

УДК 524.7

Роль стохастичного розсіяння в турбулентних областях Virgo A

М.В. Сидоренко¹, О.Б. Сушков²¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка²Чернігівський національний педагогічний університет імені Т.Г. Шевченка

Приведено результати прямого чисельного моделювання розсіяння заряджених частинок у турбулентних областях (радіовухах) Virgo A: на основі чисельного моделювання розсіяння та прискорення частинок космічних променів механізмом Фермі 2-го роду в фізичних умовах турбулентних областей, властивих Virgo A, оцінено характерні ділянки областей радіовух, звідки ми можемо очікувати КПНВЕ різного хімічного вмісту.

РОЛЬ СТОХАСТИЧЕСКОГО РАССЕЙНИЯ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ОБЛАСТЯХ VIRGO A, Сидоренко М.В., Сушков О.Б. — Приведены результаты прямого численного моделирования рассеяния заряженных частиц в турбулентных областях (радиолепестках) Virgo A: на основе численного моделирования рассеяния и ускорения частиц космических лучей механизмом Ферми 2-го рода в физических условиях турбулентных областей, присущих Virgo A, оценено характерные участки областей радиолепестков, откуда мы можем ожидать космические лучи сверхвысоких энергий различного химического состава.

ROLE OF STOCHASTIC SCATTERING IN VIRGO A TURBULENT REGIONS, by Sydorenko M.V., Sushchov O.B. — Results of direct numerical modeling of charged particles scattering in Virgo A turbulent regions (radio lobes) are presented. Typical radio lobes regions, which nuclei of different chemical composition are supposed to come from, are estimated by applying numerical modeling of ultra-high energy cosmic rays scattering and acceleration with Fermi II mechanism in the turbulent regions inherent to Virgo A.

Ключевые слова: турбулентность; стохастическое рассеивание; радиолепестки.

Key words: turbulence; stochastic scattering; radio lobes.

1. ВСТУП

Космічні промені — це протони, електрони та різні ядра (від ядер гелію до ядер феруму й, можливо, ядер урану), що прискорюються у Всесвіті і потрапляють в атмосферу Землі з енергіями від $\sim 10^6$ еВ й до $\sim 10^{20}$ еВ, а отже є найвисокоенергетичнішою званою формою випускання частинок. Густина енергії космічних променів у околиці Сонячної системи ~ 1 еВ·см⁻³ є такою ж, як і густина теплової енергії газу міжзоряного середовища, густина енергії його турбулентності та густина енергії магнітного поля Галактики [1].

Космічне походження космічних променів відкрив В.Гесс у 1912 році завдяки явищу зростання ступеня іонізації повітря із збільшенням висоти над поверхнею Землі, а сам термін “космічні промені” запропонував у 1925 році Р. Міллікен. Основним джерелом космічних променів з енергіями до 10^{18} еВ вважаються галактичні залишки Наднових зір, тоді як джерелами космічних променів з енергіями понад 10^{18} еВ вважають позагалактичні джерела, такі як активні ядра галактик (АЯГ), гама-спалахи, магнетари та ін [3].

У класі АЯГ, декілька різних типів об'єктів можна вважати кандидатами на роль прискорювачів космічних променів до надвисоких енергій. Всі вони мають центральну активну область, один або два джети, які закінчуються радіовухами. В цих областях декілька механізмів прискорення можуть діяти паралельно [9]. Зокрема, процеси Фермі першого порядку можуть відбуватися біля фронтів ударних хвиль, індуктивне прискорення — у релятивістських струменах, а стохастичне прискорення, ймовірно, відбувається у радіовухах [4, 6, 11]. Особливий інтерес представляють Сеп А, радіогалактика FR I в південній півкулі, з якою, можливо, пов'язані ряд подій, виявлених установкою Auger (енергія вище $10^{19.7}$ еВ) та Virgo A — гігантська еліптична галактика з активним ядром, що знаходиться на відстані 16,7 Мпк від Землі.

У даній роботі ми розглянемо випадок стохастичного розсіяння частинок космічних променів у турбулентному середовищі, що відповідає фізичним умовам у радіовухах Virgo A, оцінимо характерні відстані від ядра, на яких можна очікувати космічні промені певного хімічного складу. З результатами для Сеп А можна ознайомитися у нашій попередній роботі [12].

2. VIRGO A: ЕЛІПТИЧНА ГАЛАКТИКА З ДЖЕТОМ

Однією з найцікавіших структурних деталей активних галактик є джети. Ці довгі, тонкі утворення, що починаються в ядрі галактики і тягнуться на сотні і тисячі світлових років, закінчуючись

гігантськими хмарами газу — радіовухами. Згідно з теоретичними моделями, джети формуються у внутрішніх частинах акреційного диску навколо надмасивних чорних дір у ядрах галактик. Головну роль у колімації й утримуванні джетів грає, ймовірно, магнітне поле. Область формування струменів настільки компактна, що її пряме спостереження було не доступним існуючим телескопам. Вперше цю область розміром у кілька десятків світлових років у галактики Virgo A (M87) вдалося виділити шляхом спільних спостережень на VLBA, VLA та інших радіотелескопах.

Мессьє 87 (NGC 4486, Virgo A (Діва А)) — гігантська еліптична галактика, найбільша в скупченні галактик Діви з масою 2000 – 3000 млрд. сонячних мас, і одна з найбільших відомих галактик. M87 є потужним джерелом радіо- і гамма-випромінювання. Передбачається, що в центрі галактики знаходиться надмасивна чорна діра з масою близько 6,6 мільярдів сонячних мас.

Галактика M87 — це одна з найближчих галактик ($L = 16,7$ Мпк) типу FR I, що має ознаки активності: з ядра галактики вилітають струмені речовини (джети), що рухаються з релятивістською швидкістю. Перший з них був відкритий в 1918 році і має довжину більше 5000 св. років ($\approx 1,5$ кпк). Як виявилось, поблизу області свого формування струмінь має вигляд конуса з розходженням близько 60 градусів і звужується до 6 градусів на відстані всього декількох світлових років (~ 1 пк).

Джет у M87 має нерегулярну переривчасту структуру [10]. Він простежується протягом усього спектру, від рентгенівського до оптичного, і далі до радіо-діапазону (рис. 1). Випромінювання у всіх цих діапазонах є синхротронним, тобто виникає при закручуванні швидких електронів навколо силових ліній магнітного поля. Існує ідея, що в центрі M87 обертається надмасивна чорна діра, яка захоплює галактичну речовину, при цьому виникає потужне електромагнітне поле, яке ініціює спрямований викид речовини з чорної діри вздовж осі обертання у вигляді вузького джету.

3. СПОСТЕРЕЖЕННЯ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ ВІД VIRGO A

Радіогалактики завдяки наявності активних процесів (джети, ударні хвилі, радіовуха) вважаються можливими прискорювачами КП до енергій 10^{20} еВ. Релятивістські струмені (джети), а також гігантські радіовуха в радіогалактиках є потенційними джерелами космічних променів надвисоких енергій. Знання фізичних умов в цих областях дає життєво важливу інформацію для розуміння механізмів прискорення до таких енергій.

Завдяки своєму розташуванню Virgo A — це прекрасний об'єкт для дослідження прискорення космічних променів. Користуючись наявними даними про фізичні умови в релятивістських струменях, а також радіовухах M87, можна оцінити можливості по прискоренню частинок до надвисоких енергій.

У випадку прискорення космічних променів надвисоких енергій в Virgo A, частинки набирають енергію в релятивістському струмені (джеті), як це показано авторами в роботі [8] для Сеп А, та виходять

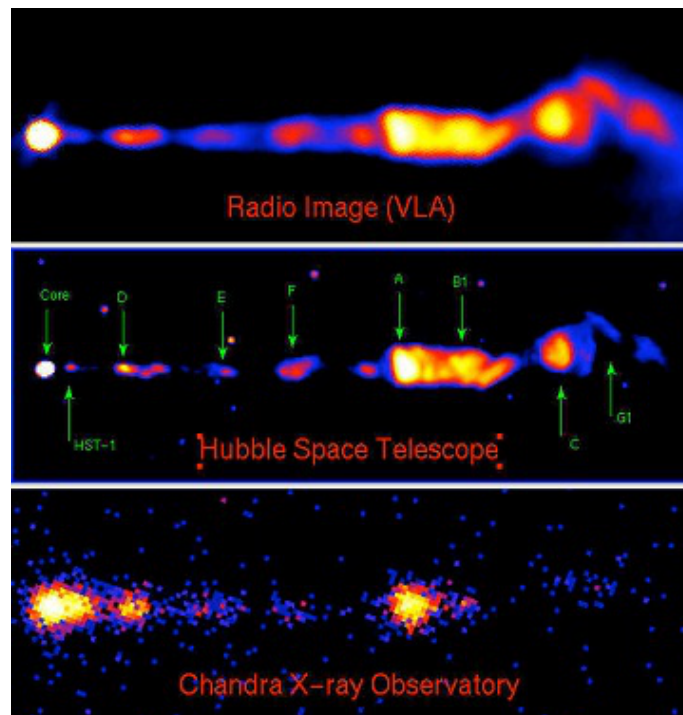


Рис. 1. Зображення релятивістського джету радіогалактики M87 в радіо-, оптичному та рентгенівському діапазонах (X-ray: NASA/CXC/MIT/H.Marshall et al., Radio: F.Zhou, F.Owen (NRAO), J.Biretta (STScI), Optical: NASA/STScI/UMBC/E.Perlman et al.)

з нього в радіовухо — область турбулентної плазми з глобальним магнітним полем, направленим під кутом до осі джету. В радіовуках частинки космічних променів, очевидно, додатково прискорюються за допомогою стохастичних процесів розсіяння на турбулентних флуктуаціях. Хоча значення цього додаткового прискорення може бути незначним, його внесок буде істотним для розсіювання колімованого потоку частинок по відношенню до початкового напрямку: якщо джет, вздовж якого рухаються частинки, направлений під кутом ψ до променя зору земного спостерігача, ми побачимо космічні промені тільки тоді, коли вони пройшовши певну відстань від ядра галактики, розсіються на кути $\geq \psi$. Цей ефект має важливе значення для оцінки кореляції напрямків приходу космічних променів надвисоких енергій від астрофізичних об'єктів, таких як Virgo A.

Релятивістські джети M87 спрямовані під кутом $\psi \geq 20^\circ$ до променя зору земного спостерігача [10], тому частинки космічних променів будуть спостерігатися тільки з області, де пучок прискорюваних частинок, що рухаються вздовж джету вже розфокусується (ізотропізується по напрямках), тобто відхилиться від початкового напрямку на кути, більші за ψ . Нашим завданням є визначення характерного часу ізотропізації таких частинок і оцінка розмірів областей радіовух, з яких ми можемо очікувати події КПНЕ, якби вони були протонами (p), ядрами гелію (He), вуглецю (C), кисню (O) і заліза (Fe).

4. ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЮВАННЯ І ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Розсіяння заряджених частинок в турбулентній плазмі можна дослідити моделюючи турбулентні флуктуації магнітних та електричних полів набором випадкових МГД хвиль різної довжини та частоти, і чисельно досліджуючи траєкторії та імпульси великої кількості частинок, інжектованих в область існування змодельованої турбулентності. Головний вклад в сумарну зміну напрямку кожної частинки складатиметься з окремих актів резонансної взаємодії частинки з турбулентними флуктуаціями, в нашому випадку — з альфвенівськими хвилями [5].

Турбулентна область, характерна для Virgo A, була змодельована накладанням 500 альфвенівських хвиль з різною довжиною (довжини хвиль лежать в інтервалі $\lambda_{\min} = 100$ пк, $\lambda_{\max} = 34$ кпк), частотою, фазою і напрямком на стаціонарне магнітне поле ($B_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ Гс), спрямоване вздовж джету. Рівень тур-

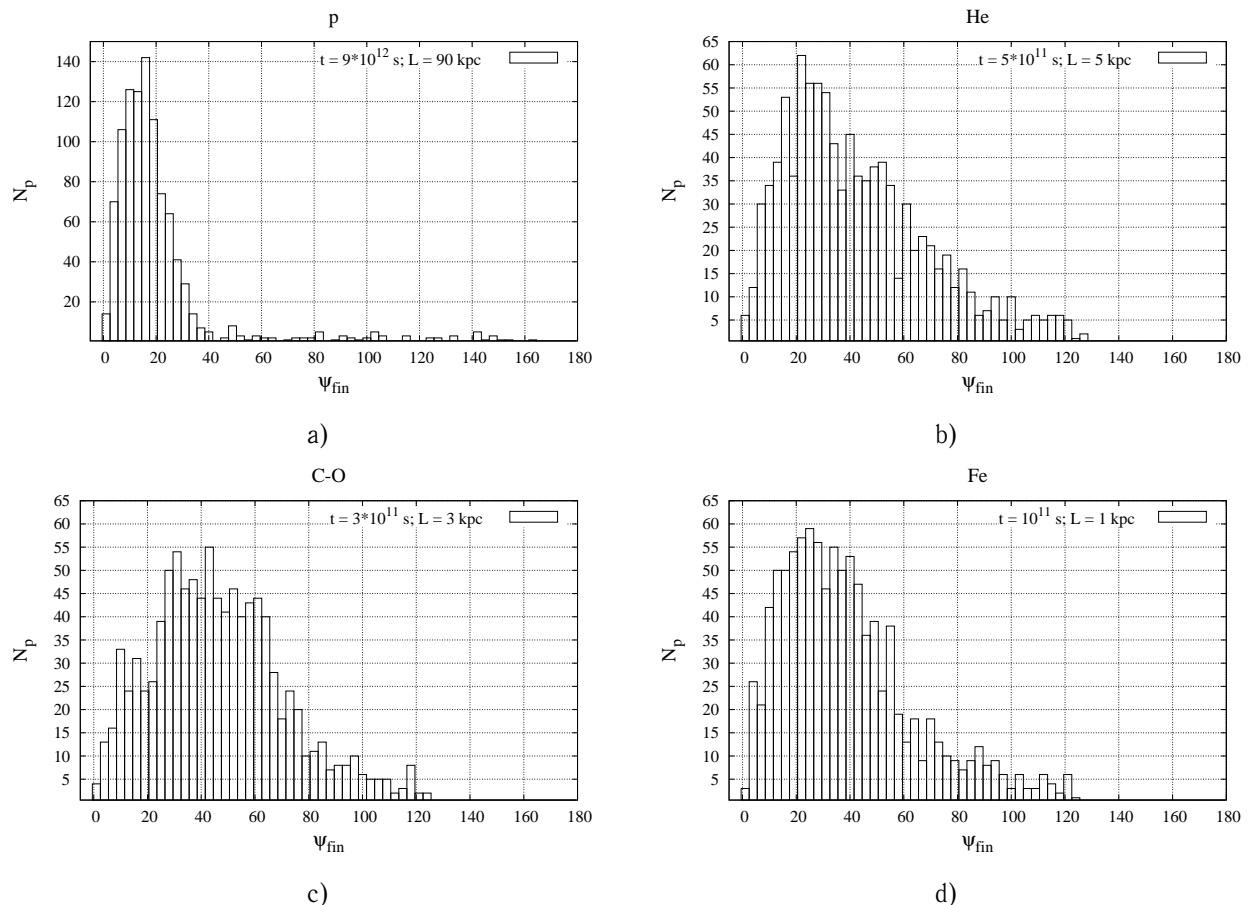


Рис. 2. Час стохастизації і розрахована відстань від ядра галактики для частинок космічних променів: а) протонів (p), б) ядер гелію (He) в) вуглецю — кисню (C-O), д) ядер заліза (Fe). У початковий момент часу всі частинки рухаються вздовж джету ($\psi_0 = 0^\circ$).

булентності $\frac{(\delta B)^2}{B_0^2} = 1.0$, густина плазми $n = 10^{-2} \text{ см}^{-3}$, швидкість альфвенівських хвиль $\beta_A = 0.434 \cdot 10^{-3}$ (130 км/сек) (параметри середовища з [7]). Більш детально про принцип моделювання турбулентного середовища можна дізнатися з наших попередніх робіт [13], [14].

Для розрахунків процесу стохастизації колімованого потоку частинок у радіусі M87 нами було інжектовано в змодельовану турбулентну область 1000 моноенергетичних частинок (p, He, C, O, Fe з атомними масами $A = 1, 4, 12, 16, 56$ відповідно), що рухаються з початковим значенням лоренц-фактора $5.5 \cdot 10^{10}/A$ (55 EeV — типові енергії КП, зареєстровані установкою AUGER) в одному напрямку — вздовж джети. В процесі взаємодії з турбулентністю з'являються частинки, що відхиляються від свого початкового напрямку на кути, більші за ψ ($\geq 20^\circ$). Момент часу, при якому це відбувається, фіксується і для нього проводиться оцінка відстані, пройденого частинками від ядра галактики.

Типові часи стохастизації і відповідні їм відстані від ядра галактики для космічних променів надвисоких енергій (55 EeV) різного хімічного складу представлені на рис. 2: протони (p), що відхиляються від початкового напрямку поширення на кут $\psi \geq 20^\circ$ за час $t = 9 \cdot 10^{12}$ секунди, будуть спостерігатися на відстані $L_p \geq 90$ кпк від ядра, для ядер гелію (He) ця відстань рівна $L_{\text{He}} \geq 5$ кпк ($t = 5 \cdot 10^{11}$ сек.), для вуглецю (C) і кисню (O) — $L_{\text{C-O}} \geq 3$ кпк ($t = 3 \cdot 10^{11}$ сек) і ядер заліза (Fe) — $L_{\text{Fe}} \geq 1$ кпк ($t = 10^{11}$ сек.).

Аналізуючи результати моделювання, ми приходимо до певного протиріччя з результатами роботи [2], де автори вказують на змодельоване ними джерело протонної компоненти космічних променів, яке знаходиться на відстані ≈ 550 кпк від Virgo A. Що ж стосується наших результатів, то це джерело міститься на краю турбулентної зони радіовуха, що свідчить про кращу кореляцію частинок космічних променів з Virgo A.

5. ВИСНОВКИ

В області астрофізики високих енергій останнім часом велика увага приділяється радіогалактикам FR I, як найбільш імовірним джерелам прискорення космічних променів надвисоких енергій. Для них характерні значно слабші викиди речовини (джети), що поступово гальмуються міжзоряним середовищем. Область гальмування у таких об'єктів — це дуже турбулентне середовище, яке є підходящим місцем для прискорення КП за допомогою механізму Фермі 2-го порядку. Причому роль розсіюючи центрів відводиться турбулентним флуктуаціям магнітного поля.

У даній роботі ми провели пряме чисельне моделювання процесу стохастичного розсіювання частинок КП у середовищі з сильно збудженою релятивістською турбулентністю, що є характерною для областей радіовух Virgo A. Було оцінено відстані від ядра, з яких можна очікувати частинки КП різного хімічного складу. Наші результати підтверджують кореляцію подій космічних променів надвисоких енергій з радіогалактикою Virgo A.

1. Bergman D., Belz J. Topical Review: Cosmic rays: the Second Knee and beyond // J. of Phys. G: Nucl. and Part. Phys. — 2007. — **34**, Is.10. — P. R359–R400.
2. Giacinti G., Semikoz D. Search for Nuclei Sources in the Ultra-High Energy Cosmic Ray Data, 2011, [arXiv:1107.2359]
3. Halzen F. The Search for the Sources of the Cosmic Rays One Century after their Discovery // Invited talk at XVI International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2010), Batavia, Illinois, USA 28 June 2 July 2010.
4. Lyutikov M., Ouyed R. Inductive acceleration of UHECRs in sheared relativistic jets // Astropart. Phys. — 2007. — **27**, Is.6. — P. 473–489.
5. Melrose B. Acceleration Mechanisms // Encyclopedia of Complexity and Systems Science. — 2009. — Part 1. — P. 21–42.
6. Ostrowski M. Acceleration of ultra-high energy cosmic ray particles in relativistic jets in extragalactic radio sources // Astronomy and Astrophysics. — 1998. — **335**. — P. 134–144.
7. Pfrommer C. Toward a comprehensive model for feedback by active galactic nuclei: new insights from M87 observations by LOFAR, Fermi and H.E.S.S., 2013, [arXiv:1303.5443]
8. Rachen J.P. Ultra-high energy cosmic rays from radio galaxies revisited, 2008, [arXiv:0808.0349].
9. Rieger F., Bosch-Ramon V., Duffy P. Fermi acceleration in astrophysical jets // Ap. and SS. — 2007. — **309**, Is.1–4. — P. 119–125.
10. Rieger F., Aharonian F. Probing the Central Black Hole in M87 with Gamma-Rays // Modern Physics Letters A. — 2012. — **27**, Is.28. — id.1230030.
11. Rieger F., Duffy P. Shear Acceleration in Relativistic Astrophysical Jets // ApJ. — 2004. — **617**, Is.1. — P. 155–161.
12. Sydorenko M.V., Marchenko V.V., Sushchov O.B., Kobzar O.O. Stochastic scattering in Cen A radio lobes // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2013.
13. Сидоренко М., Гнатик Б., Марченко В. Стохастичне прискорення космічних променів в області гальмування релятивістських струменів в блазарах // Вісник Астрономічної Школи. — 2011. — **7**, № 1–2. — С. 108–113.
14. Сидоренко М., Марченко В. Чисельне моделювання процесу прискорення заряджених частинок в турбулентній замагніченій плазмі // Вісник Астрономічної Школи. — 2012. — **8**, № 1–2. — С. 153–159.

Надійшла до редакції 16.09.2013