

УДК 524.1+524.7

Р. Гнатик, студент

ХІМІЧНИЙ СКЛАД КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

В роботі досліджується хімічний склад космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ). Останні результати експериментального вимірювання енергетичного спектру та хімічного складу КПНВЕ, представлені двома найкращими детекторами AUGER і HIREs, виявились суперечливими. Зокрема, дані HIREs узгоджуються з домінуванням протонів в потоці КПНВЕ для всіх енергій, тоді як дані AUGER вказують на зростаючий внесок важких ядер при найвищих енергіях. Ми розрахували залежність від енергії глибини максимального розвитку зливи X_{\max} і ширини розподілу X_{\max} для потоку КПНВЕ, який складається з суміші протонів, ядер гелію і ядер заліза. Беручи до уваги модифікаційний фактор, тобто зміну спектру генерації КПНВЕ внаслідок їх взаємодії з реліктовим випромінюванням, ми відновлюємо найкраще співвідношення елементів в загальному потоці для випадку даних AUGER і HIREs

In this paper we study the chemical composition of Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECRs). Recent results of the measurement of the energy spectrum and chemical composition of UHECRs presented by HIREs and AUGER are contradictory. HIREs data are consistent with proton-dominated flux of UHECRs, while AUGER data suggest increasing contribution of heavy nuclei at highest energy. We calculate the energy dependence of the depth of the shower maximum development X_{\max} and the width of the X_{\max} distributions for UHECR flux composed of mixture of proton, helium nuclei and iron nuclei. Taking into account the modification factor, i.e. modification of generation spectrum of UHECRs by their interaction with CMB, we find the best fit composition in the case of HIREs and AUGER data.

1. Вступ. Джерела та механізми прискорення космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) залишаються однією з найактуальніших задач сучасної астрофізики. Із загальних фізичних міркувань, зокрема, з умови утримання їх магнітним полем нашої Галактики, слідує, що космічні промені з енергіями понад 1 ЕєВ повинні мати позагалактичне походження. На жаль, напередодні сотої річниці відкриття космічних променів (В. Гесс, 1912 р.) досі залишаються невідомими джерела та механізми прискорення КПНВЕ. І це при тому, що за останні десятиліття було реалізовано ряд експериментів з реєстрації КПНВЕ. Зокрема, експерименти Fly's Eye (Око мухи), YAKUTSK, Akeno-AGASA, HiRes, AUGER, TA дали важливу інформацію про загальний потік, енергетичний спектр, хімічний вміст та анізотропію КПНВЕ [1]. Важливо відмітити, що максимальна енергія зареєстрованих досі КПНВЕ становить $3 \cdot 10^{20}$ еВ, що приблизно на 8 порядків перевищує очікувану енергію протона в експерименті LHC (7 ТєВ), тому дослідження КПНВЕ є надзвичайно важливими і для фізики елементарних частинок та фундаментальних взаємодій.

2. Теоретичні моделі космічних променів надвисоких енергій Описану вище сукупність спостережуваних даних щодо спектру, хімічного вмісту та анізотропії КПНВЕ не вдається самоузгоджено пояснити в рамках однієї теоретичної моделі. Найбільш успішними в поясненні спостережуваних даних зараз вважаються дві моделі: протонна модель та модель суміші протонів та важких ядер (ядерна модель).

Протонна модель, запропонована Березінським та ін [3–5], 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 дуже добре узгоджується з даними експериментів HiRes та TA як щодо форми енергетичного спектру так і хімічного вмісту. Недоліком протонної моделі вважається відсутність проявів у спектрі переходу від галактичного до позагалактичного компонента в діапазоні енергій 10^{17} еВ – 10^{18} еВ, та неузгодженість із даними AUGER про хімічний вміст, якщо останні підтвердяться.

В ядерній моделі вважається, що перехід від домінування галактичного до позагалактичного компонента відбувається в області провалу ($E \sim 5 \cdot 10^{18}$ еВ) [2]. 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 непогано описує дані експерименту AUGER, 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 (залишки наднових, пульсари).

© Гнатик Р., 2012

3. Вплив втрат енергії КП в наслідок взаємодії з реліктом на енергетичний спектр. При поширенні космічних променів через міжзоряний простір вони взаємодіють з реліктовим випромінюванням. Внаслідок цього спектр набуває певних особливостей:

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

б) провал для енергій $5 \cdot 10^{17} - 10^{19}$ eV 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.

Коректне врахування всіх процесів приводить до модифікації первісного спектру, випроміненого джерелом (спектр генерації), яка описується модифікаційним фактором:

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

Конкретний вид модифікаційного фактора для різних компонентів потоку КПНВЕ, який використовується нами в роботі, розрахований в [3,5] та приведений на рис. 1.

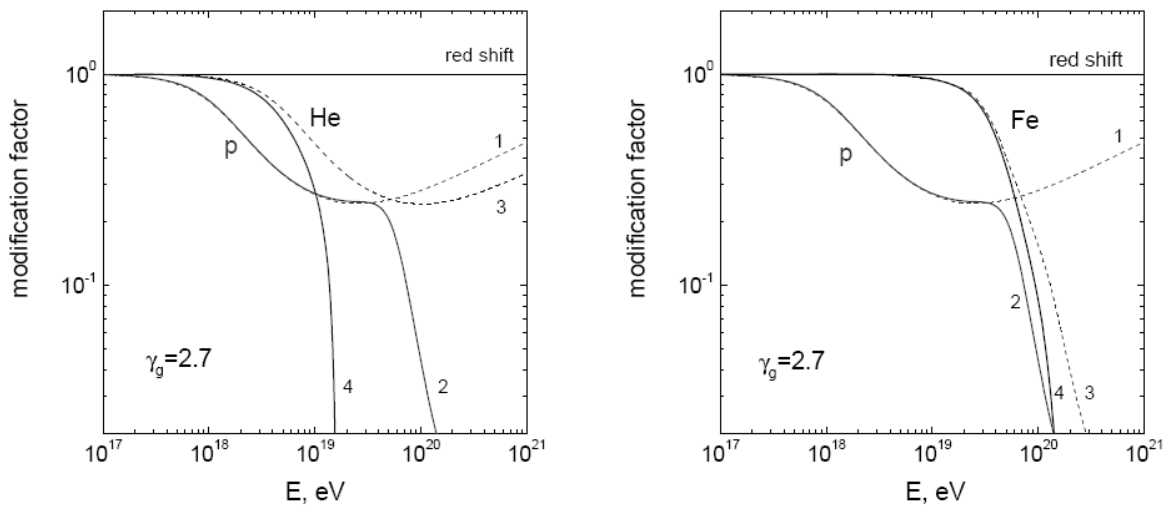


Рис. 1. Модифікаційний фактор для протонів та гелію (зліва) та заліза (справа)

4. Розрахунок X_{max} для суміші протонів, гелію і заліза з врахуванням модифікаційного фактору. Розглянемо потік, який складається з суміші протонів та ядер гелію. Очевидно, що для суміші двох елементів – водню та гелію – середня глибина максимуму розвитку злив на даній енергії рівна:

$$X_{\text{max}}^{p+He} = \frac{J_p \cdot X_{\text{max}}^p + J_{He} \cdot X_{\text{max}}^{He}}{J_p + J_{He}}$$

де J_p – потік протонного компонента космічних променів з врахуванням модифікаційного фактору, J_{He} – потік відповідного гелієвого компонента. Модифікаційний фактор враховується наступним чином:

$$J_p = J_p^0 \cdot \eta_p$$

$$J_{He} = J_{He}^0 \cdot \eta_{He}$$

де η_p та η_{He} – модифікаційний фактор протонного та гелієвого компонента відповідно; J_p^0 та J_{He}^0 – немодифіковані потоки протонного та гелієвого компонента. Для типового космічного вмісту

$$\frac{J_{He}}{J_p + J_{He}} = 0.1 = \alpha$$

отримуємо наступну формулу:

$$X_{\text{max}}^{p+He} = \frac{(1-\alpha) \cdot \eta_p \cdot X_{\text{max}}^p + \alpha \cdot \eta_{He} \cdot X_{\text{max}}^{He}}{(1-\alpha) \cdot \eta_p + \alpha \cdot \eta_{He}}$$

Відповідний графік цієї залежності приведений на рис. 2.

Для суміші протонів та заліза (з долею заліза α в загальному потоці) застосовуємо аналогічну формулу:

$$X_{\text{max}}^{p+Fe} = \frac{(1-\alpha) \cdot \eta_p \cdot X_{\text{max}}^p + \alpha \cdot \eta_{Fe} \cdot X_{\text{max}}^{Fe}}{(1-\alpha) \cdot \eta_p + \alpha \cdot \eta_{Fe}}$$

Розрахунки X_{\max} для суміші протонів та ядер заліза при трьох різних відносних долях заліза в потоці α : $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$, $\alpha=0.3$ приведені на рис. 2.

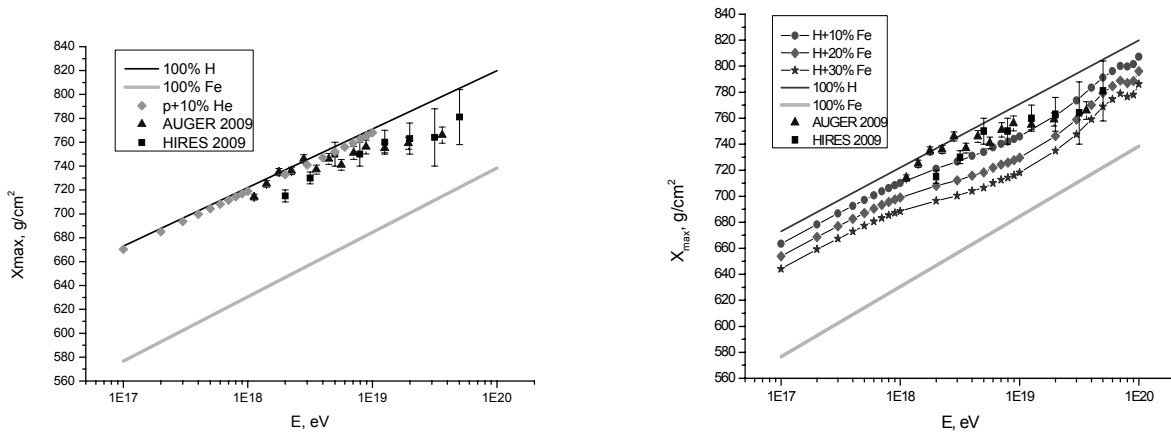


Рис. 2. Середня глибина розвитку зливи для суміші протонів та ядер гелію (зліва) та суміші протонів та ядер заліза (справа)

Для розрахунку суміші з трьох компонент аналогічно отримуємо:

$$X_{\max}^{p+He+Fe} = \frac{X_{\max}^p \cdot \gamma \cdot \eta_p + X_{\max}^{He} \cdot \beta \cdot \eta_{He} + X_{\max}^{Fe} \cdot \alpha \cdot \eta_{Fe}}{\gamma \cdot \eta_p + \beta \cdot \eta_{He} + \alpha \cdot \eta_{Fe}}$$

Розрахунки X_{\max} для наступних значень α (доля заліза), β (доля гелію) та γ (доля водню): $\beta=0.1$, а γ приймає значення 0.1, 0.2 та 0.3 ($\alpha=1-\beta-\gamma$) представлені на рис. 3. Звідси слідує, що найкращою комбінацією для пояснення даних AUGER є 20-30 відсотків заліза.

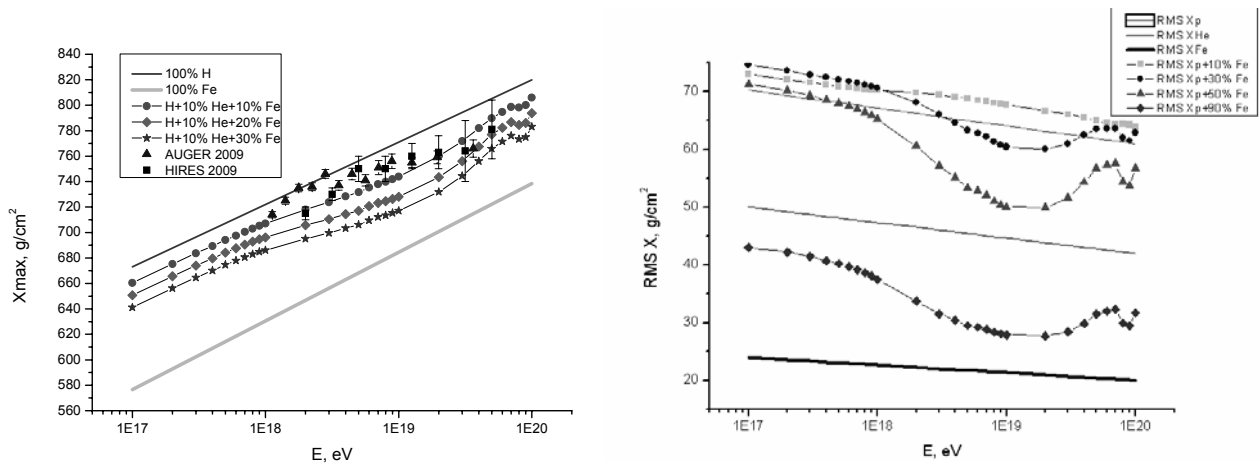


Рис. 3. Середня глибина розвитку зливи для суміші протонів та ядер гелію і заліза (зліва) та ширина X_{\max} для суміші протонів та ядер заліза (справа)

Розрахуємо поведінку σ для різних моделей. При розрахунку σ для суміші водню та заліза використовується наступна формула [6]:

$$\sigma^2 = (1-\alpha) \cdot \sigma_p^2 + \alpha \cdot \sigma_{Fe}^2 + \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot (\langle X_{\max} \rangle_p - \langle X_{\max} \rangle_{Fe})^2$$

Врахування модифікаційного фактора приводить до залежності коефіцієнта α від енергії, через залежність від енергії модифікаційного фактора кожного компонента. Явний вигляд залежності α від енергії такий:

$$\alpha = \frac{\eta_{Fe}}{\eta_{Fe} + \frac{(1-\alpha_0)}{\alpha_0} \cdot \eta_p} \quad \text{де} \quad \alpha_0 = \frac{J_{Fe}^0}{J_{Fe}^0 + J_p^0}$$

Залежність σ від енергії для суміші протонів та заліза для чотирьох значень α_0 : 0.1, 0.3, 0.5 та 0.9 подано на рис. 3. І ці дані вказують на необхідність залізного компонента (біля 50 відсотків) в загальному потоці КРНВЕ. Однак важливо відмітити, що, хоча якісно суміш протонів та заліза відповідає даним спостережень AUGER, кількісного співпадіння отримати не вдається. Подальші спостереження з покращенням статистики флуоресцентних детекторів необхідні для уточнення хімічного вмісту КРНВЕ.

5. Висновки. В нашій роботі проведено дослідження хімічного вмісту КПНВЕ. Проаналізовано сучасні спостережувані дані отримані на детекторах HiRes, AUGER та TA. Оскільки дані детектора AUGER свідчать про перехід від протонного до ядерного компонента із зростанням енергії, нами розраховані середні глибини розвитку злив X_{\max} та ширина розподілу $X_{\max} - \sigma$ як функції енергії КПНВЕ для потоків, що складаються з протонного, гелієвого та залізного компонентів. Новим елементом в цих розрахунках стало врахування модифікаційного фактора для коректного опису вкладу кожного компонента в загальний потік. Розрахована таким чином поведінка X_{\max} та σ показує зростання ролі важкого компонента на високих енергіях, однак, хорошого кількісного співпадіння немає. Причиною може бути недостатня статистика спостережуваних даних. Про це також свідчить і різні дані отримані експериментами HiRes-TA та AUGER.

1. *Abbasi, R. et al.* Measurement of the flux of ultra high energy cosmic rays by the stereo technique // *Astroparticle Physics*. -2009. – V. 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 – pp. 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. - V. 27, Issue 1 – p. 76–91. 4. *Berezhinsky, V.* Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays // *Advances in Space Research*. – 2008. – V. 41, Issue 12, p. 2071–2078. 5. *Berezhinsky, V.; Gazizov, A.; Grigorieva, S.* On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays // *Physical Review D*. – 2006. – V. 74, Issue 4, id. 043005. 6. *Unger M. for the Pierre Auger Collaboration* Analysis of Longitudinal Air Shower Profiles measured by the Pierre Auger Observatory // arXiv:1103.5857v1 [astro-ph.HE] .

Надійшла до редколегії 30.06.11