

УДК 524.1+524.7

Б. І. Гнатик, А. А. Еліїв

Науково-дослідна лабораторія «Астрономічна обсерваторія»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
04053 Київ, вул. Обсерваторна 3

Відхилення космічних променів надвисоких енергій у магнітному полі Галактики

Досліджено поширення космічних променів (КП) надвисоких енергій ($E > 10^{19}$ eВ) у регулярному компоненті магнітного поля Галактики. Розглядаються симетрична і асиметрична моделі магнітного поля гало Галактики. Побудовано карти кутових відхилень КП. Концентрація магнітного поля до диску Галактики зумовлює деяке зменшення інтенсивності початково ізотропного позагалактичного потоку космічних променів для $E \leq 5 \cdot 10^{19}$ eВ з області диску Галактики. Цей ефект є більш помітним у випадку асиметричного магнітного поля гало. Оцінено внесок випадкової складової галактичного магнітного поля у відхилення КП.

ОТКЛОНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ, Гнатык Б. И., Элыив А. А. — Исследовано распространение космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий ($E > 10^{19}$ эВ) в регулярном компоненте магнитного поля Галактики. Рассматриваются симметричная и асимметричная модели магнитного поля гало Галактики. Построены карты угловых отклонений КЛ. Концентрация магнитного поля к диску Галактики обуславливает некоторое уменьшение интенсивности первично изотропного внегалактического потока космических лучей для $E \leq 5 \cdot 10^{19}$ эВ с области диска Галактики. Этот эффект более заметный в случае асимметричного магнитного поля гало. Оценен вклад случайной составляющей галактического магнитного поля в отклонение КЛ.

THE DEFLECTION OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS IN THE MAGNETIC FIELD OF GALAXY, by Hnatyk B. I., Elyiv A. A. — We investigate the propagation of Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECRs) with energy $E > 10^{19}$ eV in the regular component of magnetic field of our Galaxy. Model of the Galactic magnetic field with both symmetric and asymmetric cases of halo magnetic field have been considered. The maps of angular dependence of deflection of UHECRs have been constructed. Concentration of magnetic field in the Galactic disk results in some decreasing of initially isotropic extragalactic flux of cosmic rays for $E \leq 5 \cdot 10^{19}$ eV from a Galactic disk zone. This effect is more prominent in case of asymmetric halo magnetic field model. We estimate also a contribution of a random component of Galactic magnetic field to the deflection of UHECRs.

ВСТУП

Незважаючи на довгу історію досліджень, космічні промені (КП) ще й досі залишаються серйозним випробуванням для сучасних теорій. Космічні промені мають надзвичайно широкий енергетичний спектр з максимальною енергією $3 \cdot 10^{20}$ еВ, ймовірно, без очікуваного ГЗК-обрізання. Напрямки прибуття космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ), можливо, випадково розподілені і явно не корелюють з потенційними джерелами [3]. Найвірогіднішим поясненням є дифузійний характер поширення КПНВЕ у випадковому галактичному та позагалактичних магнітних полях [1].

Одночасно регулярна складова галактичного магнітного поля може призводити до деякого рівня анізотропії початково ізотропного потоку позагалактичних КПНВЕ. В роботі [4] вказується на можливість використання магнітного поля Галактики для ідентифікації джерел та хімічного складу КПНВЕ. Очікується, що при енергіях $E > 10^{18}$ еВ позагалактична складова космічних променів містить переважно протони, і домінує в загальному потоці КП [2]. Тут ми досліджуємо вплив регулярної і турбулентної складових галактичного магнітного поля на поширення та очікувану анізотропію протонного компонента позагалактичних КПНВЕ.

МОДЕЛЬ ГАЛАКТИЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Галактичне магнітне поле складається з регулярного і випадкового (турбулентного) компонентів. Обидва компоненти мають близькі амплітуди (0.3 і 0.5 нТл відповідно), але різні масштаби. Головний масштаб турбулентного магнітного поля має порядок $l_T \approx 100$ пк. Для регулярного магнітного поля ми використовуємо модель [6], у якій регулярна складова відслідковує спіральну структуру і змінює свій напрям між спіральними рукавами (бісиметрична модель). Ця модель включає також магнітне гало (магнітне поле простягається до $R_{\max} = 20$ кпк від галактичного центра) з двома можливостями для поля гало: симетрична модель з паралельним полем вище і нижче диску і асиметрична з протилежними напрямками.

ВІДХИЛЕННЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ
У РЕГУЛЯРНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

На противагу випадковому компоненту галактичного і позагалактичного магнітних полів, регулярний компонент спричиняє деяку анізотропію початково ізотропного потоку позагалактичних КПНВЕ для спостерігача, що знаходиться всередині Галактики. Величина очікуваної анізотропії залежить від співвідношення між характеристиками регулярної і випадкової складових. Для оцінки ролі регулярної складової ми зробимо розрахунки поширення КПНВЕ (протонів) у рамках згаданої вище моделі магнітного поля Галактики. Якщо запустити із Землі антипротон в напрямку приходу деякого протона з потоку КПНВЕ, то антипротон відновить первинну траєкторію протона. Тому ми будемо «інжектувати» 10^5 антипротонів із Землі у всі напрямки і шукати кути між векторами початкової і кінцевої (після проходження галактики) швидкості. Відповідні розподіли кутів відхилень θ_{reg} на небесній сфері представлені на рис. 1.

Для космічних променів з енергіями $E \sim 10^{19}$ еВ середнє відхилення складає $20 \dots 30^\circ$ і досягає максимуму біля галактичного центра. Навіть для найвищих енергій $E \sim 10^{20}$ еВ максимальне відхилення є більшим, ніж окіл похибок детектора (1.6°). В асиметричному магнітному полі відхилення космічних променів ще більші.

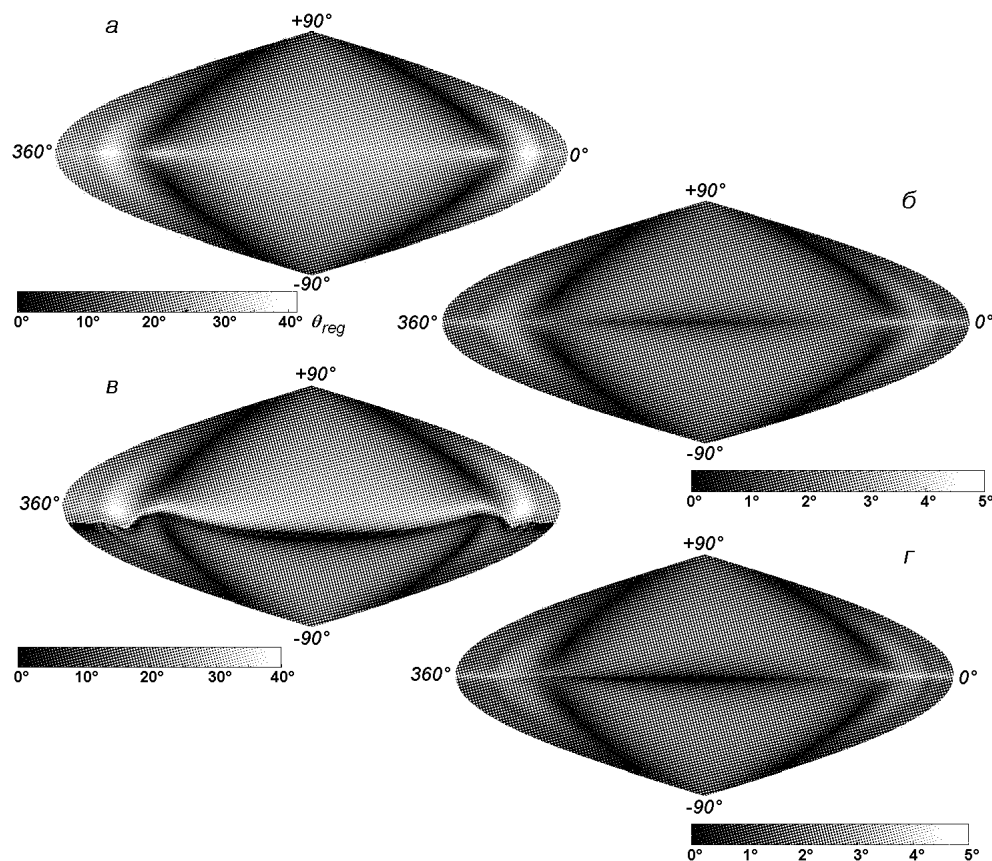


Рис. 1. Карти відхилень θ_{reg} космічних променів з енергією 10^{19} еВ (а, б) та 10^{20} еВ (в, г) в асиметричному (а, б) і симетричному (в, г) магнітному полі. Галактична система координат

ОЧІКУВАНА АНІЗОТРОПІЯ ПОТОКУ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

Оцінимо рівень анізотропії потоку космічних променів, зумовленої регулярною складовою галактичного магнітного поля. Як і у попередньому випадку, ми «інjektуємо» антипротони із Землі і обчислюємо положення кожної частинки при виході з Галактики. Для обох випадків симетричного і асиметричного магнітних полів спостерігається екваторіальна зона уникнення (рис. 2). Це означає, що у випадку початкового ізотропного потоку позагалактичних космічних променів та незначного впливу випадкової складової галактичного магнітного поля земний спостерігач зможе побачити зону уникнення як деяке зменшення потоку космічних променів з диску Галактики. Турбулентна складова галактичного магнітного поля з очікуваною амплітудою 0.5 нТл і основним масштабом 100 пк призводить до відхилення космічних променів від початкового напрямку на кут θ_{ran} [5]:

$$\theta_{\text{ran}} \sim 4^\circ \left(\frac{E}{10^{19} \text{ eV}} \right)^{-1} \left(\frac{r}{1 \text{ кпк}} \right)^{1/2}.$$

З цього випливає, що регулярна складова у прийнятій моделі галактичного магнітного поля домінує у відхиленні космічних променів, а випадкова не може значно вплинути на передбачений дефіцит потоку космічних променів з галактичного диску. Таким чином, експериментальні дослід-

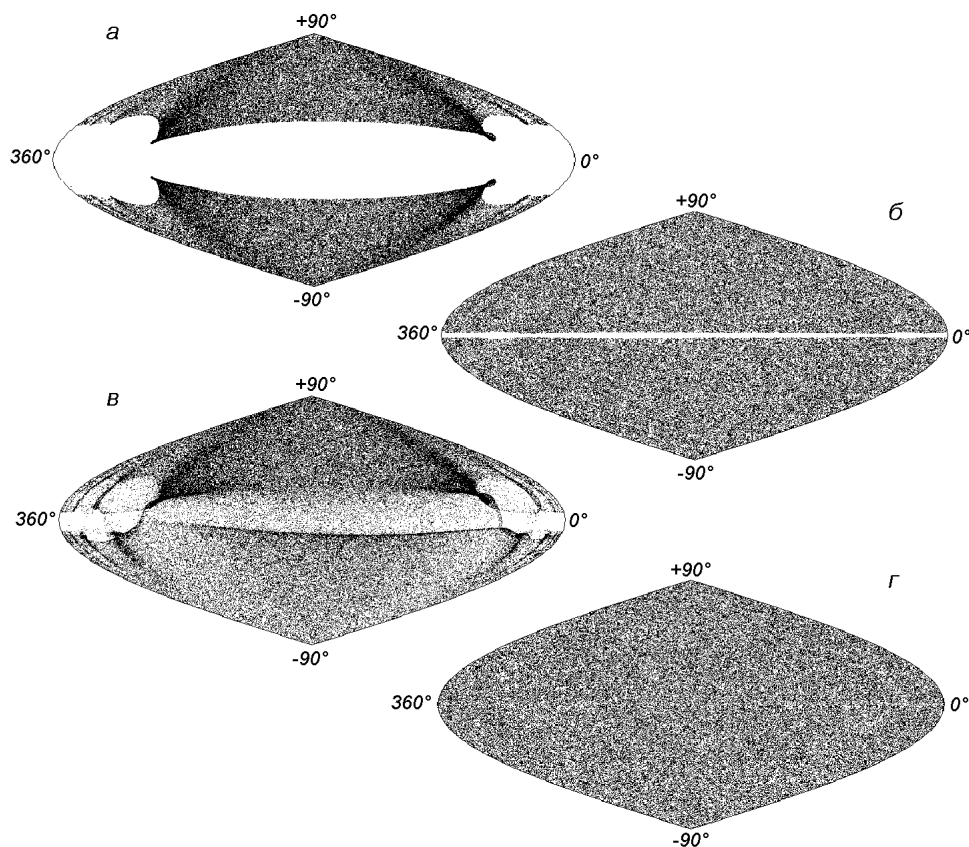


Рис. 2. Розподіл антипротонів з енергією 10^{19} еВ (а, в) та 10^{20} еВ (б, г) після проходження асиметричного (а, б) і симетричного (в, г) магнітного поля. Галактична система координат

ження анізотропії потоку КПНВЕ матимуть вирішальне значення для уточнення наших знань про галактичне магнітне поле .

1. *Berezinskii V. S., Bulanov S. V., Dogiel V. A., et al.* Astrophysics of cosmic rays. — North-Holland, 1990.—528 p.
2. *Berezinsky V. S., Grigorieva S. I., Hnatyk B. I.* Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at 10^8 – 10^9 GeV // *Astropart. Phys.*—2004.—21.—P. 617—625.
3. *Cronin J. W.* The highest-energy cosmic rays // *astro-ph/0402487*. 2004.
4. *Kachelriess M., Serpico P. D., Teshima M.* The Galactic magnetic field as spectrograph for ultra-high energy cosmic rays // *astro-ph/0510444*. 2005
5. *Sigl G., Miniati F., Ensslin T.* Cosmic magnetic fields and their influence on ultra-high energy cosmic ray propagation // *astro-ph/0409098*. 2004.
6. *Tinyakov P. G., Tkachev I. I.* Tracing protons through the Galactic magnetic field: a clue for charge composition of ultra-high-energy cosmic rays // *Astropart. Phys.*—2002.—18.—P. 165—172.

Надійшла до редакції 08.12.05