



УДК 524.1+524.7

## Природа космічних променів надвисоких енергій у світлі останніх даних експерименту AUGER

Р.Б. Гнатик

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Джерела та хімічний (масовий) склад космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) досі залишаються невідомими. Більше того, сучасні результати експериментального вимірювання енергетичного спектру та хімічного складу КПНВЕ, представлені детекторами AUGER, Hires та TA, виявились суперечливими: дані Hires та TA узгоджуються з домінуванням протонів в потоці КПНВЕ для всіх енергій, тоді як дані AUGER вказують на зростаючий внесок важких ядер при найвищих енергіях. В роботі досліджується залежність від енергії глибини максимального розвитку зливи  $X_{\max}$  для потоку КПНВЕ, який складається з суміші протонів і заліза. Показано, що дані AUGER 2011 року щодо спектру та хімічного вмісту можна пояснити сумою потоків легкого (протонного) та важкого (залізного) компонентів з домінуванням протонного компонента (максимальний вклад залізного компонента біля 30%).

*ПРИРОДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В СВЕТЕ ПОСЛЕДНИХ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА AUGER, Gnatyk R.B. — Источники и химический (массовый) состав космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) все еще остаются неизвестными. Более того, современные результаты экспериментального измерения энергетического спектра и химического состава КЛСВЭ, представленные детекторами AUGER, Hires и TA, оказались противоречивыми: данные Hires и TA согласуются с доминированием протонов в потоке КЛСВЭ для всех энергий, тогда как данные AUGER свидетельствуют о возрастающем вкладе тяжелых ядер при наивысших энергиях. В работе исследуется зависимость от энергии глубины максимального развития ливня для потока КЛСВЭ, который состоит из смеси протонов и ядер железа. Показано, что данные AUGER 2011 года относительно спектра и химического состава можно объяснить суммой потоков легкой (протонной) и тяжелой (железной) компоненты с доминированием протонной компоненты (максимальный вклад железной компоненты около 30%).*

*NATURE OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS ON THE BASIS OF THE RECENT RESULTS FROM EXPERIMENT AUGER, by Gnatyk R.B. — Sources and chemical (mass) composition of the ultra high energy cosmic rays (UHECRs) are still unknown. Once more, recent results of the experimental measurements of the energy spectrum and chemical composition of UHECRs presented by AUGER, Hires and TA are contradictory: Hires and TA data are consistent with a proton-dominated flux of UHECRs for the all energy diapason, while AUGER data suggest increasing contribution of heavy nuclei at highest energy. In this paper the energy dependence of the depth of the shower maximum development  $X_{\max}$  for UHECR flux composed of mixture of protons and irons is investigated. It is shown, that AUGER 2011 data about the spectrum and chemical composition can be explained as a sum of fluxes of light (proton) and heavy (iron) components with domination of proton component (maximum contribution of iron component about 30%).*

**Ключевые слова:** космические лучи сверхвысоких энергий; экспериментальные измерения энергетического спектра; химический состав и природа космических лучей.

**Key words:** ultra high energy cosmic rays; experimental measurements of the energy spectrum; chemical composition and nature of cosmic rays.

### 1. ВСТУП

Дослідження природи космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) вже протягом багатьох років залишаються однією з найактуальніших задач сучасної астрофізики. Не дивлячись на значний експериментальний потенціал (детектори Fly's Eye (Око мухи), YAKUTSK, Akeno-AGASA, HiRes), який був задіяний в останні десятиліття, ні джерела, ні механізми прискорення, ні хімічний склад КПНВЕ досі не встановлені. Визначальну роль в її розв'язанні повинні відіграти експериментальні дані, які зараз отримуються на детекторах AUGER, TA, а також будуть отримані на майбутніх експериментах JEM-EUSO та ін. [1, 4, 5, 6].

Сукупність спостережуваних даних щодо КПНВЕ зараз пояснюється в рамках двох моделей КПНВЕ:

а) протонної моделі [3, 4, 6], в якій головний вклад в потік космічних променів з енергіями понад  $10^{18}$  eV дають протони (ця модель дає фізичне пояснення провалу в спектрі (dip), тому в англомовній літературі називається dip-model) (в роботі називатимемо її протонною моделлю);

б) моделі суміші протонів та ядер [2], в якій позагалактичний компонент (протони та ядра) домінує при енергіях понад  $5 \cdot 10^{18}$  eV (в спектрі цієї енергії відповідає злам — щиколотка (ankle-model)), а при нижчих енергіях в спектрі домінують галактичні космічні промені (в роботі називатимемо її ядерною моделлю).

В нашій роботі аналізуються останні дані спостережень детектора AUGER щодо спектру [8] та хімічного вмісту [9] КПНВЕ та досліджується їх узгодженість з вище згаданими моделями.

## 2. ПРИРОДА КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

На даний час отримано значну кількість експериментальних даних щодо спектру, хімічного вмісту та анізотропії КПНВЕ. Основний вклад в цю базу даних внесли та вносять експерименти AGASA, HIRRES, AUGER [8, 9]. Слід відмітити, що між даними різних експериментів спостерігається суттєва відмінність в визначенні потоків та хімічного складу космічних променів, що ускладнює побудову їх теоретичної моделі [4, 6].

Особливості спектру космічних променів надвисоких енергій прийнято пояснювати в рамках двох основних підходів: протонної моделі та моделі суміші протонів та важких ядер (ядерної моделі). Протонна модель, запропонована в роботах [3, 4, 6], передбачає, що космічні промені найвищих енергій в усьому діапазоні енергій від  $10^{18}$  еВ до  $10^{20}$  еВ — це, в основному, протони. Особливості спектру, такі як провал (dip), та ГЗК-обрізання пояснюються взаємодією космічних променів з реліктовим випромінюванням, яка приводить до народження електрон-позитронних пар (область провалу) та народження піонів (область ГЗК-обрізання). Протонна модель узгоджується з даними експериментів HiRes та TA щодо форми енергетичного спектру та хімічного вмісту [6]. В той же час недоліком протонної моделі вважається відсутність проявів у спектрі переходу від галактичного до позагалактичного компонента в діапазоні енергій  $10^{17}$  еВ –  $10^{18}$  еВ, та узгодженість із даними AUGER про хімічний вміст, якщо останні підтвердяться.

В розробленій в [2] ядерній моделі вважається, що перехід від домінування галактичного до позагалактичного компонента відбувається в області провалу ( $E \sim 5 \cdot 10^{18}$  еВ). Позагалактичний компонент — суміш протонів, ядер гелію та інших важких елементів аж до заліза. Сумарний спектр в області  $10^{18}$  еВ –  $10^{20}$  еВ пояснюється комбінацією спектрів галактичних та позагалактичних космічних променів. Ця модель описує дані експерименту AUGER щодо хімічного вмісту КПНВЕ, але не узгоджується з даними експериментів HiRes та TA. Ще однією проблемою цієї моделі є необхідність прискорення галактичних космічних променів до дуже високих енергій —  $10^{19}$  еВ, що суперечить можливостям галактичних джерел.

На даний момент не є загальноприйнятою жодна з моделей. Основна проблема полягає в тому, що на експерименті реєструються вторинні частинки зливи та флуоресцентне свічення збуреної ними атмосфери, а не самі космічні промені. По характеру зливи вторинних частинок визначається якою була первинна частинка [1, 5]. Для відновлення типу первинної частинки потрібні знання перетинів взаємодії релятивістських частинок з нуклонами атомів атмосфери. Ці перетини визначаються в лабораторних умовах на прискорювачах. Сучасні прискорювачі можуть прискорювати частинки до енергій  $10^{12}$  еВ в системі центра мас, що відповідає енергії космічного променя  $10^{15}$  еВ. БАК (LHC) з енергією 14 TeV в системі центра мас забезпечить перетини для космічних променів з енергією тільки  $10^{17}$  еВ. Тобто, лабораторні результати апроксимуються на значно більші енергії. На жаль, точність таких апроксимацій на високих енергіях досить низька, що не дозволяє точно визначити хімічний склад космічних променів надвисоких енергій.

## 3. ОСОБЛИВОСТІ СПЕКТРУ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

Теоретичні оцінки основних механізмів прискорення КПНВЕ передбачають степеневий спектр генерації прискорених частинок  $J_{\text{gen}}(E) = kE^{-\gamma}$  з показником спектру  $\gamma \approx 2$  [5]. Однак, при поширенні космічних променів через міжзоряний простір вони взаємодіють з реліктовим випромінюванням, внаслідок чого спектр набуває певних особливостей [3, 5]:

а) ГЗК обрізання, яке подавляє протонний потік для енергій більше  $5 \cdot 10^{19}$  еВ за рахунок утворення піонів при взаємодії космічних променів з реліктовими фотонами:  $p + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow N + \pi + \text{all}$ ;

б) провал для енергій  $5 \cdot 10^{17} - 10^{19}$  еВ в потоці протонів, який виникає внаслідок утворення електрон-позитронних пар:  $p + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow p + e^+ + e^-$ ;

в) обрізання спектру важких ядер (від He до Fe) внаслідок фоторозщеплення.

Спостережуваний спектр КПНВЕ  $J_{\text{obs}}(E)$  внаслідок цих процесів буде модифікацією первісного спектру генерації, яка описується модифікаційним фактором [3, 6]:

$$\eta(E) = \frac{J_{\text{obs}}(E)}{J_{\text{gen}}(E)}$$

Головними особливостями модифікованого спектру протонного компонента є поява широкого провалу (dip) в області енергії  $E_{\text{p,ankle}}$  та ГЗК-обрізання в області енергії  $E_{\text{p,break}}$  (рис. 1а). Модифікований спектр залізного компонента характеризується обривом внаслідок фоторозщеплення в області енергії  $E_{\text{Fe,break}}$  (рис. 1б).

#### 4. ВІДНОВЛЕННЯ ВКЛАДУ ПРОТОННОГО ТА ЗАЛІЗНОГО КОМПОНЕНТІВ В ЗАГАЛЬНИЙ ПОТІК КПНВЕ НА ОСНОВІ ДАНИХ AUGER 2011

Потік космічних променів сорту "і" та енергії  $E$  характеризується середньою глибиною максимуму розвитку зливи вторинних частинок  $X_{\max}^i(E)$  [1, 5, 9]. Для потоку, що складається із суміші потоків двох елементів — заліза  $J_{\text{Fe}}$  та водню  $J_p$  — середня глибина максимуму розвитку злив на даній енергії рівна:

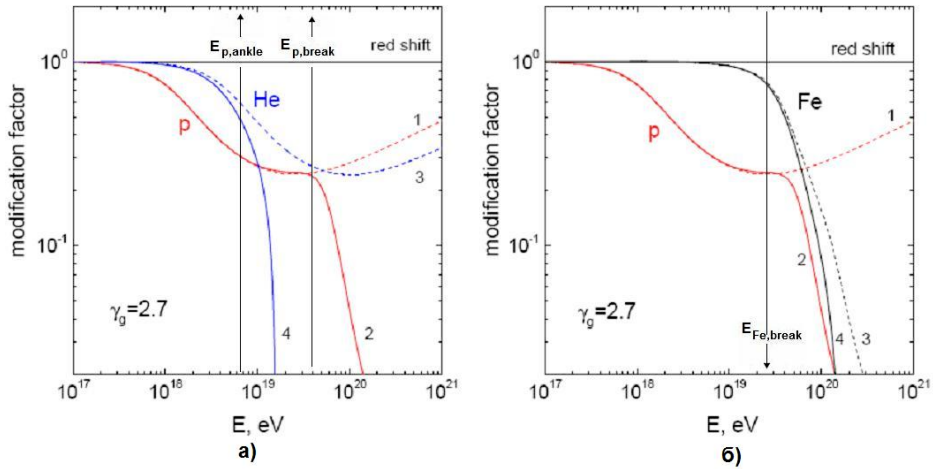


Рис. 1. Модифікаційний фактор для протонів та гелію (а) та заліза (б)

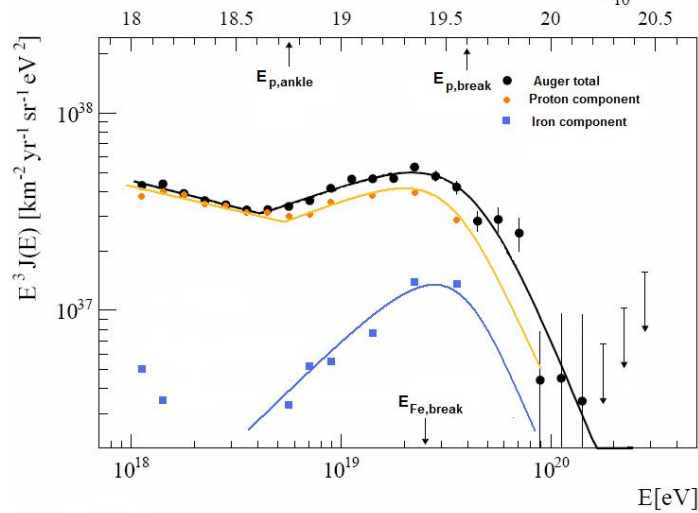


Рис. 2. Протонний (кружки) та залізний (квадратики) компоненти повного потоку КПНВЕ, відтворені за даними AUGER 2011

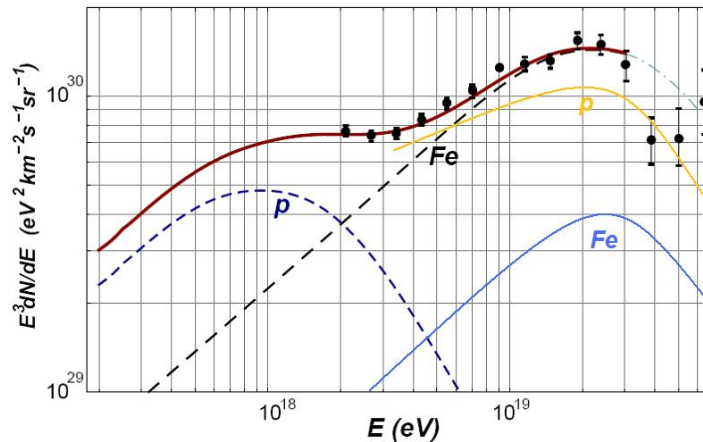


Рис. 3. Енергетичний спектр КПНВЕ за даними AUGER 2009 (кружки) та його розклад на протонну (p) та залізну (Fe) компоненти, запропонований в [7] (штриховані криві). Суцільні криві (p) та (Fe) представляють відтворені нами потоки протонів та ядер заліза за даними AUGER 2011 (рис. 2).

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

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

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

Для даних AUGER 2011 щодо спектру [8] та середньої глибини максимумів розвитку злив [9] проведене нами відтворення спектрів протонного та залізного компонентів зображено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, основний вклад в загальний потік КПНВЕ дають протони у всьому діапазоні енергій. Форма спектру протонного компонента близька до передбачуваного модифікаційним фактором (рис. 1а) для показника спектру генерації  $\gamma = 2.6$ .

Залізний компонент дає малий вклад в загальний потік на всіх енергіях, досягаючи максимального вкладу  $\alpha = 0.32$  при  $E = 3 \cdot 10^{19}$  еВ. Форма спектру залізного компонента також близька до передбачуваного модифікаційним фактором заліза (рис. 1б), але показник спектру генерації тут  $\gamma \approx 2$ . Ця різниця із показником спектру генерації протонного компонента може свідчити про різні механізми прискорення кожного з компонентів.

## 5. ДЖЕРЕЛА КПНВЕ В НАШІЙ ГАЛАКТИЦІ: ТЕСТ НА ХІМІЧНИЙ ВМІСТ

В ряді робіт останнього часу, зокрема в [7], пропонується пояснення енергетичного спектру КПНВЕ як результату прискорення частинок на фронтах релятивістських ударних хвиль від галактичних спалахів Гіпернових — надпотужних Наднових. В цих моделях всі КПНВЕ мають галактичне походження, на низьких енергіях в загальному потоці домінують протони, на високих — ядра заліза (релятивістські протони мають більший коефіцієнт дифузії і швидше покидають Галактику, ядра заліза затримуються надовше) (рис. 3).

Як видно з рис. 3, галактичні моделі прискорення КПНВЕ, в яких максимальна енергія прискорених частинок зростає із ростом заряду частинки (ядра), не узгоджуються з останніми даними експерименту AUGER щодо хімічного вмісту.

## 6. ВИСНОВКИ

В роботі відтворено потоки легкого (протони) та важкого (ядра заліза) компонентів КПНВЕ на основі експериментальних даних детектора AUGER 2011 року, щодо залежності від енергії середньої глибини максимумів розвитку злив. Показано, що основний вклад в загальний потік дають протони, причому форма спектру протонного компонента близька до модифікованого поглинанням на релікти степеневого спектру генерації з  $\gamma = 2.6$ . Важкий (ядра заліза) компонент дає малий вклад в загальний потік на всіх енергіях, досягаючи максимального вкладу  $\alpha = 0.32$  при  $E = 3 \cdot 10^{19}$  еВ. Форма спектру залізного компонента також близька до модифікованого поглинанням степеневого спектру генерації, але з  $\gamma \approx 2$ , що може свідчити про різні умови прискорення кожного з компонентів.

В ряді сучасних моделей КПНВЕ прискорюються локально, причому максимальні енергії протонів сягають декількох величин  $10^{18}$  еВ, а заліза — в 26 разів більше — біля  $10^{20}$  еВ. Ми показали, що такі моделі протирічать експериментальним даним AUGER щодо хімічного вмісту, тому вони вимагають подальшого вдосконалення.

1. *Abbasi R., et al.* Measurement of the flux of ultra high energy cosmic rays by the stereo technique // *Astroparticle Physics*. — 2009. — **32**. — P. 53–60.
2. *Allard D., Busca N. G., Decerprit G., et al.* Implications of the cosmic ray spectrum for the mass composition at the highest energies // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2008. — Issue 10. — P.033.
3. *Aloisio, R., Berezhinsky, V., Blasi P., et al.* A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays // *Astroparticle Physics*. — 2007. — **27**, Issue 1. — P. 76–91.
4. *Berezhinsky V.* Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays // *Advances in Space Research*. — 2008. — **41**, Issue 12. — P. 2071–2078.
5. *Berezhinskii V.S., et al.* *Astrophysics of cosmic rays* // North Holland, Amsterdam, 1990.
6. *Berezhinsky V., Gazizov, A., Grigorieva S.* On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays // *Physical Review D*. — 2006. — **74**, Issue 4, id. 043005.
7. *Calvez A., Kusenko A., Nagataki S.* Role of Galactic sources and magnetic fields in forming the observed energy-dependent composition of ultrahigh-energy cosmic rays // *Physical Review Letters*. — 2010. — **105**, Issue 9, id. 091101.
8. *Salamida F.* (For The Pierre Auger Collaboration) Update on the measurement of the CR energy spectrum above  $10^{18}$  eV made using the Pierre Auger Observatory // 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011 (arXiv:1107.4809)
9. *San Luis P.F.* (For The Pierre Auger Collaboration) The distribution of shower maxima of UHECR air showers // 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011 (arXiv:1107.4804)

Надійшла до редакції 1.08.2011