузійного режиму поширення. Як приклад транз'єнтного джерела нашої Галактики розглянуто пульсар PSR J1846–0258. Для нього розраховано залежність від часу повного потоку космічних променів та зміну з часом енергетичного спектру.

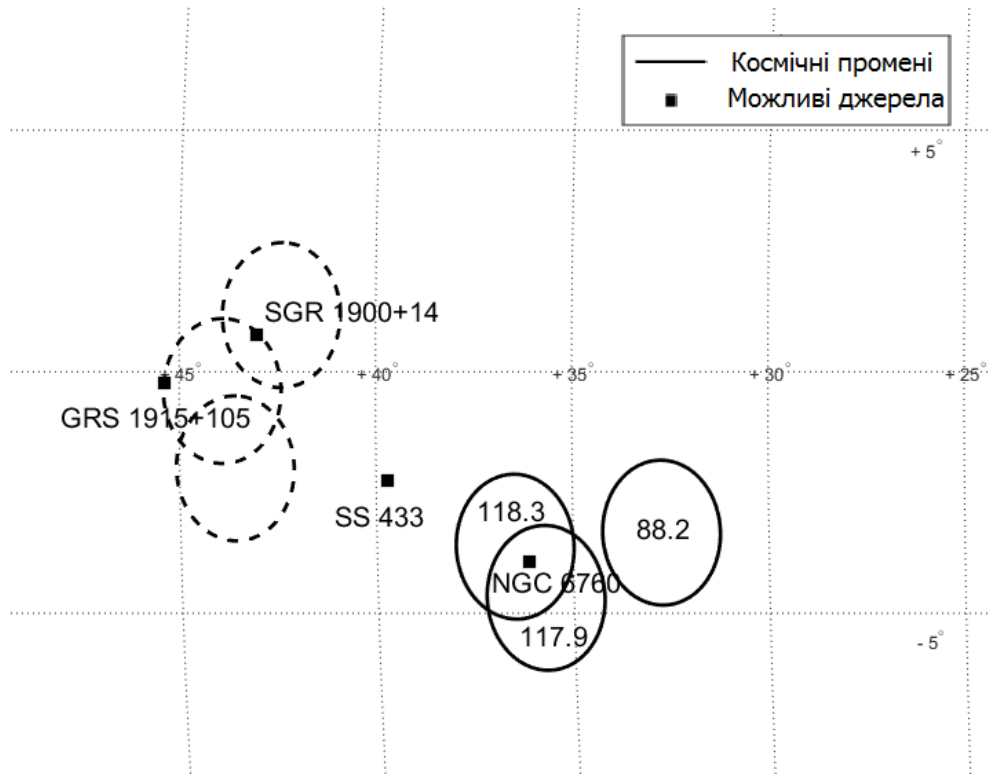


Рис. 6. Триплет подій та його потенційні галактичні джерела. Кожна подія – космічний промінь – позначена кружком, розмір якого відповідає інструментальній похибці (роздільній здатності) детектора, із вказанням енергії КП в EeV. Штриховані кружки – положення КП на небесній сфері після відхилення в магнітному полі.

У Розділі 4 «Пошук джерел космічних променів з енергіями понад 10^{20} eV: потенційні позагалактичні джерела» проведено пошук потенційних позагалактичних джерел для триплету і події з найвищою енергією $3 \cdot 10^{20}$ eV.

В підрозділі 4.1 розглянуто особливості відхилення КПНВЕ в регулярних та випадкових магнітних полях.

В підрозділі 4.2 сформульовано ряд вимог до потенційних позагалактичних джерел. По-перше, вони повинні забезпечити енергію прискорення, що перевищує спостережувану. По-друге, вони повинні знаходитись на достатньо близькій відстані, щоб втрати енергії КПНВЕ на шляху до Землі не перевищували надлишку, отриманого в процесі прискорення. По-третє, відхилення траєкторії КПНВЕ в

міжгалактичному та галактичному магнітних полях повинні відповідати різниці напрямку на джерело та напрямку приходу частинки.

Перша умова задовольняється в релятивістських струменях активних ядер галактик та гамма-спалахів, а також в пульсарно-вітрових туманностях навколо молодих мілісекундних пульсарів/магнетарів та в гігантських спалахах магнетарів. Друга умова обмежує відстань (вірніше, шлях, пройдений частинкою від джерела до детектора) до величини порядку 75(30) Мпк для протона чи ядра заліза із спостережуваною енергією в детекторі 10^{20} ($3 \cdot 10^{20}$) еВ. Третя умова найважче піддається перевірці, оскільки наші знання характеристик міжгалактичного та галактичного магнітних полів ще достатньо далекі від можливості відтворення траєкторії КПНВЕ, виходячи із його енергії та напрямку приходу.

В підрозділі 4.3 зроблено опис позагалактичного магнітного поля в напрямках на подію FE і на триплет. Для опису розподілу випадкового міжгалактичного магнітного поля в цих напрямках прийнято наступну модель:

- у войдах магнітне поле має амплітуду $B_{rms} \sim 10^{-11}$ Гс і когерентну довжину $\lambda_B \sim 0.1$ Мпк, для триплету з $D \leq 75$ Мпк кут відхилення $\theta_{rms} \sim 10^{-2} Z$ градусів і час затримки $\tau_{rms} \sim 0.8 \cdot Z$ років є малими навіть для ядер заліза ($Z = 26$), для FE-події з $D \leq 30$ Мпк кути відхилення та часи затримки ще менші;
- в локальному міжгалактичному магнітному полі навколо нашої Галактики – сферичній ($R = 2$ Мпк) замагніченій області з $B \sim 10^{-9}$ Гс, $\lambda_B \sim 0.1$ Мпк – кути та затримки для триплету $\theta \sim 0.1 \cdot Z$ градусів, $\tau \sim 6 \cdot Z^2$ років також залишаються малими.

Показано, що поширення КПГВЕ на близьких від джерела відстанях (≤ 50 Мпк), вже не можна розглядати в дифузійному наближенні, бо визначальними факторами тут є переважно балістичний характер поширення і скінченність швидкості частинок, практично рівної швидкості світла.

В підрозділі 4.4 описано пошук потенційних позагалактичних джерел триплету та FE-події, беручи до уваги вимоги, наведені в підрозділі 4.2. Приведено таблиці та карти неба з потенційними джерелами для різних типів об'єктів (рис. 7). Проаналізовано списки кандидатів і виділено найбільш вірогідні джерела.

В підрозділі 4.5 розраховано вплив тонкої структури галактичного магнітного поля на положення джерела FE-події на небесній сфері. FE-подію розглянуто з врахуванням інструментальної похибки вимірювання. Положення розраховано на відстані 30 Мпк для ядер від водню до заліза ($Z = 26$) з $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ еВ і для енергії, зменшеної на 1σ : $E = 2.3 \cdot 10^{20}$ еВ (рис. 8). Визначено потенційних кандидатів FE-події серед неактивних галактик (активних в полі пошуку не виявилось), в яких пульсари і магнетари разом з припливним руйнуванням зір у гравітаційних полях надмасивних чорних дір є життєздатними кандидатами на джерела КПГВЕ. У таблиці наведено детальний перелік потенційних позагалактичних джерел FE-події на відстанях до 30 Мпк, які розташовуються на кутовій відстані не більше 8° від відновленого положення FE-події. Оцінено найбільш вірогідних кандидатів для різних можливих зарядів космічного променя. Для $Z = 26$ – це галактика UGC 03574, а для ядра C-N-O-групи ($Z = 6-8$) найкращим кандидатом є галактика UGC 03394.

Потенційні кандидати FE-події.

Ім'я	l (°)	b (°)	Тип	D , кпк	z	d , Мпк
UGC 03501	166.26	18.24	G Im	2.3	0.00149	6.2
kkh 038	168.54	19.09	G Ir	2.5	0.0015	6.2
NGC 2344	170.25	22.95	G SA(rs) c	7.2	0.00325	13.3
UGC 03574	158.93	22.76	G SA(s) cd	24.9	0.00481	19.7
CGCG 261-017	160.06	24.02	G	5.6	0.00471	19.2
UGC 03647	160.05	24.14	G IBm	8.1	0.00462	19.0
UGC 03698	172.97	21.62	G Im	2.1	0.00141	5.8
NGC 2337	172.94	21.80	G IBm	4.7	0.00145	6.0
UGC 03394	157.53	16.18	G SB?	13.1	0.00607	24.9

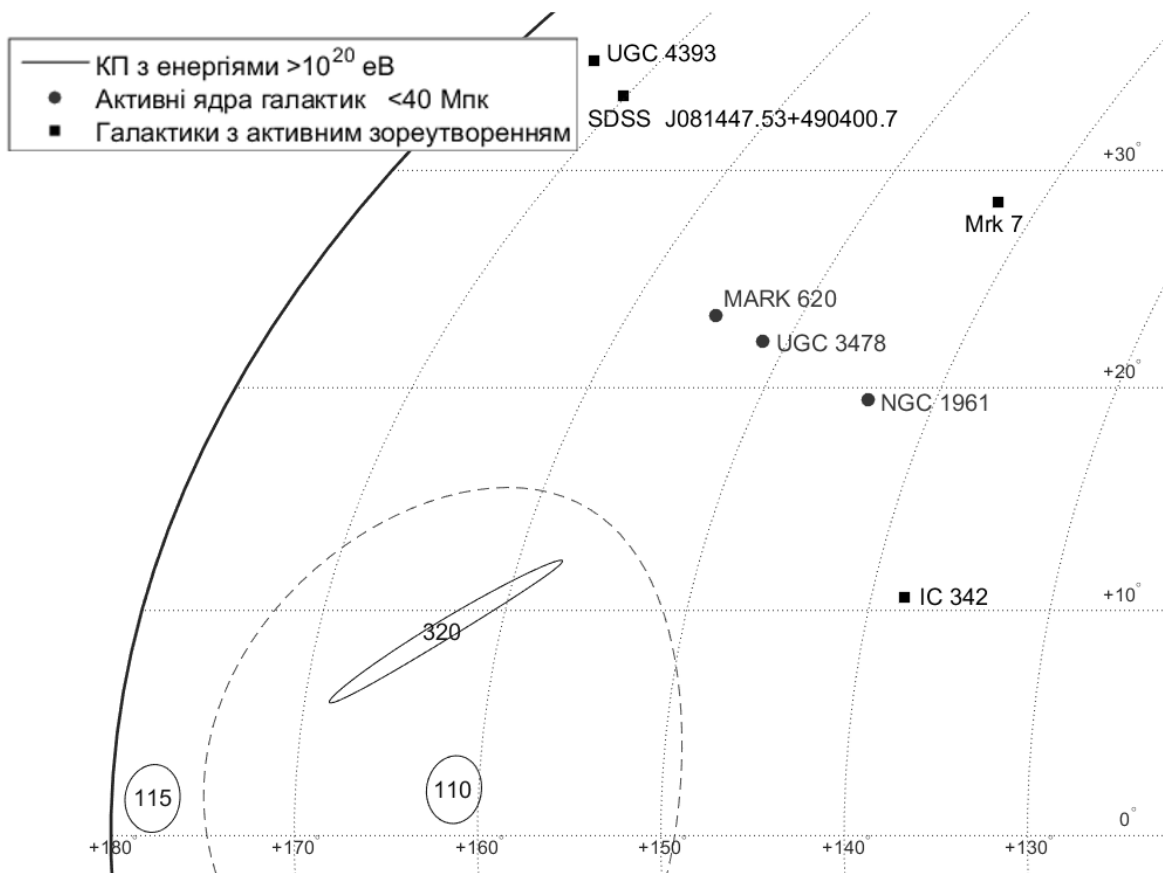


Рис. 7. Позагалактичні джерела на відстані до 40 Мпк в околі FE-події: АЯГ (кружки) та галактики із активним зореутворенням (квадрати).

В підрозділі 4.6 розглянуто очікувані характеристики транзйентного джерела КПГВЕ в близькому активному галактичному ядрі Центавр А (Cen A), відстань якого до Землі складає $D_{CenA} \approx 4$ Мпк [45–48]. Приведено розраховані залежності концентрації КП від часу при різних режимах інжекції частинок, розраховано енергетичні спектри в різні моменти часу на відстані 4 Мпк від джерела Cen A. Оцінено очікувані потоки від Cen A для детектора РАО для випадків прискорення в джеті і припливного руйнування зорі в околі надмасивної чорної діри.

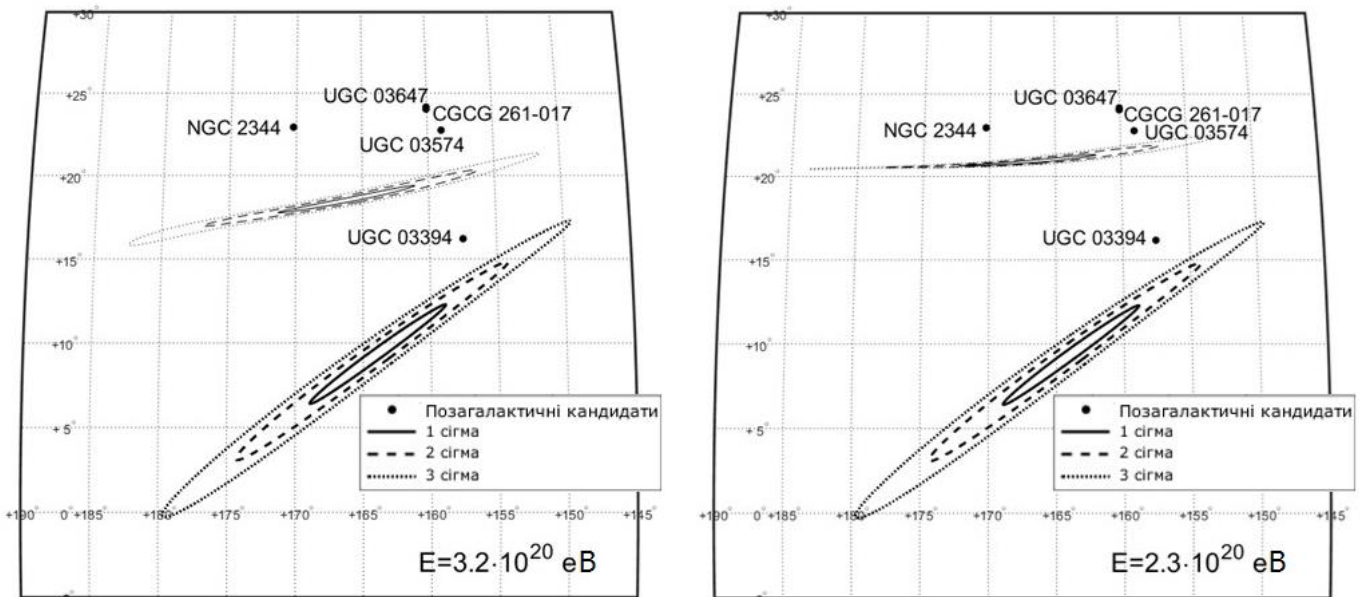


Рис. 8. Частина карти неба в галактичних координатах з напрямком приходу FE-події (товсті лінії) і розраховане положення потенційного джерела на відстані 30 Мпк (тонкі лінії) для ядра заліза ($Z = 26$) з $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ eВ (ліворуч) і для енергії, зменшеної на 1σ $E = 2.3 \cdot 10^{20}$ eВ (праворуч). Деякі з можливих позагалактичних джерел також представлено на рисунках.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено хімічний вміст, енергетичний спектр та потенційні джерела космічних променів найвищих енергій. А саме:

1. Проведено пошук потенційних галактичних джерел для триплету космічних променів (групи трьох подій у крузі радіуса 2°) і FE-події з найвищою енергією $3.2 \cdot 10^{20}$ eВ. Використовуючи сучасну модель магнітного поля Галактики відтворено траєкторії КП триплету та FE-події. Показано, що потенційним джерелом триплету є магнетар GSR 1900+14, тоді як для FE-події потенційних галактичних джерел немає.
2. Проведено пошук потенційних позагалактичних джерел для триплету космічних променів і FE-події з найвищою енергією $3.2 \cdot 10^{20}$ eВ. Використовуючи сучасні моделі галактичного та позагалактичного магнітних полів відтворено траєкторії КП триплету та FE-події. Показано, що потенційними джерелами FE-події є галактики UGC 03394 та UGC 03574, тоді як потенційних позагалактичних джерел триплету немає.
3. На основі відомих аналітичних розв'язків рівняння переносу з явним виділенням вкладу розсіяних і нерозсіяних частинок проаналізовано особливості поширення КПНВЕ в області енергій, які відповідають переходу від балістичного до дифузійного режиму поширення. Показано, що прихід нерозсіяних КПГВЕ від транзйєнтних джерел, може бути причиною появи кластерів подій. Розраховано залежність від часу концентрації КПНВЕ та форми енергетичного спектру для

транзієнтного прискорення КПНВЕ в галактичному джерелі PSR J1846–0258 та в позагалактичному джерелі Cen A.

4. Досліджено область переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів на основі даних експерименту KASCADE-Grande. Показано, що виявлений легкий компонент в області 10^{17} – 10^{18} eV можна пояснити вкладом низькоенергетичної частини потоку позагалактичних протонів у рамках протонної моделі.
5. На основі даних AUGER 2011 року щодо середніх глибин максимуму зливи відновлено внесок протонного та залізного компонентів у загальний потік на різних енергіях. Розраховано середні глибини максимуму злив $\langle X_{max}(E) \rangle$ та їх середнє квадратичне відхилення $\sigma(E) = \text{RMS}(\langle X_{max}(E) \rangle)$ як функції енергії КПНВЕ для потоків, що складаються з суміші протонного, гелієвого та залізного компонентів із степеневими спектрами генерації. Показано, що експериментальні дані детектора AUGER щодо $\langle X_{max}(E) \rangle$ та $\sigma(E)$ не можна самоузгоджено пояснити в рамках цих широковживаних моделей. Показано, що галактичні моделі КПНВЕ з домінуванням залізного компонента не відповідають спостережуваним даним щодо хімічного вмісту КПНВЕ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях:

1. Гнатик Р.Б. Природа космічних променів надвисоких енергій у світлі останніх даних експерименту AUGER / Р.Б. Гнатик // Вісник Астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, №.1. – С. 24–27.
2. Гнатик Р.Б. Хімічний склад космічних променів надвисоких енергій / Р.Б. Гнатик // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2012. – Т. 49. – С. 14–17.
3. Гнатик Р.Б. Дослідження області переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів на основі даних експерименту KASCADE-Grande / Р.Б. Гнатик // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2013. – Т. 50, №.1. – С. 14–17.
4. Gnatyk R.B. Search for the sources of cosmic rays with energies above 10^{20} eV / R.B. Gnatyk // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2016. – V. 32, Is.1. – P. 1–12.
5. Федоров Ю.И. Баллистические и диффузионные компоненты динамических спектров космических лучей сверхвысоких энергий от близких транзиентных источников / Ю.И. Федоров, Р.Б. Гнатык, Б.И. Гнатык, Ю.Л. Колесник, Б.А. Шахов, В.И. Жданов // Кинемат. и физ. небес. тел. – 2016. – Т. 32, №.3. – С. 3–25.
6. Gnatyk R.B. Search for the astrophysical sources of the Fly’s Eye event with the highest to date cosmic ray energy $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ eV / R.B. Gnatyk, Y.N. Kudrya, V.I. Zhdanov // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2016. – V. 6, Is.1. – P. 41–44.
7. Гнатик Р.Б. Пошук галактичних джерел триплету космічних променів з

енергіями понад 10^{20} eV / Р.Б. Гнатик, В.І. Жданов // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2016. – Т. 53, №.1. – С. 37–40.

У тезах конференцій:

8. Gnatyk R.B. Transition from galactic to extragalactic cosmic rays / R.B. Gnatyk // 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, April 22–27, 2013 p.). Abstracts. – P. 41.
9. Gnatyk R.B. Transition from Galactic to extragalactic cosmic rays based on KASCADE-Grande data / R.B. Gnatyk // 21st Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, April 28 – May 3, 2014 p.). Abstracts. – P. 30.
10. Gnatyk R.B. Search for the sources of the ultra high energy cosmic rays with energies above 10^{20} eV / R.B. Gnatyk // 22nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, April 20–25, 2015 p.). Abstracts. – P. 43.
11. Gnatyk R.B. Search of the galactic sources of the cosmic ray triplet with energies above 10^{20} eV / R.B. Gnatyk // 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, April 25–30, 2016 p.). Abstracts. – P. 32.
12. Gnatyk R.B. Chemical composition of the ultra high energy cosmic rays / R.B. Gnatyk // International Conference “Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, June 7–10, 2011 p.). Book of abstracts. – P. 22.
13. Гнатик Р.Б. Вплив взаємодії космічних променів надвисоких енергій з реліктовим випромінюванням на їх спостережуваний спектр та хімічний вміст / Р.Б. Гнатик // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті (Київ, 22–25 травня 2012 р.). Збірка тез доповідей. – P. 39.
14. Гнатик Р.Б. Дослідження переходу від галактичної до позагалактичної складової в загальному потоці космічних променів високих енергій / Р.Б. Гнатик // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті (Київ, 21–24 травня 2013 р.). Збірка тез доповідей. – P. 7.
15. Гнатик Р.Б. Перехід від галактичних до позагалактичних космічних променів на основі даних експерименту KASCADE-Grande / Р.Б. Гнатик // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті (Київ, 27–30 травня 2014 р.). Збірка тез доповідей. – P. 46.
16. Гнатик Р.Б. Пошук джерел космічних променів надвисоких енергій з енергіями вище 10^{20} eV / Р.Б. Гнатик // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті (Київ, 25–29 травня 2015 р.). Збірка тез доповідей. – P. 30.
17. Гнатик Р.Б. Пошук галактичних джерел триплету космічних променів з енергіями понад 10^{20} eV / Р.Б. Гнатик // Astronomy and Space Physics in Kyiv University (Kyiv, May 24–27, 2016 p.). Book of abstracts . – P. 27.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

18. Abbasi R.U. Analysis of large-scale anisotropy of ultra-high energy cosmic rays in HiRes data / R.U. Abbasi, M. Allen, J.F. Amann, et al. // *Astrophys. J. Lett.* – 2010. – V. 713, Is.1. – P. L64–L68.

19. Berezhinsky V. Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays / V. Berezhinsky // *Adv. Space Res.* – 2008. – V. 41, Is.12. – P. 2071–2078.
20. Stokes B. The Telescope Array Experiment / B. Stokes // *American Physical Society, Annual Meeting of the Four Corners Section of the APS, October 15-16 – 2010.*
21. Kotera K. The Astrophysics of Ultrahigh Energy Cosmic Rays / K. Kotera, A.V. Olinto // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* – 2011. – V. 49, Is.1. – P. 119–153.
22. Abu-Zayyad T. Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique / T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen, et al. // *Astropart. Phys.* – 2015. – V. 61. – P. 93–101.
23. Aloisio R. A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays / R. Aloisio, V. Berezhinsky, P. Blasi, et al. // *Astropart. Phys.* – 2007. – V. 27, Is.1. – P. 76–91.
24. Olive K.A. Review of particle physics / K.A. Olive, K. Agashe, C. Amsler, et al. // *Chinese Physics C.* – 2014. – V. 38. – id. 090001.
25. Verzi V. Cosmic Rays: air showers from low to high energies. Rapporteur Report / V. Verzi // *Proceedings of Science (ICRC2015).* – 2015. – id. 015.
26. Fang K. Testing the Newborn Pulsar Origin of Ultrahigh Energy Cosmic Rays with EeV Neutrinos / K. Fang, K. Kotera, K. Murase, A. V Olinto // *Phys. Rev. D.* – 2014. – V. 90. – id. 103005.
27. Lemoine M. On ultra-high energy cosmic ray acceleration at the termination shock of young pulsar winds / M. Lemoine, K. Kotera, J. Pétri // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* – 2015. – V. 7. – id. 016.
28. Allard D. Extragalactic propagation of ultrahigh energy cosmic-rays / D. Allard // *Astropart. Phys.* – 2012. – V. 39–40, Is.1. – P. 33–43.
29. Aloisio R. Ultra high energy cosmic rays: implications of Auger data for source spectra and chemical composition / R. Aloisio, V. Berezhinsky, P. Blasi // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* – 2014. – Is.10. – id. 020.
30. Lemoine M. Anisotropy vs chemical composition at ultra-high energies / M. Lemoine, E. Waxman // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* – 2009. – Is.11. – id. 009.
31. Aloisio R. Ultra High Energy Cosmic Rays Propagation and Spectrum / R. Aloisio // *International symposium on the recent progress of ultra-high energy cosmic ray observation. AIP Conference Proceedings.* – 2011. – V. 1367. – P. 114–119.
32. Apel W.D. Kneelike structure in the spectrum of the heavy component of cosmic rays observed with KASCADE-Grande / W.D. Apel, J.C. Arteaga-Velazquez, K. Bekk, et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – V. 107, Is.17. – id. 171104.
33. Allard D. Implications of the cosmic ray spectrum for the mass composition at the highest energies / D. Allard, N.G. Busca, G. Decerprit, et al. // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* – 2008. – V. 10. – id. 033.
34. Berezhinsky V.S. On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays / V.S. Berezhinsky, A. Gazizov, S. Grigorieva // *Phys. Rev. D.* – 2006. – V. 74, Is.4. – id. 043005.
35. Wilk G. On the chemical composition of cosmic rays of highest energy / G. Wilk, Z. Wlodarczyk // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics.* – 2011. – V. 38, Is.8. – id. 085201.

36. Unger M. Analysis of longitudinal air shower profiles measured by the Pierre Auger observatory / M. Unger // AIP Conference Proceedings – 2011. – V. 1367. – P. 106–109.
37. Calvez A. Role of galactic sources and magnetic fields in forming the observed energy-dependent composition of ultrahigh-energy cosmic rays / A. Calvez, A. Kusenko, S. Nagataki // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105, Is.9. – id. 091101.
38. Kuempel D. Extragalactic propagation of ultra-high energy cosmic rays / D. Kuempel [Електронний ресурс] // arXiv:1409.3129v2 [astro-ph.HE] – 2014.
39. Moharana R. Angular correlation of cosmic neutrinos with ultrahigh-energy cosmic rays and implications for their sources / R. Moharana, S. Razzaque // J. Cosmol. Astropart. Phys. – 2015. – V. 8. – id. 014.
40. Aab A. Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory / A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, et al. // Astrophys. J. – 2015. – V. 804, Is.1. – P. 15.
41. Elyiv A.A. Low-density structures in the Local Universe. II. Nearby cosmic voids / A.A. Elyiv, I.D. Karachentsev, V.E. Karachentseva, et al. // Astrophysical Bulletin. – 2013. – V. 68, Is.1. – P. 1–13.
42. Tully R.B. Nearby galaxies Atlas / R.B. Tully, J.R. Fisher // Cambridge: University Press. – 1987. – P. 93.
43. Jansson R. A New Model of the Galactic Magnetic Field / R. Jansson, G.R. Farrar // Astrophys. J. – 2012. – V. 757, Is.1. – P. 14.
44. Jansson R. The galactic magnetic field / R. Jansson, G.R. Farrar // Astrophys. J. – 2012. – V. 761, Is.1. – P. L11.
45. Batista R.A. Diffusion of cosmic rays at EeV energies in inhomogeneous extragalactic magnetic fields / R.A. Batista, G. Sigl // J. Cosmol. Astropart. Phys. – 2014. – Is.11. – id. 031.
46. Keivani A. Magnetic deflections of ultra-high energy cosmic rays from Centaurus A / A. Keivani, G.R. Farrar, M. Sutherland // Astropart. Phys. – 2015. – V. 61. – P. 47–55.
47. Moskalenko I. V. On the Possible Association of Ultra High Energy Cosmic Rays With Nearby Active Galaxies / I. V. Moskalenko, L. Stawarz, T.A. Porter, C.C. Cheung // Astrophys. J. – 2009. – V. 693, Is.2. – P. 1261–1274.
48. Rieger F.M. Cen A as TeV gamma-ray and possible UHE cosmic-ray source / F.M. Rieger, F.A. Aharonian // Astron. & Astrophys. – 2009. – V. 506, Is.3. – P. L41–L44.

АНОТАЦІЯ

Гнатик Р.Б. Джерела, енергетичний спектр та хімічний вміст космічних променів найвищих енергій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2017.

Досліджено енергетичний спектр, хімічний вміст космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) та зроблено пошук потенційних джерел космічних променів гранично високих енергій (КПГВЕ). Проведено аналіз хімічного вмісту КПНВЕ на основі розроблених моделей енергетичного спектру і розрахованих середніх глибин максимумів злив для різних пропорцій протонів, гелію та заліза в загальному потоці, беручи до уваги модифікаційний фактор, який характеризує взаємодію КПНВЕ з реліктовим випромінюванням. Запропоновано нову інтерпретацію даних KASCADE-Grande щодо наявності легкого компонента в діапазоні енергій 10^{17} – 10^{18} еВ як прояв позагалактичного протонного компонента з енергетичним спектром, модифікованим внаслідок дифузійного поширення в міжгалактичних магнітних полях. Беручи до уваги відхилення траєкторій КПГВЕ в галактичних та позагалактичних магнітних полях, зроблено пошук потенційних галактичних та позагалактичних джерел для триплету космічних променів з $E > 10^{20}$ еВ та події з найвищою зареєстрованою енергією $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ еВ (FE-події). Можливим джерелом триплету є магнетар SGR 1900+14, тоді як можливим джерелом FE-події є близькі (< 40 Мпк) звичайні галактики UGC 03574 та UGC 03394. Характер поширення КПГВЕ з $E > 10^{20}$ еВ в магнітних полях відповідає переходу від дифузійного до балістичного руху, тому була досліджена можливість кластеризації напрямків приходу КПГВЕ в таких обставинах.

Ключові слова: космічні промені, космічні магнітні поля, активні ядра галактик, пульсари, магнетари, залишки Наднових зір.

АННОТАЦІЯ

Гнатык Р.Б. Источники, энергетический спектр и химический состав космических лучей сверхвысоких энергий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2017.

Исследованы энергетический спектр, химический состав космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) и проведен поиск потенциальных источников космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ). Проведен анализ химического состава КЛСВЭ на основании разработанных моделей энергетического спектра и рассчитанных средних глубин максимумов ливней для разных пропорций протонов, гелия и железа в общем потоке, принимая во внимание модификационный фактор, характеризующий взаимодействие КЛСВЭ с реликтовым излучением. Предложена новая интерпретация данных KASCADE-Grande о наличии легкой компоненты в диапазоне энергий 10^{17} – 10^{18} эВ как проявление внегалактической протонной компоненты с энергетическим спектром, модифицированным вследствие диффузионного распространения в межгалактических магнитных полях. Принимая во внимание отклонение траекторий КЛПВЭ в галактических и внегалактических магнитных полях, проведен поиск потенциальных галактических и внегалактических источников для триплетта космических лучей с $E > 10^{20}$ эВ и события с наивысшей зарегистрированной энергией $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ эВ (FE-событие). Возможным источником триплетта есть магнетар SGR 1900+14, тогда как

возможным источником FE-события есть близкие (< 40 Мпк) обычные галактики UGC 03574 и UGC 03394. Характер распространения КЛПВЭ с $E > 10^{20}$ эВ в магнитных полях соответствует переходу от диффузионного к баллистическому движению, поэтому была исследована возможность кластеризации направлений прихода КЛПВЭ в таких условиях.

Ключевые слова: космические лучи, космические магнитные поля, активные ядра галактик, пульсары, магнетары, остатки Сверхновых звезд.

ABSTRACT

Gnatyk R.B. Sources, energy spectrum, and chemical composition of ultra-high energy cosmic rays. – Manuscript.

Candidate degree thesis. Speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

We investigate the energy spectrum and chemical composition of the ultra-high energy cosmic rays (UHECR, $E > 10^{18}$ eV). The search for the potential sources of the UHECR is also conducted. We analyze the chemical composition of the UHECR on the base of developed cosmic ray spectrum models and calculated mean depths of shower maxima for different partial contribution of proton, Helium and Iron nuclei in total observed flux, taking into account a modification factor for the description of UHECR interaction with the cosmic microwave background. We propose a new interpretation of the KASCADE-Grande results about the presence of light component in the energy range 10^{17} – 10^{18} eV as signature of extragalactic proton component with energy spectrum additionally modified by the proton diffusion in the intergalactic magnetic field.

The sources of the UHECR are still unknown, mainly due to the loss of the direction to the source after the deflection of cosmic rays trajectories in the galactic and extragalactic magnetic fields. With the increase in cosmic ray energy (rigidity), the influence of the magnetic field weakens; therefore, the most promising approach is to search for the sources of events with the highest energy. In our work, we investigate the sample of TA and AUGER events with $E > 10^{20}$ eV, which is characterized by the presence of an event triplet in a circle of radius 2° . The highest energy event is still the shower ($E = 3.2 \cdot 10^{20}$ eV) detected with the Fly's Eye fluorescent detector (FE-event) in 1993. Taking into account the deflections of UHECR trajectories in Galactic and extragalactic magnetic fields we search for potential Galactic and extragalactic sources for these two events – the triplet and the FE-event. We show that potential source of triplet is magnetar SGR 1900+14, while potential sources of FE-event are close (< 40 Mpc) ordinary galaxies UGC 03574 and UGC 03394.

UHECR from extragalactic sources deviate in the Galactic and intergalactic magnetic fields, which explains the diffusive character of their propagation, the isotropization of their total flux, and the absence of UHECR clusters associated with individual sources. Extremely high energy cosmic rays ($E > 10^{20}$ eV) are scattered mainly in localized magnetized structures, such as galaxy clusters, filaments, etc., with a mean free path of tens of Megaparsecs; therefore, in the case of nearby transient sources, a substantial contribution to the observed flux is expected from unscattered and weakly scattered particles, which may be a decisive factor in the identification of these sources.

We use the existing analytical solutions of the transport equation with the explicit determination of the contributions from scattered and unscattered particles to explain clustered events from transient sources. As examples, we consider the cases of transient activity of the nearest active galactic nucleus, Centaurus A, and the acceleration of UHECRs by a young millisecond pulsar in our Galaxy.

Key words: cosmic rays, cosmic magnetic fields, active galactic nuclei, pulsars, magnetars, Supernova remnants.