

УДК 524.1+524.7

Т. Богдан, канд. пед. наук, Б. Гнатик, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
 О. Кобзар, канд. фіз.-мат. наук, В. Марченко, канд. фіз.-мат. наук,
 О. Суцзов, ст. викладач

ЦЕНТАВР А ЯК ДЖЕРЕЛО КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

Розглянуто поширення космічних променів надвисоких енергій різного хімічного складу в галактичному та позагалактичному магнітних полях. Було досліджено можливість кореляції деяких подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER, з радіогалактикою Центавр А. Показано, що деякі з цих космічних променів дійсно можуть походити з області Центавр А.

Propagation of different chemical composition of UHECR in galactic and extragalactic magnetic fields was simulated. The simulation for the ultra high energy events, registered by the AUGER observatory in the sky region near Centaurus A was performed. It is shown that some of these events actually could originate from Centaurus A.

1. Вступ. Проблема прискорення космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) є однією з найактуальніших в астрофізиці високих енергій. Найбільш популярними кандидатами на роль прискорювачів КПНВЕ є достатньо близькі (до 75 Мпк) активні ядра галактик, які виявляють кореляцію із зареєстрованими обсерваторією AUGER подіями з енергією понад 60 ЕеВ [1] (рис. 1). Більше того, останні дані спостережень обсерваторії AUGER свідчать про певну кореляцію між напрямками приходу космічних променів та радіогалактикою типу FRI Центавр А [2]. В роботі [3] показано, що фізичні умови в Центаврі А можуть забезпечити прискорення КПНВЕ до спостережуваних енергій. Завданням нашої роботи є дослідження впливу галактичного та позагалактичного магнітних полів на траєкторію руху КПНВЕ та на кореляцію вибраних подій з радіогалактикою Центавр А.

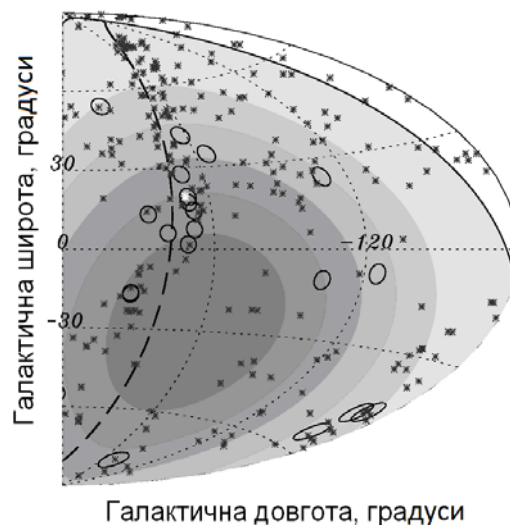


Рис. 1. Карта подій з енергією понад 60 ЕеВ, зареєстрованих обсерваторією AUGER (кілця) та активні ядра галактик з каталогу VCV на відстані до 75 Мпк (зірочки) [1]. Центавр А позначено білою зірочкою.

2. Галактичне та позагалактичне магнітні поля. В роботі для опису галактичного магнітного поля використовувалась модель Проуза – Шміда [4], модифікована Кахелерізом [5]. В цій моделі дискова компонента поля описується формулами (в полярних координатах):

$$B_r = B(r, \theta) \sin(\rho),$$

$$B_\theta = B(r, \theta) \cos(\rho),$$

де ρ (пітч-кут) – кут між вектором індукції поля в даній точці та перпендикуляром до радіус-вектора r в цій точці. Для функції $B(r, \theta)$ використовують наступну форму запису:

© Богдан Т., Гнатик Б., Кобзар О., Марченко В., Суцзов О., 2012

$$B(r, \theta) = B(r) \cos \left(\theta - \frac{1}{\operatorname{tg}(\rho)} \ln \left(\frac{r}{\xi_0} \right) \right) \exp \left(-\frac{z}{h} \right).$$

В моделі [5] прийнято такі значення параметрів: $\rho = -8^\circ$, $h = 0,2$ кпк, – напівтовщина галактичного диску, $R = 8,5$ кпк – відстань від центра Галактики до Сонця, $d = -0,5$ кпк – відстань від Сонячної системи до найближчої точки інверсії напрямку поля. Параметр $\xi_0 = (R + d) \exp \left(-\frac{\pi}{2} \rho \right)$ враховує орієнтацію спіральних рукавів Галактики у вибраній системі координат.

$$B(r) = B_0 \frac{R}{r} \quad \text{для } r > 4 \text{ кпк}, \quad B(r) = B_0 \frac{R}{4 \text{ кпк}} = \text{const} \quad \text{для } r < 4 \text{ кпк},$$

причому поле нормувалось таким чином, щоб отримати значення локального магнітного поля 2 мкГс [5]. Для позагалактичного магнітного поля було використано найпростішу модель, яка передбачає розбиття позагалактичного простору на кубічні комірки. У межах кожної комірки магнітне поле задається однорідним, проте його напрям змінюється від однієї комірки до іншої випадковим чином.

Для обмеження величини магнітного поля використовувався критерій [6]:

$$B \sqrt{l_0} \leq 10^{-9} \text{ Гс} \cdot \text{Мпк}^{1/2},$$

де B – максимальна індукція магнітного поля в комірці, l_0 – розмір комірки.

3. Вплив магнітних полів на рух космічних променів. Рух зарядженої частинки в магнітному полі здійснюється під дією сили Лоренца. Розрахунок траєкторії частинки з енергією E в галактичному магнітному полі проводився численним розв'язанням рівнянь руху:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{qc^2}{E} [\vec{v} \times \vec{B}], \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$$

методом Рунге – Кутта.

Рух космічних променів в позагалактичному полі подібний до дифузії, оскільки відхилення мають випадковий характер. За цієї умови результуюче відхилення променя від початкового напрямку пропорційне квадратному кореню з пройденого шляху:

$$\theta = \theta_0 \sqrt{N},$$

де N – кількість пройдених комірок, $\theta_0 = l_0 / R_L$ – відхилення на одній комірці (R_L – ларморівський радіус).

4. Результати розрахунків. На рис. 2 представлено положення подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER в області радіогалактики Центавр А (кільця, числа біля них вказують енергію зареєстрованого космічного променя в ЕєВ), та розраховані положення відповідних джерел з урахуванням галактичного поля (заповнені кружки) та міжгалактичного поля (концентричні кола).

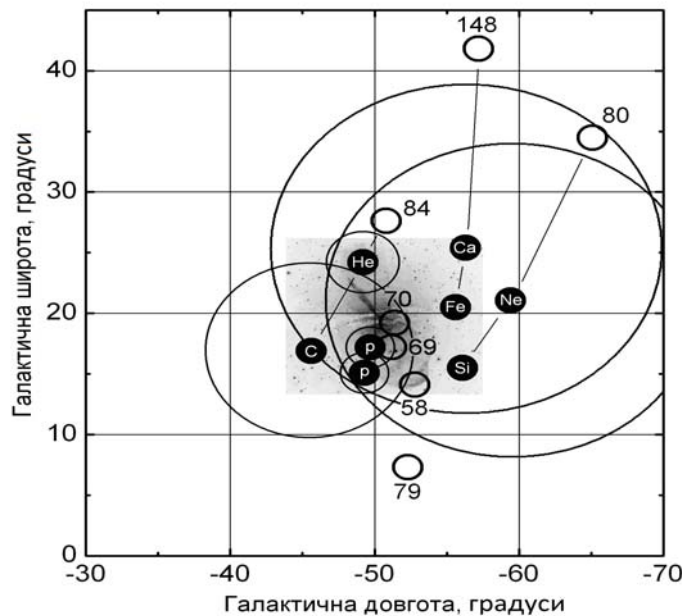


Рис. 2. Положення подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER в області радіогалактики Центавр А (кільця, числа біля них вказують енергію зареєстрованого космічного променя в ЕєВ), та розраховані положення відповідних джерел з урахуванням галактичного поля (заповнені кружки) та міжгалактичного поля (концентричні кола).

Кількісні значення відхилень залежать від типу частинки, її енергії та положення відповідної події на небесній сфері. Наприклад, для протонів з енергією ~ 80 EeV відхилення становлять $\sim 2^\circ$ в галактичному полі та менше 1° в міжгалактичному. Результуючі відхилення, спричинені міжгалактичним магнітним полем, для всіх типів частинок, які розглядались в роботі, приведено в табл. 1. Числові значення приведено в градусах з урахуванням похибки детекторів AUGER ($\sim 1^\circ$).

Таблиця 1

Максимальні відхилення космічних променів в міжгалактичному магнітному полі

Енергія, EeV	Кутові відхилення для космічних променів різних типів (градуси)						
	p	He	C	O	Si	Ca	Fe
58	2,0	3,6	10,4	13,9	24,3	34,7	45,1
69	1,8	3,1	8,8	11,7	20,4	29,2	37,9
70	1,8	3,0	8,7	11,5	20,1	28,7	37,3
79	1,6	2,7	7,7	10,2	17,8	25,5	33,1
80	1,6	2,7	7,6	10,1	17,6	25,1	32,7
84	1,6	2,6	7,3	9,6	16,8	24,0	31,1
148	1,2	1,7	4,2	5,5	9,6	13,6	17,7

5. Висновки. Згідно з застосованими моделями галактичного та позагалактичного магнітних полів радіогалактика Центавр А може бути джерелом щонайменше п'яти подій, зареєстрованих обсерваторією AUGER. Два космічні промені могли б походити з області Центавр А, якщо б вони були протонами, один – якщо б це було ядро елементів від гелію до вуглецю та дві події корелюють з радіогалактикою Центавр А у випадку більш важких ядер (Ca – Fe).

1. *The Pierre Auger Collaboration. Abraham, J. et al.* Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects // *Science*. – 2007. – Volume 318, Issue 5852 – P. 938–943. 2. *The Pierre Auger Collaboration. Abraham, J. et al.* Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter // *Astroparticle Physics*. – 2010. – Volume 34, Issue 5. – P. 314 – 326. 3. *Kachelrieß, M.; Ostapchenko, S.; Tomàs, R.* High energy radiation from Centaurus A // *New Journal of Physics*. – 2009. – Volume 11, Issue 6. – P. 065017. 4. *Prouza M., Smida R.* The Galactic magnetic field and propagation of ultra-high energy cosmic rays // *Astron.Astrophys.* – 2003. – 410. – P. 1-10. 5. *Kachelrieß, M.; Serpico, P. D.; Teshima, M.* The Galactic magnetic field as spectrograph for ultra-high energy cosmic rays // *Astroparticle Physics*. – 2007. – Volume 26, Issue 6. – P. 378–386. 6. *Globus N.; Allard D.; Parizot E.* Propagation of high-energy cosmic rays in extragalactic turbulent magnetic fields: resulting energy spectrum and composition // *Astronomy and Astrophysics*. – 2008. – Volume 479, Issue 1. – P. 97–110.

Надійшла до редколегії 01.07.11