

Nieliniowe układy dynamiczne

Multifraktalny wiatr słoneczny



Prof. dr hab. Wiesław Macek jest specjalistą w zakresie fizyki kosmicznej, dynamiki nieliniowej i analizy fraktalnej. Brał udział w misji kosmicznej NASA w czasie spotkania Voyagera z Neptunem w 1989 r. W Centrum Badań Kosmicznych PAN zajmuje się nieliniową analizą danych pomiarowych uzyskanych z pokładów sond kosmicznych

WIESŁAW MACEK
Centrum Badań Kosmicznych
Polskiej Akademii Nauk, Warszawa
macek@cbk.waw.pl

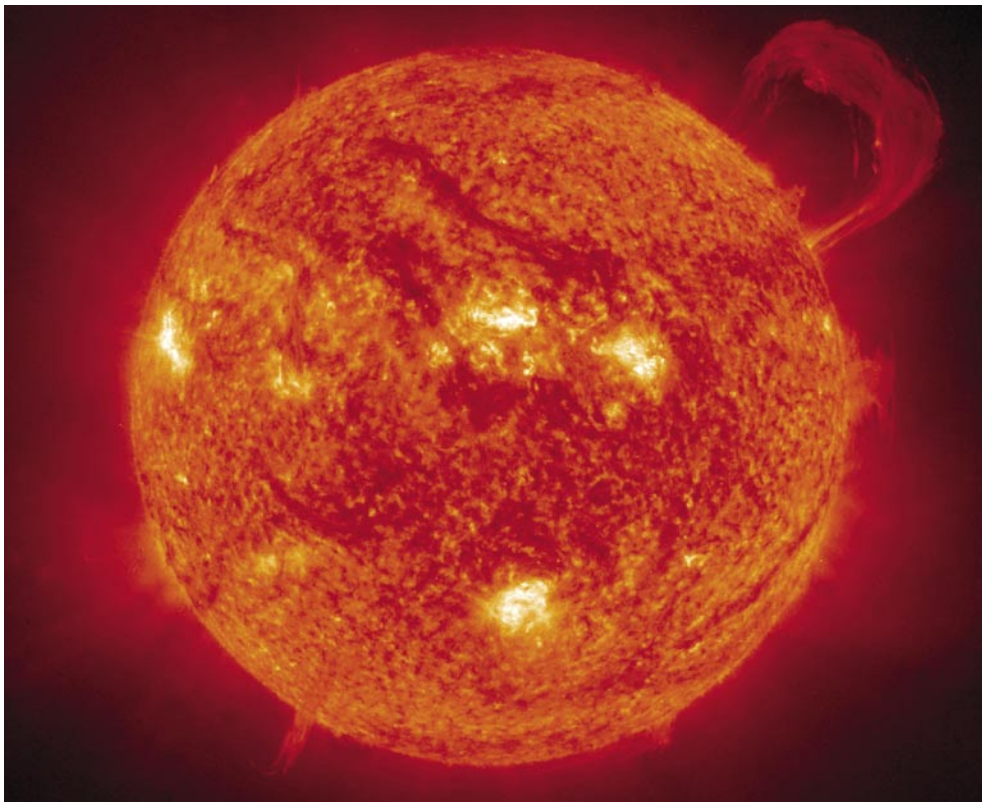
W skomplikowanej dynamice fluktuacji parametrów plazmowych wiatru słonecznego można odczytać pewien ukryty porządek opisywany przez chaotyczny dziwny atraktor, wykazujący strukturę multifraktalną

Podstawowe pojęcia analizy fraktalnej i dynamiki *nieliniowej* pojawiają się w różnych kontekstach, i nie zawsze są jednoznacznie rozumiane. Można powiedzieć, że *fraktal* jest nieregularnym obiektem geometrycznym, podzielnym na części, z których każda (przynajmniej w przybliżeniu) jest pomniejszoną kopią całości, czyli wykazuje samopodobień-

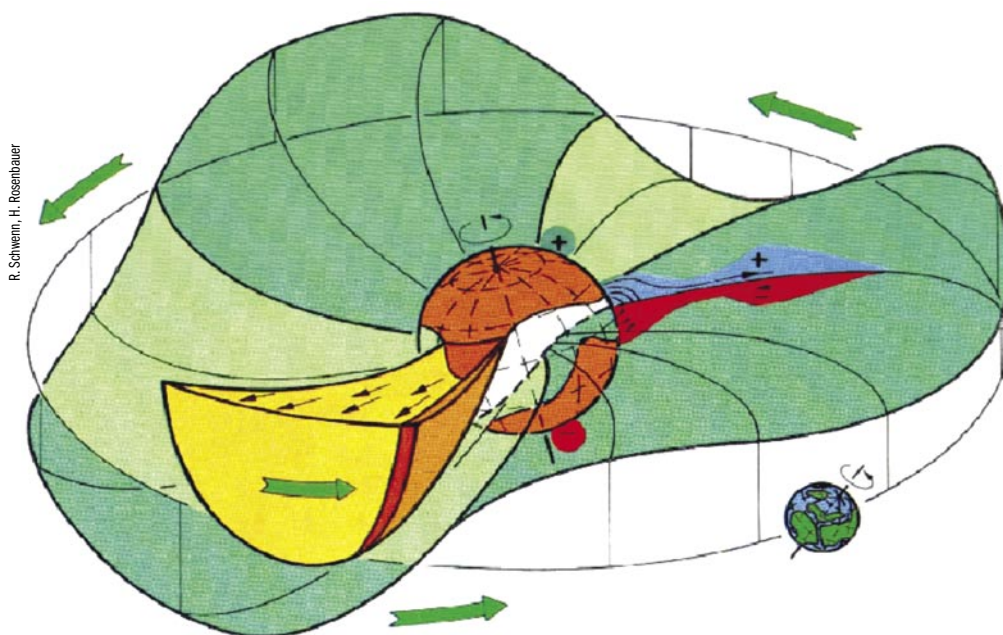
stwo dla dowolnych skal określone przez jakiś wymiar fraktalny. Natomiast *multifraktal* jest obiektem, który w różnych swoich częściach (skalach) ma różne samopodobieństwa, określone przez pewną funkcję, zwaną multifraktalnym widmem wymiarów. Multifraktal jest więc w pewnym sensie jakby zbiorem poprzepłatanych ze sobą fraktali. Co ciekawe, widmo to wykazuje pewne właściwości uniwersalne.

Nieliniowe układy dynamiczne są często bardzo wrażliwe na warunki początkowe, co prowadzi do ruchu chaotycznego. Nie można więc w praktyce przewidzieć zachowania się tego układu w dłuższym okresie, mimo iż prawa dynamiki określają jego ewolucję jednoznacznie. *Chaos* oznacza więc *nie-okresowe*, długoterminowe zachowanie układu deterministycznego wykazującego dużą wrażliwość na warunki początkowe. Jednakże sytuacja nie jest całkiem beznadziejna, gdyż dla układu dysypatywnego (z tarciem), trajektorie opi-

Słońce jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego w dziedzinie widzialnej, a także w obszarze radiowym, podczerwieni, nadfioletu, promieni X i gamma. Emituje też promieniowanie składające się z cząstek naładowanych, głównie protonów i elektronów o dużej energii, umożliwiającej im pokonanie przyciągania grawitacyjnego



SND



R. Schwenn, H. Rosenbauer

Schematyczny model „baleriny” dla wiatru słonecznego. W obszarze heliosfery bliskim Słońca strumień wiatru słonecznego dzieli się na wolne ($\approx 400 \text{ km s}^{-1}$) i szybkie ($\approx 700 \text{ km s}^{-1}$). Dwie półkule Słońca są oddzielone warstwą neutralną w kształcie przypominającym suknię baleriny. Ten szybki wiatr, związany z dziurami w koronie słonecznej, jest stosunkowo jednorodny i stabilny, podczas gdy prędkość wiatru wolniejszego jest zmienna

sujące jego ewolucję w przestrzeni stanów zbliżają się asymptotycznie do pewnego, niezmienniczego zbioru, który nazywamy *atraktorem*; dziwne atraktory są zbiorami fraktalnymi (na ogół o wymiarze ułamkowym) przejawiającymi ukryty w chaosie porządek.

Wiatr słoneczny

Oprócz promieniowania elektromagnetycznego Słońce wysyła też strumień cząstek naładowanych – głównie protonów i elektronów o dużej energii, wypływające nieustannie z górnych warstw atmosfery słonecznej w przestrzeń międzygwiazdową. To ciekawe zjawisko kosmiczne nazwano wiatrem słonecznym. Rolę ośrodka gazowego atmosfery pełni tu jednak zjonizowany gaz międzyplanetarny, czyli plazma z „wmrożonym” w nią polem magnetycznym, które sprawia, że ten układ fizyczny jest dużo bardziej skomplikowany niż zwykłe powietrze.

Naddźwiękowe strumienie wiatru słonecznego, płynące od Słońca, wypełniają cały nasz system planetarny. Ten obszar przestrzeni kosmicznej nazywamy heliosferą. Jest to ośrodek tak rozrzedzony, że zderzenia między cząstkami nie odgrywają prawie żadnej roli. Natomiast elektromagnetyczne oddziaływanie wiatru słonecznego z polami magnetycznymi planet jest przyczyną powstawania magnetosfer – obszarów w przestrzeni kosmicznej, w których dominującą rolę odgrywają planetarne pola magnetyczne.

Natura fluktuacji parametrów plazmy wiatru słonecznego jest wciąż bardzo mało znana. Prawdopodobnie wolne strumienie wiatru słonecznego powstają dzięki pewnym procesom *nieliniowym* w koronie słonecznej.

Okazuje się jednak, że w nieregularnych zmianach wiatru słonecznego można odczytać pewien ukryty porządek: jego fluktuacje mogą być opisane za pomocą nowych metod nieliniowej analizy szeregów czasowych, opartych na analizie fraktalnej i teorii chaosu deterministycznego. Mamy wciąż nadzieję, że dzięki takiemu opisowi można będzie w pewnym stopniu przewidzieć zachowanie wiatru słonecznego mającego ważny wpływ na zjawiska zachodzące w magnetosferze, a nawet na powierzchni Ziemi.

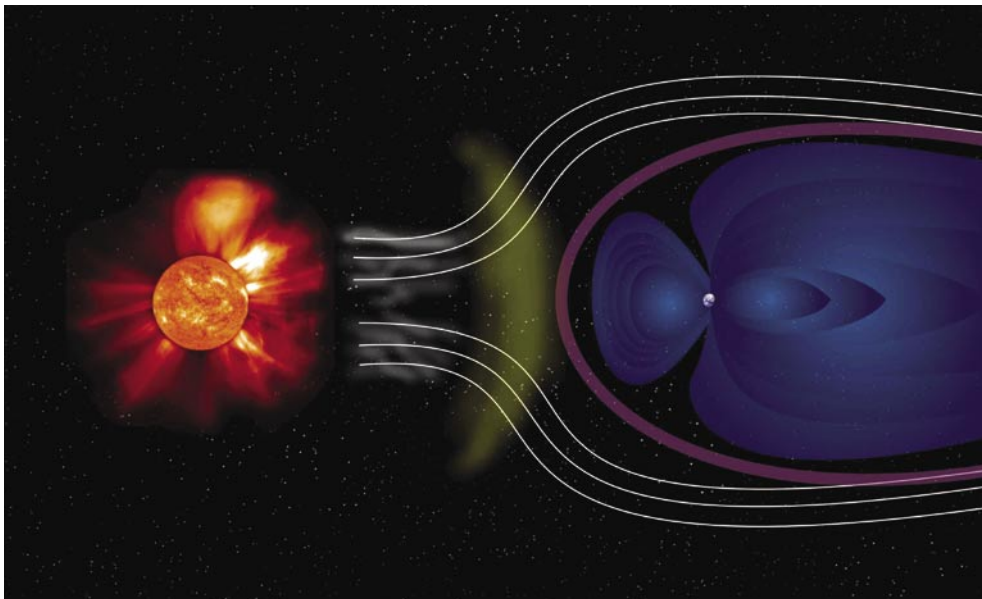
Dziwny atraktor w wietrze słonecznym

Idea ruchu chaotycznego na dziwnym atraktorze została zastosowana przeze mnie i moich współpracowników do analizy plazmy wiatru słonecznego. Nasze badania skupiają się na analizie szeregów czasowych wiatru słonecznego, mierzonych przez sondę kosmiczną Helios zanurzoną w wewnętrznej heliosferze – obszarze przestrzeni kosmicznej zdominowanym przez wiatr słoneczny. Analizując fluktuacje prędkości strumienia wiatru słonecznego ustaliliśmy, że rozkłady prawdopodobieństwa parametrów wiatru słonecznego odbiegają znacznie od normalnego rozkładu równowagowego. Ponadto w widmie fluktuacji nie można na ogół wyróżnić żadnej dominującej częstotliwości. Wskazuje to na *nie-okresowe* zachowanie się tego złożonego układu.

Wyniki uzyskane przez nas nową metodą topologicznych zanurzeń sugerują, że zachowanie wiatru słonecznego może być w przybliżeniu opisane przez niskowymiarowy *atraktor* w pewnej podprzestrzeni stanów. Ostatnio zwracamy szczególną uwagę

Nieliniowe układy dynamiczne

Żywimy nadzieję, że nasza analiza pozwoli choć w pewnym stopniu przewidzieć zachowanie się wiatru słonecznego, który wywiera istotny wpływ na zjawiska zachodzące w otoczeniu Ziemi, a nawet na jej powierzchni



ESA

na zagadnienie *multifraktalności* i związane z nią zjawisko *intermitencji* (sygnał przerywany). Umożliwiają one badanie natury turbulentnego wiatru słonecznego metodami fizyki nieliniowej. Podstawą naszej analizy są zarówno dane pomiarowe uzyskane za pomocą sond kosmicznych Helios, jak i modelowanie analogicznych układów fizycznych. Wyniki naszych prac pokazują, że pewne części atraktora w przestrzeni stanów dla wiatru słonecznego są odwiedzane przez trajektorie układu znacznie częściej niż inne jego części. Zaproponowaliśmy też nowy, prosty model analityczny opisujący multifraktalną strukturę tego złożonego ośrodka plazmowego.

Wnioski

Najważniejszym wynikiem analizy obserwowanych parametrów plazmowych wiatru słonecznego w bliskiej heliosferze jest identyfikacja jego struktury fraktalnej oraz multifraktalny model fluktuacji wiatru słonecznego, który ma istotne znaczenie dla badania zachodzącej w nim turbulencji. Najwyraźniej fluktuacje prędkości wiatru nie mają tylko charakteru losowego, a *nieliniowa* dynamika tych fluktuacji ma raczej charakter deterministyczny, i może być opisana za pomocą małej liczby parametrów – prawdopodobnie przez dziwny atraktor, który ma strukturę multifraktalną.

Potwierdzenie naszych wyników wymaga jeszcze dalszych badań, jeśli bowiem taki atraktor rzeczywiście istnieje, to w skomplikowanej dynamice wiatru słonecznego

można odczytać pewien ukryty porządek. Mamy też nadzieję na uzyskanie informacji o tych złożonych zjawiskach nieliniowych z samych tylko geometrycznych właściwości atraktora, bez potrzeby rozwiązywania skomplikowanych równań. Warto dodać, że taki atraktor jest niezwykle istotny, gdyż daje możliwość przybliżonego przewidywania stanu wiatru słonecznego – głównego czynnika kontrolującego magnetosfery planetarne (w tym magnetosferę Ziemi) w naszym Układzie Słonecznym. Uzyskane dla plazmy kosmicznej wyniki mogą być też istotne dla teorii turbulencji, również pod kątem zastosowania dla analogicznych obiektów fizycznych, np. dla turbulencji w płynach obserwowanej w laboratorium, czy też w ośrodkach geofizycznych (np. w atmosferze, czy w plazmie w jonosferze Ziemi). Analiza układów chaotycznych może nas więc doprowadzić do ich głębszego zrozumienia, a może nawet – przewidzenia ich pozornie nieprzewidywalnego zachowania. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

- Stewart I. (1994). *Czy Bóg gra w kości? Nowa matematyka chaosu*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Macek W. M., (1998). Testing for an attractor in the solar wind flow. *Physica D* 122, 254-264.
- Macek W. M., Redaelli S. (2000). Estimation of the entropy of the solar wind flow. *Physical Review E* 62, 6496-6504.
- Macek W. M., Bruno R., Consolini G, (2005). Generalized dimensions for fluctuations in the solar wind, *Physical Review E* 72, 017202.