

УДК 533.93

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2025.72.33-38>

Людмила КОЗАК, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0001-9448-0030

e-mail: kozakliudmyla@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, Україна

Богдан ПЕТРЕНКО, д-р філософії

ORCID ID: 0000-0003-1073-0130

e-mail: bogdanart96@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, Україна

Назар ХАЛІМОНЕНКО, студ.

e-mail: nazarfifa2014@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПРИСКОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК У ТУРБУЛЕНТНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОТОКАХ

Вступ. Прискорення заряджених частинок у космічній плазмі є ключовим процесом, що визначає формування енергетичних спектрів сонячних енергетичних частинок і космічних променів. Найважливішими механізмами є дифузійне ударне прискорення (Фермі-I) на фронтах ударних хвиль і стохастичне прискорення (Фермі-II) у турбулентних середовищах. Їхня ефективність суттєво залежить від параметрів плазми у різних космічних областях: сонячній короні, сонячному вітрі та магнітосфері Землі.

Методи. Для дослідження стохастичного прискорення протонів застосовано тест-частинковий підхід у межах стохастичної моделі турбулентної дифузії. У моделюванні брали участь 5000 частинок із початковим нормованим імпульсом. Кількість інтеграційних кроків становила 100 за часового кроку 1 с. Коефіцієнт дифузії по імпульсу D_{pp} задано окремо для кожного середовища: 0.02 для сонячної корони, 0.015 для сонячного вітру та 0.01 для магнітосфери Землі.

Результати. Отримано часову еволюцію середнього нормованого імпульсу та розподіли частинок за енергіями. У сонячній короні спостерігається найінтенсивніше зростання імпульсу і формування протяжних степеневих хвостів розподілу, що відповідає потокам з енергіями до сотень MeV. У сонячному вітрі ефективність стохастичного прискорення нижча: спектри характеризуються обмеженим підвищенням енергії до сотень keV, що узгоджується зі спостереженнями потоків частинок у міжпланетному просторі. У магнітосфері Землі середній імпульс зростає найповільніше, спектри мають коротші хвости, проте локальні процеси (магнітне перез'єднання, диполяризація, плазмоїди) забезпечують додаткове прискорення електронів та іонів до десятків–сотень keV.

Висновки. Результати підтверджують універсальність механізмів Фермі: у короні вони формують високі енергії на фронтах корональних викидів мас і в турбулентних петлях; у сонячному вітрі домінує стохастичне "підкачування" на альфвенівських хвилях; у магнітосфері Землі процеси Фермі проявляються на малих масштабах у областях перез'єднання. Отже, відмінності у параметрах плазми зумовлюють різну ефективність прискорення, але загальні фізичні принципи залишаються спільними для всіх середовищ.

Ключові слова: космічна плазма, прискорення частинок, механізми Фермі, сонячна корона, сонячний вітер, магнітосфера Землі, турбулентність, чисельне моделювання.

Вступ

Прискорення заряджених частинок у космічній плазмі залишається одним із фундаментальних питань сучасної астрофізики й геліофізики і визначає динаміку сонячних енергетичних частинок, формування космічних променів, структуру радіаційних поясів, розвиток авроральних явищ і спектральні характеристики багатьох позасонячних джерел (Schlickeiser, 2013; Birn et al., 2012; Petrosian, 2012). У різних космічних середовищах – від сонячної корони до магнітосфери Землі, від залишків наднових до міжзоряного простору – частинки можуть отримувати енергію на кілька порядків вищу за теплову. Центральне місце в цьому процесі займають турбулентні неоднорідності, які створюють умови для багаторазових взаємодій частинок з електромагнітними збуреннями, струмовими шарами, фронтами ударних хвиль і хвилями (Blandford, & Eichler, 1987; Zank, 2014).

Класичним механізмом є дифузійне ударне прискорення (процес Фермі першого порядку), що ґрунтується на багаторазовому перетині частинкою фронту ударної хвилі, розсіяному турбулентністю у перед- і заударній областях. Середній приріст енергії у цьому разі пропорційний відношенню швидкості ударної хвилі до швидкості частинки і формує степеневі спектри, які узгоджуються зі спостереженнями космічних променів (Fermi, 1949). Проте ефективність прискорення на фронті ударних хвиль залежить від умов турбулентності, які в реальних космічних середовищах далеко не завжди відповідають ідеалізованому припущенню (Sandroos, & Vainio, 2006; Kozak et al., 2017; 2021).

Другий базовий механізм – стохастичне прискорення Фермі (Фермі-II). Тут приріст енергії відбувається внаслідок випадкових взаємодій частинок із рухомими неоднорідностями у турбулентному магнітному полі і є пропорційним квадрату відношення швидкості турбулентних структур до швидкості світла (Gary, 1993). Такий процес описується рівнянням Фоккера – Планка з оператором дифузії по імпульсу. Саме цей підхід ми поклали в основу моделювання (Barge, & Gorokhovski, 2020).

Інші важливі механізми, які виникають у процесі магнітного перез'єднання, а саме адиабатичне прискорення у стисканні магнітних структур, хвильово-резонансні взаємодії та пряме прискорення в паралельних електричних полях, можуть виступати як конкурентні або доповнювальні до процесів Фермі (Usanova, & Ergun, 2022; Shprits et al., 2008; Drury, 1983).

Важливим аспектом проведених досліджень є і порівняння різних середовищ – сонячної корони, сонячного вітру та магнітосфери Землі, що дозволяє оцінити універсальність і масштабованість механізмів прискорення.

© Козак Людмила, Петренко Богдан, Халімоненко Назар, 2025

Методи

Для дослідження процесів прискорення заряджених частинок у космічній плазмі застосовано комбінацію двох підходів: моделювання дифузійного ударного прискорення (Фермі-I) та стохастичного прискорення на турбулентних неоднорідностях (Фермі-II) (Rodean, 1996; Arnaudon et al., 2011).

У випадку Фермі-I використано спрощену модель дифузійного ударного прискорення, яка ґрунтується на багаторазових перетинаннях частинками фронту ударної хвилі. Середній приріст енергії на один цикл визначається співвідношенням

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \sim \frac{4 V_{sh}}{3 v},$$

де V_{sh} – швидкість ударної хвилі, v – швидкість частинки. Цей процес формує степеневі спектри розподілу $f(E) \propto E^{-s}$, характерні для космічних променів і сонячних енергетичних частинок. У моделюванні реалізовано тест-частинковий підхід, де енергія частинок наростає експоненційно у часі відповідно до ефективності ударного прискорення.

Другий механізм – стохастичне прискорення Фермі-II – описує приріст енергії частинок внаслідок випадкових взаємодій із рухомими неоднорідностями магнітного поля. Приріст енергії має вигляд

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \sim \left(\frac{V_{turb}}{c} \right)^2,$$

де V_{turb} – характерна швидкість турбулентних збурень, c – швидкість світла. Динаміка процесу описується рівнянням Фоккера – Планка з оператором дифузії у просторі імпульсів, який задається коефіцієнтом (Rodean, 1996)

$$D_{pp} = \frac{\langle (\Delta p)^2 \rangle}{2\Delta t}.$$

У чисельних розрахунках реалізовано дискретну стохастичну схему: імпульс частинки змінювався на $\Delta p = \sqrt{2D_{pp}\Delta t} \xi$, де ξ – випадкова змінна з нормальним розподілом, а Δt відповідає кроку інтегрування, прийнятому рівним $t_0 = 1$ с. У моделюванні використовувалася система з $N = 5000$ протонів, початковий імпульс яких нормувався до $p_0 = 1$. Кількість кроків становила 100, що відповідає фізичному часу розвитку процесу порядку сотень секунд. Визначальним параметром для Фермі-II є коефіцієнт дифузії по імпульсу D_{pp} , значення якого вибирали залежно від середовища: для сонячної корони $D_{pp} = 0.02$, для сонячного вітру $D_{pp} = 0.015$, для магнітосфери Землі $D_{pp} = 0.01$. Це відображає поступове зниження рівня турбулентності за переходу від внутрішньої сонячної атмосфери до міжпланетного простору і далі до навколосезного середовища.

Додатково враховувано характерні параметри плазми (Du et al., 2024; Reames, 1999): у сонячній короні густина $n \sim 10^9$ см⁻³, швидкість турбулентних збурень $V_{turb} \sim 100$ км/с; у сонячному вітрі – $n \sim 10$ см⁻³, $V_{turb} \sim 50$ км/с; у магнітосфері Землі – $n \sim 1$ см⁻³, $V_{turb} \sim 30$ км/с.

У результаті моделювання отримано часові ряди середнього нормованого імпульсу $\langle p / p_0 \rangle$ та кінцеві розподіли ймовірності для кожного середовища, що дозволило простежити вплив параметрів плазми на ефективність стохастичного прискорення та провести порівняння з ефектами, очікуваними для механізму Фермі-I.

Результати

Отримані результати демонструють суттєві відмінності у динаміці прискорення протонів у сонячній короні, сонячному вітрі та магнітосфері Землі (рис. 1). Імпульс зростає із часом у всіх випадках, однак швидкість цього зростання істотно залежить від параметрів середовища. У сонячній короні спостерігається найшвидший приріст, що пояснюється високими швидкостями турбулентних неоднорідностей і більшою густиною плазми. Це призводить до формування довгих "хвостів" у кінцевих розподілах, що відповідає наявності високоенергетичних частинок. Саме такий тип спектрів добре узгоджується зі спостереженнями сонячних енергетичних частинок, пов'язаних із корональними викидами мас (КВМ) і сонячними спалахами.

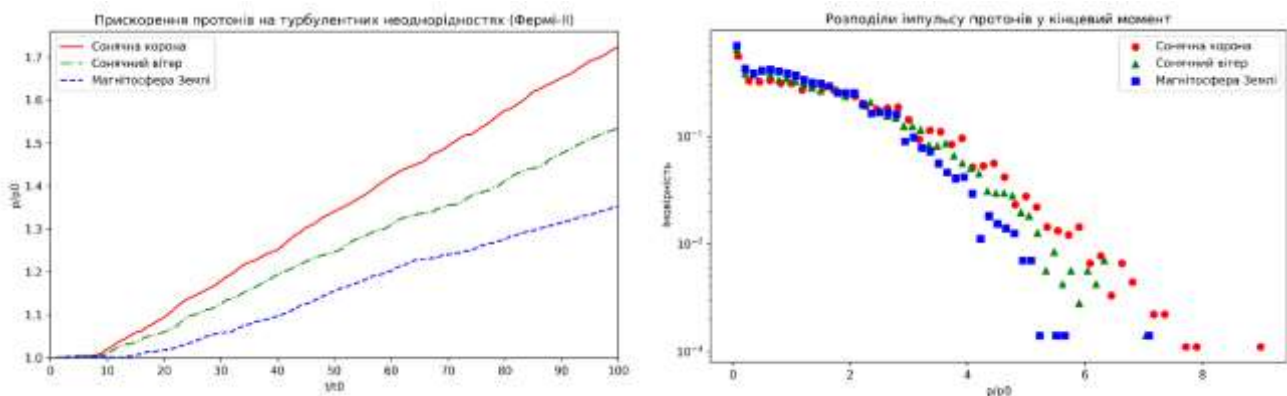


Рис. 1. Прискорення протонів у сонячній короні, плазмі сонячного вітру та магнітосфері Землі

У сонячному вітрі ефективність стохастичного прискорення нижча. Середній імпульс зростає повільніше, а спектральні хвости коротші, проте прискорення все ж помітне. Воно проявляється як плавне накопичення енергії частинками у взаємодіях з альфвенівською турбулентністю та флуктуаціями в геліосферному струмовому шарі. Результати чисельного моделювання добре відображають відомі особливості сонячного вітру, де характерні енергії частинок обмежуються сотнями еВ – десятками кеВ, але завдяки постійному впливу турбулентності навіть цей невеликий приріст енергії підтримує фон популяції енергетичних електронів і іонів у міжпланетному просторі.

У магнітосфері Землі середній імпульс зростає найповільніше, а хвости розподілів залишаються найбільш "урізаними". Це відповідає реальним умовам, де локальні процеси перез'єднання та турбулентність у хвості магнітосфери забезпечують лише обмежене підсилення енергії, але при цьому мають критичне значення для формування авроральних явищ і варіацій радіаційних поясів. У цих умовах стохастичне прискорення забезпечує радше інжекцію і початкове нагрівання частинок, тоді як значні прирости енергії досягаються у поєднанні з бетатронними та Фермі-I процесами на фронтах диполяризації та у плазмоїдах.

Окремий інтерес становить порівняння стохастичного механізму з дифузійним ударним прискоренням. Моделювання підтверджує, що Фермі-I генерує степеневі спектри з великою кількістю високоенергетичних частинок, тоді як Фермі-II дає більш плавне, експоненційне зростання з характерним швидким спаданням кількості частинок на високих енергіях. Це добре видно на графіках: для початкового дельта-подібного розподілу ударне прискорення формує виражений степеневий "хвіст", тоді як турбулентне прискорення призводить до експоненційного згасання розподілу (рис. 2, 3).

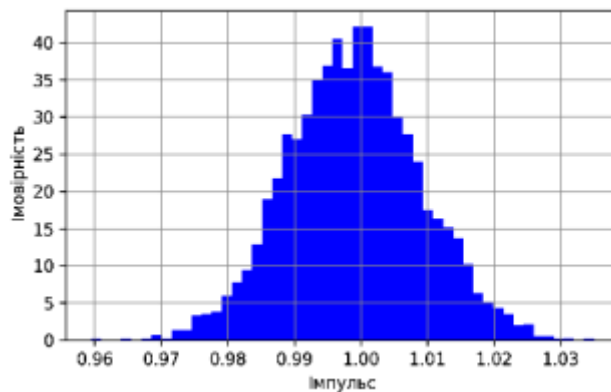


Рис. 2. Форма початкового розподілу імпульсу

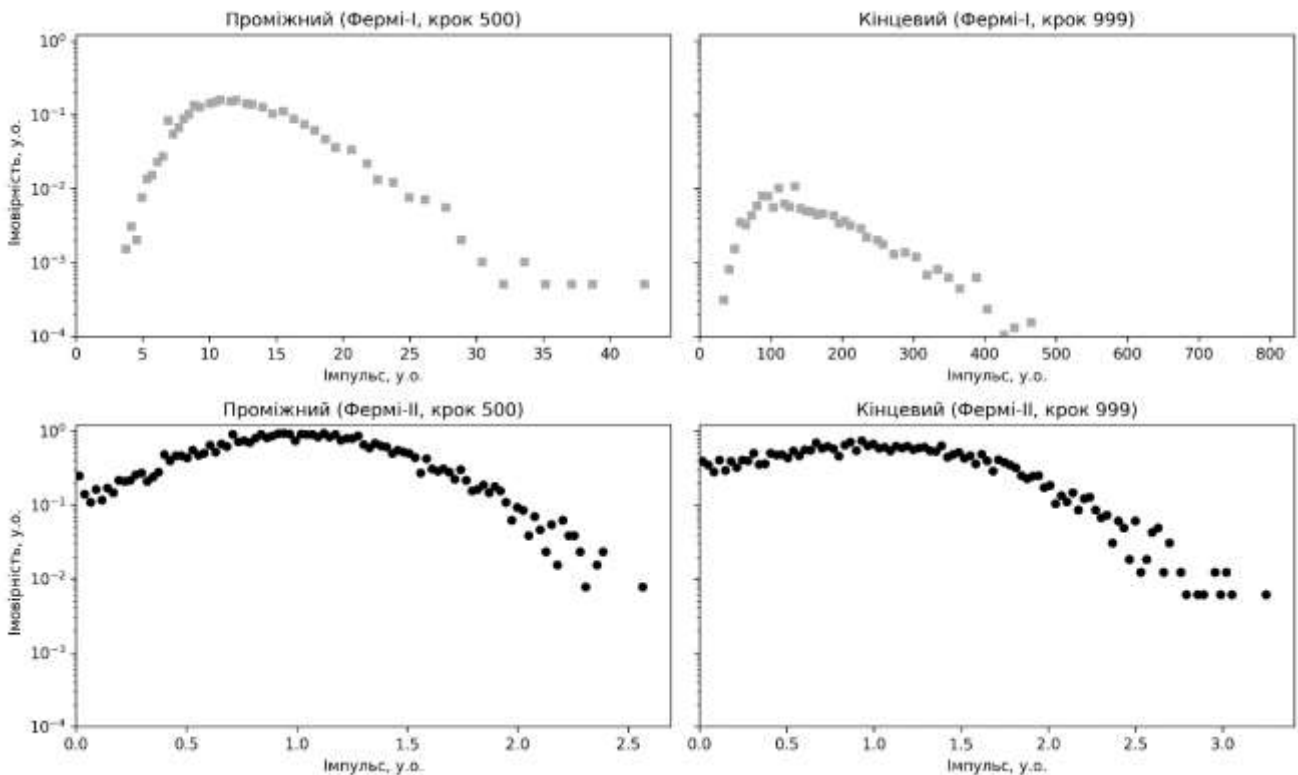


Рис. 3. Порівняння прискорення Фермі-I та Фермі-II для початкового імпульсу у вигляді дельта-функції (рис. 2)

Отже, у сонячній короні турбулентні й ударні процеси діють спільно, створюючи умови для генерації потоків з енергіями до сотень МеВ. У сонячному вітрі стохастичний механізм є домінантним і визначає середній рівень енергетизації частинок, тоді як у магнітосфері Землі він відіграє допоміжну роль, забезпечуючи початкову інжекцію, але не визначаючи глобальний енергетичний баланс. Отримані результати підтверджують універсальність процесів Фермі, водночас підкреслюючи, що ефективність їхньої реалізації залежить від масштабів і параметрів конкретного космічного середовища (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння ключових параметрів і механізмів прискорення

Параметр / Середовище	Сонячна корона	Сонячний вітер	Магнітосфера Землі
Магнітне поле (B)	1–100 Гс	10^{-5} – 10^{-4} Гс	10^{-4} – 10^{-3} Гс у хвості, до 0.1–1 Гс ближче до Землі
Густина (n)	10^8 – 10^{10} см ⁻³	1–100 см ⁻³	0.1–10 см ⁻³
Джерела енергії	КВМ, сонячні спалахи, перез'єднання	Міжпланетні ударні хвилі, геліосферний струмовий шар	Сонячний вітер, підсонячне і хвостове перез'єднання
Домінантні механізми	Фермі-I, бетатрон, хвильові резонанси	Фермі-II, стохастичне прискорення, локальні E	Пряме E , бетатрон, Фермі-подібні механізми
Області перез'єднання	Корональні петлі, основа КВМ	Геліосферний струмовий шар	Підсонячна область, X-точки у хвості
Енергії частинок	До сотень МеВ/нуклон	Сотні еВ – сотні кеВ	Електрони до ~100 кеВ, іони до кількох МеВ
Спостережувані ефекти	СКП, рентгенівські й γ-спалахи	Потоки енергетичних електронів, радіосплески	Полярні саява, варіації радіаційних поясів
Роль механізмів Фермі	Фермі-I на фронтах КВМ (СКП до сотень МеВ), Фермі-II в турбулентних областях після спалахів	Переважно Фермі -II на альфвенівських хвилях, обмежено Фермі-I на міжпланетних ударних хвилях	Фермі-I на фронтах диполяризації та плазмоїдах, Фермі-II в турбулентних областях хвоста

Дискусія і висновки

Отримані результати моделювання стохастичного прискорення протонів у трьох характерних космічних середовищах – сонячній короні, сонячному вітрі та магнітосфері Землі – підтвердили ключову роль механізмів Фермі у формуванні енергетичних спектрів частинок. Використання різних коефіцієнтів дифузії по імпульсу для кожного середовища дало змогу відтворити відмінності в ефективності стохастичного процесу, які узгоджуються з відомими спостереженнями.

У сонячній короні, де густина плазми й швидкості турбулентних неоднорідностей є максимальними, протони демонструють найінтенсивніше зростання середнього імпульсу та формування довгих степеневих "хвостів" розподілу. Це добре узгоджується з природними умовами виникнення сонячних енергетичних частинок, коли основне прискорення відбувається на фронтах ударних хвиль від КВМ (Фермі-I), а подальше "підкачування" енергії забезпечує турбулентне середовище корони (Фермі-II). Поєднання двох механізмів створює умови для ефективного формування спектрів з енергіями до сотень МеВ.

У плазмі сонячного вітру результати моделювання демонструють поступове, але менш інтенсивне зростання середнього імпульсу протонів. Тут стохастичний механізм Фермі-II відіграє домінуючу роль, оскільки масштабні ударні хвилі поширюються рідше. Цей процес узгоджується з даними спостережень міжпланетних потоків частинок, де альфвенівська турбулентність і магнітне перез'єднання у геліосферному струмовому шарі забезпечують обмежене прискорення до сотень кеВ. На відміну від сонячної корони, де спільна дія Фермі-I та Фермі-II формує жорсткі спектри, у сонячному вітрі превалюють м'якші розподіли з менш вираженими високоенергетичними хвостами.

У магнітосфері Землі стохастичне прискорення відбувається найповільніше, що пояснюється низькою турбулентністю та невеликою густиною плазми. Водночас локальні процеси створюють умови для реалізації обох механізмів: Фермі-I проявляється на фронтах диполяризації та в плазмоїдах хвоста магнітосфери, тоді як Фермі-II реалізується у турбулентних струмових шарах і хвильових полях під час магнітних бур і суббур. Це узгоджується зі спостереженнями супутників, які реєструють варіації потоків електронів і протонів, зміни у радіаційних поясах та авроральні явища.

Загалом результати чисельного моделювання підтверджують універсальність процесів прискорення: механізми Фермі діють у всіх досліджених середовищах, але їхня ефективність і кінцеві спектри істотно відрізняються. Важливим висновком є те, що: сонячна корона забезпечує найвищі енергії протонів завдяки поєднанню ударного прискорення (Фермі-I) і стохастичного "підкачування" (Фермі-II); сонячний вітер є середовищем із переважно стохастичним прискоренням, яке обмежує енергії протонів нижчим діапазоном; магнітосфера Землі виступає "природною лабораторією", де можна спостерігати як локальні прояви Фермі-I, так і Фермі-II, що дає унікальну можливість верифікації моделей за даними супутників.

Отже, механізми Фермі не варто розглядати окремо: саме їхнє поєднання визначає ефективність і форму енергетичних спектрів протонів у різних космічних умовах. Подальші дослідження, зокрема й моделі з повним

урахуванням магнітних пасток, нелінійної динаміки хвиль і розвиненої турбулентності, дадуть змогу точніше описати прискорення іонів та електронів у сонячній і геокосмічній плазмі.

Внесок авторів: Людмила Козак – концептуалізація, аналіз літератури, проведення моделювання, написання – оригінальна чернетка; Богдан Петренко – аналіз літератури, написання – перегляд і редагування; Назар Халімоненко – аналіз літератури, написання – перегляд і редагування.

Джерела фінансування. Роботу виконано за рахунок фінансування Міністерством освіти і науки України (проект № ДР 0125U002256).

Список використаних джерел

- Arnaudon, M., Cruzeiro, A. B., & Galamba, N. (2011). Lagrangian NavierStokes flows: a stochastic model. *Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical*, 44(17), 175501.
- Barge, A., & Gorokhovski, M. A. (2020). Acceleration of small heavy particles in homogeneous shear flow: direct numerical simulation and stochastic modelling of under-resolved intermittent turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 892, A28.
- Birn, J., Artemyev, A. V., Baker, D. N., Echim, M., Hoshino, M., & Zelenyi, L. M. (2012). Particle acceleration in the magnetotail and aurora. *Space science reviews*, 173(1), 49–102.
- Blandford, R., & Eichler, D. (1987). Particle acceleration at astrophysical shocks: A theory of cosmic ray origin. *Physics Reports*, 154(1), 1–75.
- Drury, L. O. C. (1983). An introduction to the theory of diffusive shock acceleration of energetic particles in tenuous plasmas. *Reports on Progress in Physics*, 46(8), 973.
- Du, C. X., Fu, H. S., Cao, J. B., Wang, Z., Yu, Y., Fu, W. D., & Zhang, W. Z. (2024). Strong energy conversion at magnetotail plasma sheet boundary layer. *Geophysical Research Letters*, 51(18), e2024GL111284.
- Fermi, E. (1949). On the origin of the cosmic radiation. *Physical review*, 75(8), 1169.
- Gary, S. P. (1993). *Theory of space plasma microinstabilities* (No. 7). Cambridge university press.
- Kozak, L. V., Lui, A. T. Y., Kronberg, E. A., & Prokhorenkov, A. S. (2017). Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 115–126.
- Kozak, L. V., Petrenko, B. A., Lui, A. T. Y., Kronberg, E. A., & Daly, P. W. (2021). Processes in the current disruption region: From turbulence to dispersion relation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), e2020JA028404.
- Petrosian, V. (2012). Stochastic acceleration by turbulence. *Space science reviews*, 173(1), 535–556.
- Reames, D. V. (1999). Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Science Reviews*, 90(3), 413–491.
- Rodean, H. C. (1996). *Stochastic Lagrangian models of turbulent diffusion* (Vol. 45). Boston: American Meteorological Society.
- Sandroos, A., & Vainio, R. (2006). Particle acceleration at shocks propagating in inhomogeneous magnetic fields. *Astronomy & Astrophysics*, 455(2), 685–695.
- Schlickeiser, R. (2013). *Cosmic ray astrophysics*. Springer Science & Business Media.
- Shprits, Y. Y., Subbotin, D. A., Meredith, N. P., & Elkington, S. R. (2008). Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and loss. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 70(14), 1694–1713.
- Usanova, M. E., & Ergun, R. E. (2022). Electron energization by turbulent electric fields: A possible source of the outer radiation belt. *Authorea Preprints*.
- Zank, G. P. (2014). *Transport processes in space physics and astrophysics* (Vol. 877). New York: Springer.

References

- Arnaudon, M., Cruzeiro, A. B., & Galamba, N. (2011). Lagrangian NavierStokes flows: a stochastic model. *Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical*, 44(17), 175501.
- Barge, A., & Gorokhovski, M. A. (2020). Acceleration of small heavy particles in homogeneous shear flow: direct numerical simulation and stochastic modelling of under-resolved intermittent turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 892, A28.
- Birn, J., Artemyev, A. V., Baker, D. N., Echim, M., Hoshino, M., & Zelenyi, L. M. (2012). Particle acceleration in the magnetotail and aurora. *Space science reviews*, 173(1), 49–102.
- Blandford, R., & Eichler, D. (1987). Particle acceleration at astrophysical shocks: A theory of cosmic ray origin. *Physics Reports*, 154(1), 1–75.
- Drury, L. O. C. (1983). An introduction to the theory of diffusive shock acceleration of energetic particles in tenuous plasmas. *Reports on Progress in Physics*, 46(8), 973.
- Du, C. X., Fu, H. S., Cao, J. B., Wang, Z., Yu, Y., Fu, W. D., & Zhang, W. Z. (2024). Strong energy conversion at magnetotail plasma sheet boundary layer. *Geophysical Research Letters*, 51(18), e2024GL111284.
- Fermi, E. (1949). On the origin of the cosmic radiation. *Physical review*, 75(8), 1169.
- Gary, S. P. (1993). *Theory of space plasma microinstabilities* (No. 7). Cambridge university press.
- Kozak, L. V., Lui, A. T. Y., Kronberg, E. A., & Prokhorenkov, A. S. (2017). Turbulent processes in Earth's magnetosheath by Cluster mission measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 115–126.
- Kozak, L. V., Petrenko, B. A., Lui, A. T. Y., Kronberg, E. A., & Daly, P. W. (2021). Processes in the current disruption region: From turbulence to dispersion relation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), e2020JA028404.
- Petrosian, V. (2012). Stochastic acceleration by turbulence. *Space science reviews*, 173(1), 535–556.
- Reames, D. V. (1999). Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Science Reviews*, 90(3), 413–491.
- Rodean, H. C. (1996). *Stochastic Lagrangian models of turbulent diffusion* (Vol. 45). Boston: American Meteorological Society.
- Sandroos, A., & Vainio, R. (2006). Particle acceleration at shocks propagating in inhomogeneous magnetic fields. *Astronomy & Astrophysics*, 455(2), 685–695.
- Schlickeiser, R. (2013). *Cosmic ray astrophysics*. Springer Science & Business Media.
- Shprits, Y. Y., Subbotin, D. A., Meredith, N. P., & Elkington, S. R. (2008). Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and loss. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 70(14), 1694–1713.
- Usanova, M. E., & Ergun, R. E. (2022). Electron energization by turbulent electric fields: A possible source of the outer radiation belt. *Authorea Preprints*.
- Zank, G. P. (2014). *Transport processes in space physics and astrophysics* (Vol. 877). New York: Springer.

Отримано редакцією журналу / Received: 23.09.25

Прорецензовано / Revised: 05.10.25

Схвалено до друку / Accepted: 11.11.25

Lyudmila KOZAK, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-9448-0030
e-mail: kozakliudmyla@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
Space Research Institute under NAS of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Bohdan PETRENKO, PhD
ORCID ID: 0000-0003-1073-0130
e-mail: bogdanart96@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
Space Research Institute under NAS of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Nazar KHALIMONENKO, Student
e-mail: nazarfifa2014@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ACCELERATION OF CHARGED PARTICLES IN TURBULENT PLASMA FLOWS

B a c k g r o u n d . *The acceleration of charged particles in space plasma is a key process that shapes the energy spectra of solar particles and cosmic rays. The most important mechanisms are diffusive shock acceleration (Fermi-I) at shock fronts and stochastic acceleration (Fermi-II) in turbulent environments. Their efficiency strongly depends on plasma parameters in different cosmic regions: the solar corona, the solar wind, and the Earth's magnetosphere.*

M e t h o d s . *To investigate stochastic proton acceleration, a test-particle approach was applied within a stochastic model of turbulent diffusion. The simulation involved 5000 particles with an initial normalized momentum. The number of integration steps was set to 100 with a time step of 1 s. The momentum diffusion coefficient was specified separately for each environment: 0.02 for the solar corona, 0.015 for the solar wind, and 0.01 for the Earth's magnetosphere.*

R e s u l t s . *Time evolution of the average normalized momentum and particle energy distributions was obtained. In the solar corona, the most intensive momentum growth and the formation of extended power-law distribution tails were observed, consistent with fluxes reaching energies up to hundreds of MeV. In the solar wind, the efficiency of stochastic acceleration was lower: spectra exhibited a limited energy increase up to hundreds of keV, in agreement with observations of interplanetary particle fluxes. In the Earth's magnetosphere, the average momentum grew the slowest, and spectra had shorter tails; however, local processes (magnetic reconnection, dipolarization, plasmoids) provided additional acceleration of electrons and ions up to tens–hundreds of keV.*

C o n c l u s i o n s . *The results confirm the universality of Fermi mechanisms: in the corona they produce high energies at CME shock fronts and in turbulent loops; in the solar wind stochastic "re-acceleration" on Alfvén waves dominates; in the Earth's magnetosphere Fermi processes operate on smaller scales in reconnection regions. Thus, differences in plasma parameters determine the efficiency of acceleration, but the underlying physical principles remain common across all environments.*

K e y w o r d s : *cosmic plasma, particle acceleration, Fermi mechanisms, solar corona, solar wind, Earth's magnetosphere, turbulence, numerical modelling.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.