

## დედამიწის მაგნიტოსფეროს გარდამავალ ფენაში ტურბულენტობის მულტიფრაქტალური ანალიზი

დურჭუმელია ა.

მ. ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი, თსუ  
ე. ხარაძის სახელობის ეროვნული ასტროფიზიკური ობსერვატორია

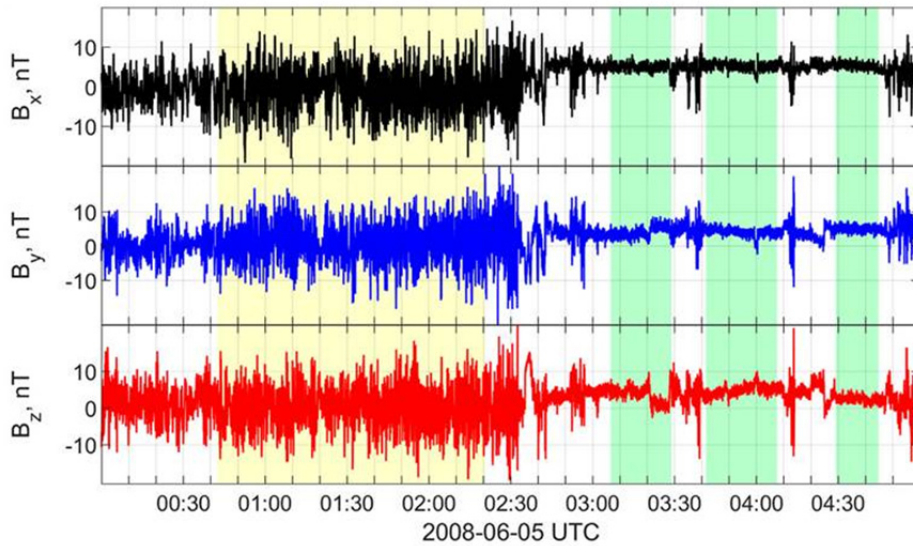
*ანოტაცია:* ნაშრომში გაანალიზებულია მაგნიტურ ველზე დაკვირვებები დედამიწის მაგნიტოსფეროს გარდამავალ ფენაში. შედარებულია მასთან მზის ქარის დაჯახების ორი კონფიგურაცია: ერთ შემთხვევაში მზის ქარის ნორმალური ველის კვაზიპარალელურია, ხოლო მეორე შემთხვევაში კვაზიპერპენდიკულარული. მულტიფრაქტალური სპექტრების შედარებით გაირკვა, რომ კვაზიპარალელურ კონფიგურაციაში ტურბულენტობა უფრო მულტიფრაქტალურია.

*საკვანძო სიტყვები:* მაგნიტოსფერო, ტურბულენტობა, მულტიფრაქტალი

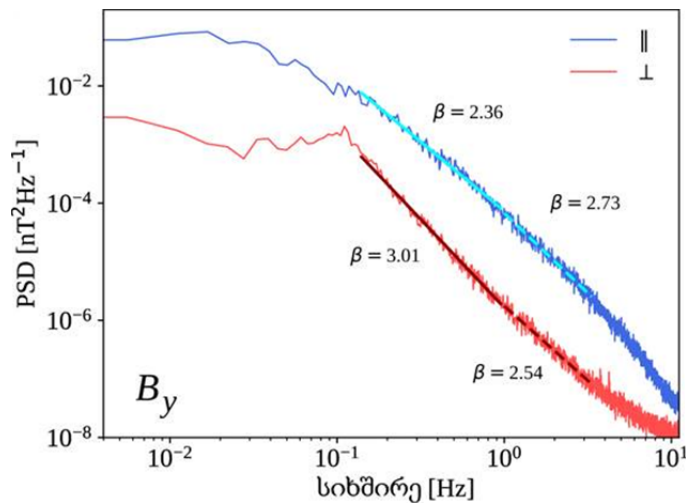
ცნობილია, რომ მაგნიტოსფერო იცავს დედამიწას მზიდან და კოსმოსიდან მომავალი დამუხტული ნაწილაკებისაგან. მზის ქარში, რომელიც ძირითადად პროტონებისა და ელექტრონებისგან შედგება, ძლიერდება ტურბულენტური პროცესები მაგნიტოგარსთან (მაგნიტოსფეროს გარდამავალ ფენასთან) დაჯახებისას. რადგანაც ამ პლაზმაზე დისტანციურად დაკვირვება შეუძლებელია, მის *in situ* პირობებში შესასწავლად 2000 წელს, NASA-სთან კოლაბორაციაში, ESA-ს მიერ იქნა ორბიტაზე გაშვებული ოთხი თანამგზავრი, მისიის სახელწოდებით Cluster II. წინამდებარე ნაშრომში გაანალიზებულია ამ თანამგზავრებზე, 2008 წლის 5 ივნისში, გაზომილი მაგნიტური ველის დროზე დამოკიდებულება 5 საათიან ინტერვალში [1], (იხ. სურ. 1).

მზის ქარის მაგნიტოგარსთან დაჯახება ხდება ორი თვისობრივად განსხვავებულ კვაზიპარალელურ და კვაზიპერპენდიკულარულ კონფიგურაციებში. კვაზიპარალელურ შემთხვევაში მზის ქარის დარტყმითი ტალღის ნორმალური  $\theta < 45^\circ$  კუთხით განსხვავდება დედამიწის მაგნიტური ველის მიმართულებისაგან, ხოლო კვაზიპერპენდიკულარულ შემთხვევაში  $\theta > 45^\circ$  კუთხით. კვაზიპარალელურ უბანში ტურბულენტობა ხასიათდება უფრო დიდი ფლუქტუაციებით, წყვეტებით და ძლიერი დინებებით, კვაზიპერპენდიკულარულ უბანში კი დაბალსიხშირული პიკით მაგნიტურ ველსა და იონურ სიმკვრივეში.

მულტიფრაქტალური ანალიზი წარმატებული მეთოდია ტურბულენტობის დასახასიათებლად [1,2,3], ისევე როგორც ბევრი სხვა რთული სისტემის დასახასიათებლად, მაგალითად სეისმური პროცესების [4]. ჰომოგენური თვითმსგავსი ფრაქტალური ველებისაგან განსხვავებით, რომლებიც ხასიათდება ერთი სინგულარობის მაჩვენებლით ყველა მასშტაბზე, ტურბულენტური ველების დასახასიათებლად საჭიროა სინგულარობის მაჩვენებელთა ფართო განაწილება, რათა სწორად აღიწეროს ენერჯის კასკადის შენაცვლებითობით გამოწვეული არაერთგვაროვნებები. ამ ნაშრომში შედარებულია კვაზიპარალელური და კვაზიპერპენდიკულარული უბნების მულტიფრაქტალური მახასიათებლები და სიმძლავრის სპექტრების ხარისხობრივი კანონები (ამ უკანასკნელისთვის იხ. სურ. 2).



სურ. 1. მაგნიტური ველის მდგენელები. ნაშრომში მონაცემები გაანალიზებულია მონიშნულ უბნებზე: კვაზიპარალელური (ყვითელი), კვაზიპერპენდიკულარული (მწვანე).



სურ. 2. სიმძლავრის სპექტრის ხარისხობრივი კანონები კვაზიპარალელურ და კვაზიპერპენდიკულარულ უბნებში. ფიტირებულია დიდ (0.14 – 0.95 ჰერცი) და მცირე (1 – 3.333 ჰერცი) მასშტაბებზე.

სინგულარობის მაჩვენებლების ცვალებადობის გაზომვის ერთერთი მეთოდი არის სინგულარობის სპექტრის გამოთვლა. რაც უფრო ფართოა რთული სიგნალის სინგულარობის სპექტრი მით უფრო მულტიფრაქტალურია ის და ნაკლებად ეფექტურია მისი დახასიათება ერთი სინგულარობის მაჩვენებლით. ამიტომ ამ სპექტრის სიგანით შეიძლება რაოდენობრივად შეფასდეს ენერჯის გადაცემის არხების მრავალნაირობა, სადაც მეტი მრავალნაირობა შეესაბამება უფრო მაღალი შენაცვლებითობის ტურბულენტობას.

მულტიფრაქტალურ სპექტრს ვითვლით  $B$  მაგნიტური ველის აბსოლუტური მნიშვნელობის ან ერთ-ერთი მდგენელის ანათვლების  $|\Delta B_i| = |B(t_{i+k}) - B(t_i)|$  დროითი სხვაობებისთვის, სადაც  $\Delta t_k = t_{i+k} - t_i \approx 0.18$  წამია. ჯერ ხდება მიმდევრობის დაყოფა არათანამკვეთ,  $N$  სიგრძის ქვემიმდევრობებად, რათა შემდეგ ეტაპზე მოხდეს სტატისტიკური დამუშავება ცდომილებების შესაფასებლად.  $N$ -ის შერჩევა ხდება ისე, რომ მას ჰქონდეს ბევრი გამყოფი. თითოეული

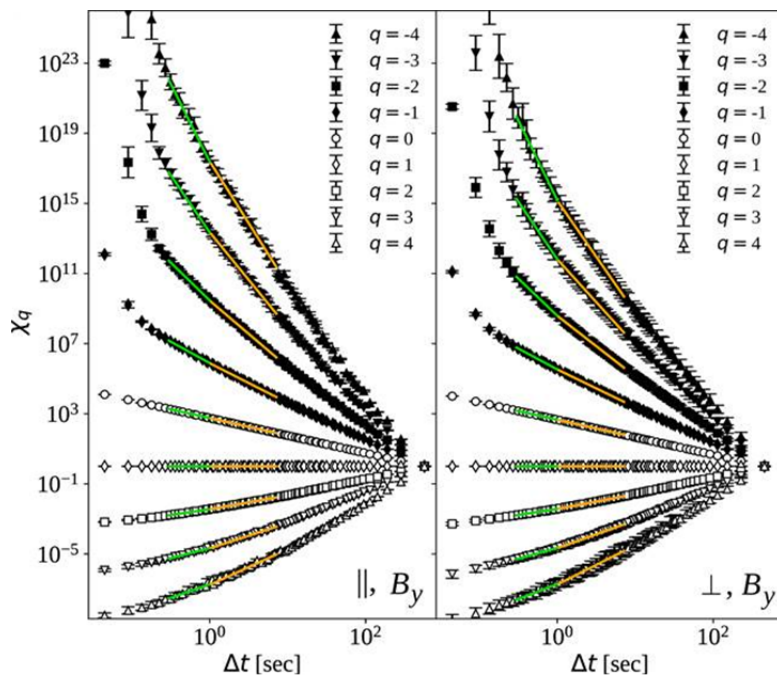
მიმდევრობისთვის და  $N$  -ის გამყოფი  $s_n$  მთელი დადებითი რიცხვისთვის გამოითვლება ე.წ. მსხვილმარცვლოვანი ალბათობის ზომა

$$\mu_j(s_n, \Delta t_j) = \frac{\sum_{i=j s_n}^{(j+1)s_n} |\Delta B_i|}{N-1} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |\Delta B_i|}{\sum_{i=0}^{N-1} |\Delta B_i|} \quad (1)$$

ამ ალბათობის ზომის გამოყენებით ხდება განაწილების ფუნქციის შეფასება, როგორც:

$$\chi_q(\Delta t) = \sum_{j=0}^{N/s_n-1} (\mu_j(\Delta t))^q \Delta t \quad (2)$$

მისი ცდომილებები დაითვლება ზემოთ დაყოფილი ქვემიმდევრობების გამოყენებით. განაწილების ფუნქცია სხვადასხვა  $q$  მაჩვენებლისთვის აძლიერებს ალბათობის ზომის სხვადასხვა მასშტაბირების თვისებებს, რითაც ის ახდენს ველის ზოგადი მასშტაბირების სირთულის გამოვლენას. შემდეგ ხდება განაწილების ფუნქციაზე ხარისხობრივი  $\chi_q(\Delta t) \propto \Delta t^{T_q}$  კანონის ფიტირება (იხ. სურ. 3), საიდანაც  $T_q$  მაჩვენებელი წარმოადგენს მულტიფრაქტალობის რაოდენობრივ მახასიათებელს. ჩვეულებრივი (მონო)ფრაქტალისთვის  $T_q$  მაჩვენებელი იქნება წრფივი ფუნქცია  $q$  -ს მიმართ, წრფივობიდან გადახრა კი არის მულტიფრაქტალობის შედეგი.



სურ. 3. კვაზიპარალელურ და კვაზიპერპენდიკულარულ უბნებში მაგნიტური ველის  $\mathcal{Y}$  მდგენელისთვის განაწილების ფუნქციებზე დაფიტირებული ხარისხობრივი კანონები, დიდ (ნარინჯისფერი) და მცირე (მწვანე) მასშტაბებზე, რაც შეესაბამება (სურ. 2)-ის მასშტაბებს.

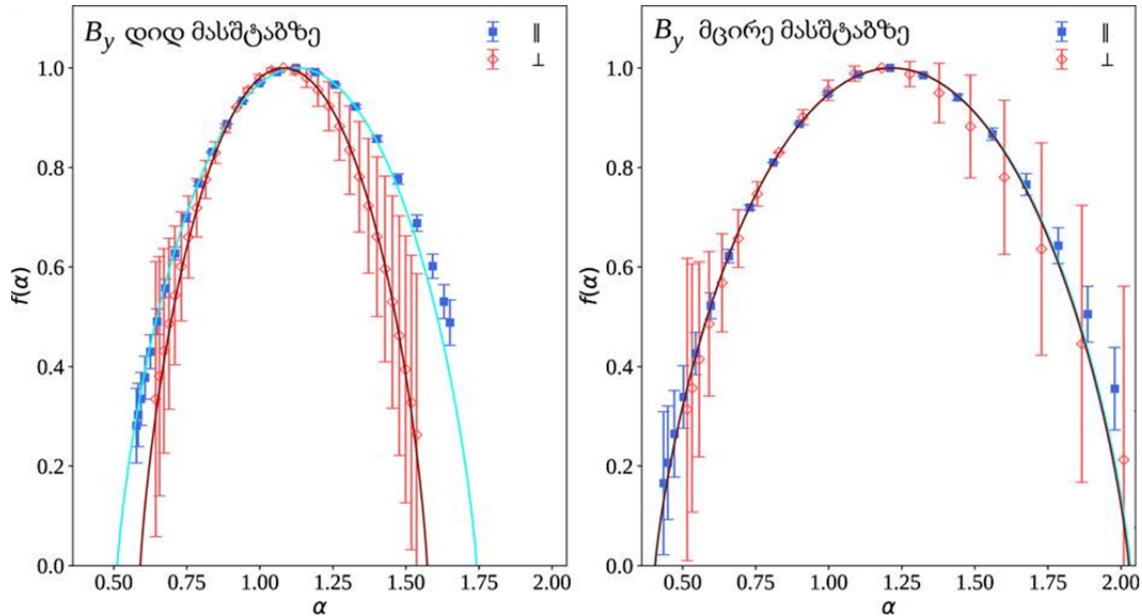
საბოლოოდ  $T_q$  მაჩვენებლიდან მიიღება მულტიფრაქტალური სპექტრი  $f(a)$  ლეჟანდრის გარდაქმნის გამოყენებით:

$$\alpha_q = \frac{dr_q}{dq}, \quad (3)$$

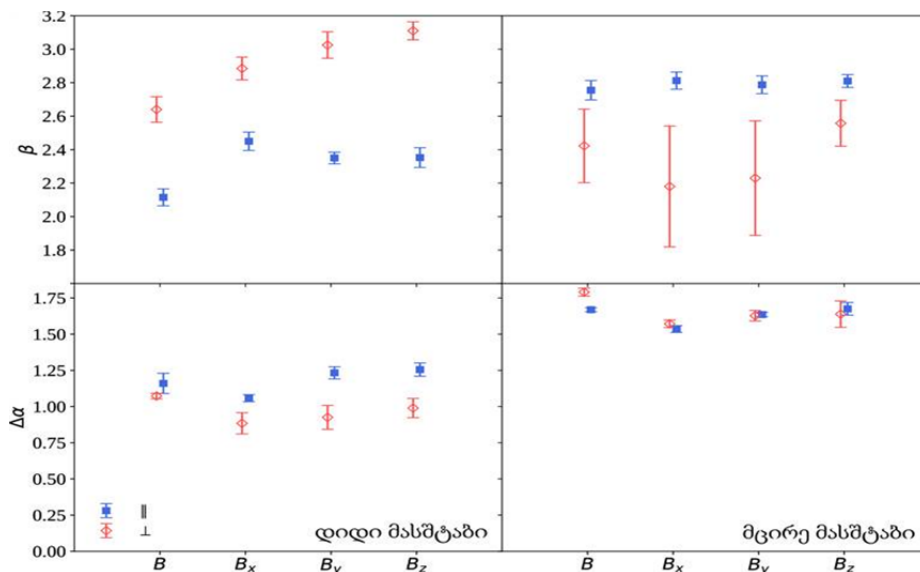
$$f(\alpha_q) = q\alpha_q - r_q. \quad (4)$$

ამ სპექტრის  $\Delta\alpha$  სიგანით შეიძლება მულტიფრაქტალობის რიცხვითი შეფასება (იხ. სურ. 4).

გამოთვლის შედეგები შეჯამებულია (სურ. 5)-ზე. დიდ მასშტაბებზე (1.053 – 7.143 წამი) გამოკვეთილია მკაფიო განსხვავება კვაზიპარალელური და კვაზიპერპენდიკულარული კონფიგურაციების მულტიფრაქტალობას შორის. კერძოდ, კვაზიპარალელურ კონფიგურაციას გააჩნია უფრო ფართო მულტიფრაქტალური სპექტრი. ეს მოსალოდნელი შედეგია, რადგან ასეთ კონფიგურაციაში უფრო მაღალი შენაცვლებითობით ხასიათდება ტურბულენტობა.



სურ. 4. დიდ მასშტაბიანი უბნისთვის ჩანს მკაფიო განსხვავება მულტიფრაქტალურ სპექტრებს შორის. კვაზიპარალელური შემთხვევის სპექტრი უფრო ფართოა ვიდრე კვაზიპერპენდიკულარულის.



სურ. 5. ხარისხობრივი კანონები (ზედა გრაფიკები). მულტიფრაქტალური სპექტრის სიგანე (ქვედა გრაფიკები). ცდომილებები დათვლილია Cluster II თანამგზავრებზე გასაშვალეობით.

მადლიერება. ამოცანის დასმის და კონსულტაციისთვის მადლობას ვუხდით პროფესორებს ლ. სორისო-ვალვოს და ო. ხარშილადეს.

#### ლიტერატურა

1. Gurchumelia, A., Sorriso-Valvo, L., Burgess, D., Yordanova, E., Elbakidze, K., Kharshiladze, O., Kvaratskhelia, D. Comparing Quasi-Parallel and Quasi-Perpendicular Configuration in the Terrestrial Magnetosheath: Multifractal Analysis. *Frontiers in Physics*, 2022, 506.
2. Sreenivasan, K. Fractals and multifractals in fluid turbulence//*Annual review of fluid mechanics*, 1991. 23(1), pp. 539-604.
3. Paladin G., Vulpiani A. Anomalous scaling laws in multifractal objects//*Physics Reports*, 1987, 156(4), pp. 147-225.
4. Chelidze, T., Matcharashvili, T. Complexity of seismic process; measuring and applications//*A review. Tectonophysics*, 2007, 431(1-4), pp. 49-60.

## MULTIFRACTAL ANALYSIS OF TURBULANCE IN EARTH'S MAGNETOSHEATH

**Gurchumelia A.**

*M. Nodia Institute of Geophysics, TSU, Tbilisi, Georgia  
E. Kharadze Georgian National Astrophysical Observatory, Tbilisi, Georgia*

**Abstract:** *Magnetic field measurements in Earth's magnetosheath are analyzed in this work. Two configurations of its interaction with solar wind are compared: in one case bow shock normal is quasiparallel to the magnetic field, and in another it's quasiperpendicular. Comparing their multifractal spectra showed that turbulence is more multifractal than in quasiparallel case.*

**Keywords:** *magnetosphere, turbulence, multifractal*

**Acknowledgement:** I thank professors L. Sorriso-Valvo and O. Kharshiladze for consultations and helping with problem formulation.