



Warszawa, 27 września 2024

Od gałęzi do pętli. Fizyka sieci transportowych w przyrodzie

Międzynarodowy zespół naukowców z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Laboratoire Matière et Systèmes Complexes oraz Institut des Sciences de la Terre d'Orléans opisał, jak w sieciach transportowych występujących w przyrodzie pojawiają się pętle, ważne z punktu widzenia stabilności takich sieci. Badacze zauważyli, że gdy jedna z gałęzi sieci dociera do granic układu, interakcje pomiędzy gałęziami drastycznie się zmieniają. Wcześniej odpychające się gałęzie, zaczynają się przyciągać, co prowadzi do nagłego formowania się pętli. Wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie „Proceedings of the National Academy of Sciences”. Opisany proces pojawia się w zaskakująco dużej liczbie układów – od sieci wyładowań elektrycznych, przez niestabilności w mechanice płynów, po biologiczne sieci transportowe takie jak sieć kanałów w meduzie Aurelia aurita (chętli modrej).

W przyrodzie można znaleźć wiele przykładów sieci transportowych, od sieci naczyń krwionośnych w naszych ciałach po wyładowania elektryczne w trakcie burzy. – Takie sieci przyjmują różne kształty – tłumaczy Stanisław Żukowski, doktorant z Uniwersytetu Warszawskiego i Université Paris Cité, główny autor publikacji. – Mogą one mieć geometrię drzewiastą, w której części sieci podczas wzrostu się jedynie rozgałęziają i odpychają od siebie. W innych przypadkach, gdy gałęzie podczas wzrostu przyciągają się do siebie i łączą ponownie, mamy do czynienia ze strukturami zapętłonymi – dodaje. Sieci z wieloma pętlami są szeroko rozpowszechnione w żywych organizmach, gdzie służą do aktywnego transportu tlenu lub składników odżywczych i odprowadzania produktów przemiany materii. Istotnym walorem sieci zapętłonych jest ich mniejsza podatność na uszkodzenia – w sieciach bez pętli zniszczenie jednej gałęzi może odciąć wszystkie gałęzie do niej podłączone, podczas gdy w sieciach z pętlami zawsze istnieją inne połączenia z resztą układu. Niedawno, naukowcy z Wydziału Fizyki UW opisali mechanizm odpowiedzialny za stabilność już istniejących pętli*. Dynamiczny proces prowadzący do ich powstawania pozostał jednak nie w pełni wyjaśniony.

Jak powstają pętle?

Wiele sieci transportowych wzrasta w odpowiedzi na pole dyfuzyjne, takie jak stężenie substancji, ciśnienie w układzie lub potencjał elektryczny. Strumienie takiego pola są znacznie łatwiej transportowane przez gałęzie sieci niż przez otaczający ośrodek. Wpływa to na rozkład pola w przestrzeni – piorunochrony przyciągają wyładowania elektryczne właśnie dlatego, że mają mniejszy opór niż powietrze wokół. Duża różnica oporów w sieci i ośrodku prowadzi do rywalizacji i odpychania pomiędzy gałęziami.

Jednak przyciąganie się gałęzi we wzrastających sieciach, prowadzące do powstawania pętli, pozostawało długo nieopisane. Pierwszą próbę zrozumienia powstawania pętli w takich układach podjęła kilka lat temu grupa prof. Piotra Szymczaka z Wydziału Fizyki UW. – Pokazaliśmy, że mała różnica oporu pomiędzy siecią a ośrodkiem może prowadzić do

przyciągania między rosnącymi gałęziami i powstawania pętli – mówi Piotr Szymczak. Praca doprowadziła do wspólnego projektu, w postaci łączonego doktoratu Stanisława Żukowskiego, realizowanego w grupie Piotra Szymczaka oraz grupie Annemiek Cornelissen, badaczki z Laboratoire Matière et Systèmes Complexes. – W naszym laboratorium badamy morfogenezę sieci układu pokarmowego meduz. To piękny przykład sieci transportowej z wieloma pętlami – mówi Annemiek Cornelissen. – Gdy kilka lat temu zobaczyłem prezentację Annemiek na konferencji w Cambridge od razu pomyślałem, że nasze modele mogą mieć zastosowanie do opisu wzrostu kanałów w meduzie – dodaje Piotr Szymczak.

Przez żołądek do pętli

– Powstawanie pętli, gdy jedna z gałęzi dotrze do granic układu – zjawisko, które opisujemy w naszej najnowszej publikacji – rzeczywiście zauważyliśmy po raz pierwszy w sieci kanałów układu pokarmowego meduzy – opowiada Stanisław Żukowski. – Analizując rozwój tych kanałów w czasie dostrzegłem, że gdy jeden z nich podłącza się do żołądka meduzy (granicy układu) to krótsze kanały natychmiast są przyciągane do dłuższego sąsiada i tworzą pętle.

To samo zjawisko naukowcy zaobserwowali w eksperymentach rozpuszczania gipsowych szczelin, przeprowadzonych na Uniwersytecie Warszawskim przez Floriana Osselina, w tzw. eksperymencie Saffmana-Taylora, w którym granica pomiędzy dwoma płynami jest niestabilna i przeistacza się w palczaste wzory, a także napotkali w literaturze na temat wyładowań elektrycznych. – Bogactwo systemów, w których odkryliśmy bardzo podobną dynamikę, utwierdziło nas w przekonaniu, że musi być proste, fizyczne wyjaśnienie tego zjawiska – mówi Annemiek Cornelissen.

W swojej publikacji naukowcy przedstawili model, który opisuje oddziaływania pomiędzy gałęziami. Skupili się na tym, jak te oddziaływania zmieniają się, gdy jedna z gałęzi zbliża się do granicy układu i dochodzi do przebiccia. – Zanika wtedy rywalizacja i odpychanie pomiędzy gałęziami, a pojawia się przyciąganie – wyjaśnia Stéphane Douady. – To nieuchronnie prowadzi do powstawania pętli.

Pętle w pobliżu przebiccia

– Nasz model przewiduje, że przyciąganie się pomiędzy sąsiadującymi gałęziami po przebicciu pojawia się niezależnie od geometrii sieci czy różnicy oporu pomiędzy siecią a otaczającym ośrodkiem – mówi Piotr Szymczak. – W szczególności pokazaliśmy, że pętle w pobliżu przebiccia mogą tworzyć się w układach o bardzo dużej różnicy oporów, co wcześniej uważano za niemożliwe. To wyjaśnia, dlaczego to zjawisko jest tak rozpowszechnione w układach fizycznych i biologicznych.

– W przypadkach, w których mechanizmy wzrostu nie zostały jeszcze wyjaśnione, zaobserwowanie opisanego przez nas zjawiska będzie silnym sygnałem, że dynamika układu jest kontrolowana przez strumienie dyfuzyjne – dodaje Stanisław Żukowski. – Jesteśmy niezmiernie ciekawi, w jakich innych układach zaobserwujemy tworzenie się pętli po przebicciu.

* Radost Waszkiewicz, John Burnham Shaw, Maciej Lisicki, and Piotr Szymczak Goldilocks Fluctuations: Dynamic Constraints on Loop Formation in Scale-Free Transport Networks Phys. Rev. Lett. 132, 137401 – (2024)
DOI:10.1103/PhysRevLett.132.137401

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych Fizyki oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 250 nauczycieli akademickich. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ponad 1100 studentów i ok. 170 doktorantów. Uniwersytet Warszawski w rankingu szanghajskim dla poszczególnych dziedzin (Shanghai's Global Ranking of Academic Subjects) znajduje się wśród 150 najlepszych na świecie jednostek, kształcących w dziedzinie fizyki.

PUBLIKACJA NAUKOWA:

Stanisław Żukowski, Annemiek Johanna Maria Cornelissen, Florian Osselin, Stéphane Douady, Piotr Szymczak, Breakthrough-induced loop formation in evolving transport networks
Proceedings of the National Academy of Sciences, July 2024, DOI: 10.1073/pnas.2401200121

KONTAKT:

mgr Stanisław Żukowski
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
stanislaw.zukowski@fuw.edu.pl
tel. +48 22 55 32 901

Prof. dr hab. Piotr Szymczak
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
piotr.szymczak@fuw.edu.pl
tel. +48 22 55 32 909

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://www.fuw.edu.pl>
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>
Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW240927b_fot01.jpg
https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2024/FUW240927b_fot01.jpg. Powstawanie pętli, gdy jedna z gałęzi dotrze do granic układu – zjawisko, które opisywane jest w najnowszej publikacji, badacze zauważyli po raz pierwszy w sieci kanałów układu pokarmowego meduz. (Źródło: Stanisław Żukowski, Laboratoire Matière et Systèmes Complexés, Université Paris Cité & Wydział Fizyki UW)