

Application of the Experimental and Theoretical Methods of Statistical Physics

Gergely Attila

25 septembrie 2025

Rezumat

Obiectivele și domeniul cercetării

Această teză de doctorat aplică metodele experimentale și teoretice ale fizicii statistice pentru investigarea a trei fenomene naturale distincte: dinamica oscilantă și comportamentul colectiv în fluxuri determinate de flotabilitate, tipare statistice în fenomenele seismice și dinamica fluxului de CO_2 într-un sistem natural de mofetă. Cercetarea demonstrează cum abordările fizicii statistice pot identifica tipare fundamentale în diverse sisteme printr-un cadru metodologic consistent care combină măsurări experimentale, modelare teoretică și simulări computaționale.

Lucrarea abordează întrebări despre mecanismele de oscilație și sincronizare, universalitățile statistice în fenomenele de tip avalanșă și dinamica temporală complexă în sistemele naturale de emisie de gaze. Fiecare investigație utilizează abordarea cu trei componente a fizicii statistice: experimente controlate/colectarea de date din lumea reală, dezvoltarea de modele teoretice și simulări numerice.

Dinamica oscilantă și comportamentul colectiv în fluxuri determinate de flotabilitate

Prima investigație a examinat fenomenele de oscilație și sincronizare în flăcările de lumânări și coloanele de heliu. Studiile experimentale asupra grupurilor de flăcări de lumânări au revelat că frecvența de oscilație scade cu creșterea dimensiunii grupului în aranjamentele circulare compacte și goale, în timp ce aranjamentele liniare nu prezintă o tendință clară. Concentrația de oxigen afectează semnificativ comportamentul oscilant - concentrațiile mai mari pot iniția oscilații în lumânări singure normal stabile sau suprima oscilațiile în grupuri care normal oscilează la nivelurile atmosferice de oxigen.

Pentru grupurile de lumânări care interacționează, experimentele au identificat atât sincronizarea în fază, cât și cea în contra-fază, în funcție de distanța de separare, cu tranziții care apar în jurul separării de 3-4 cm. Modelul teoretic original al lui Kitahata și colab. s-a dovedit inadecvat, deoarece prezice creșteri de frecvență cu dimensiunea grupului, contrar observațiilor experimentale. A fost dezvoltat un model dinamic îmbunătățit care încorporează efectele dimensiunii grupului și concentrației de oxigen, cu un mecanism de cuplaj nou bazat pe mișcările de aer mai degrabă decât pe radiația termică.

Pentru a izola mecanismele hidrodinamice de reacțiile chimice, au fost efectuate experimente paralele pe coloane de heliu folosind vizualizarea Schlieren. Aceste experimente au arătat comportamente remarcabil de similare: frecvența scăzând cu creșterea diametrului duzei și crescând cu rata de flux. Coloanele de heliu care interacționează au prezentat exclusiv sincronizare în contra-fază, susținând ipoteza că instabilitățile hidrodinamice sunt factorii primari ai acestor fenomene.

Simulările de dinamică a fluidelor computațională folosind cadrul FEniCS au furnizat o abordare numerică bidimensională care a reprodus cu succes atât tiparele oscilațiilor individuale, cât și comportamentele de sincronizare colectivă observate în experimente. Simulările au validat că instabilitățile determinate de flotabilitate sunt suficiente pentru a explica observațiile experimentale la diferite scale.

Tipare statistice în fenomenele seismice

A doua investigație a analizat proprietățile statistice ale fenomenelor de avalanșă la diferite scale. A fost introdusă o abordare unificată bazată pe energie pentru analizarea datelor seismice, convertind diferite scale de magnitudine în măsuri de energie standardizate. Aceasta a permis compararea semnificativă între regiunile seismice (Japonia, California de Sud, România) în ciuda mediilor geologice distincte și sistemelor de raportare a magnitudinilor.

Analiza a confirmat că toate cele trei regiuni urmează legea Gutenberg-Richter pe opt ordine de mărime, cu distribuții de energie care se potrivesc funcției de densitate de probabilitate Tsallis-Pareto. Analiza timpilor de recurență a revelat că intervalele între cutremurele consecutive urmează distribuții Gamma cu parametri de formă $\alpha < 1$ pentru toate regiunile, indicând corelații temporale între evenimente.

Investigația s-a extins la emisiile acustice din cristalele metalice comprimate („micro-cutremure”), care au arătat tipare statistice similare cu cutremurele tectonice. Ambele sisteme urmează distribuții de tip lege de putere comparabile pentru eliberarea de energie și prezintă tipare temporale similare, incluzând secvențe de replici care respectă legea lui Omori.

Modelarea computațională folosind modelul unidimensional Burridge-Knopoff cu blocuri și arcuri a reprodus cu succes statisticile distribuției de energie observate atât în

cutremure, cât și în microcutremure, cu exponenți de putere care se potrivesc valorilor experimentale. Totuși, modelul nu a reușit să captureze corelațiile temporale, generând timpuri de recurență Poisson necorelați mai degrabă decât tiparele corelate observate în sistemele fizice.

A fost dezvoltat un model extins Local Growth Global Reset (LGGR) pentru caracterizarea analitică a statisticilor cutremurelor. Inovația cheie a fost introducerea resetărilor parțiale, permițând tranziții către stări de stres mai mici mai degrabă decât doar resetări complete la zero. Prin parametrizarea ratelor de tranziție prin simulări Burrridge-Knopoff, modelul produce o distribuție Pareto tip II care descrie cu acuratețe atât datele reale de cutremure, cât și rezultatele simulărilor.

Dinamica fluxului de CO₂ în sistemele naturale de mofetă

A treia investigație a monitorizat emisiile de CO₂ dintr-o mofetă naturală folosind o matrice de senzori personalizată timp de șapte luni cu rezoluție temporală înaltă (1 Hz). Au fost identificate două regimuri distincte de emisie: comportament oscilant în stare staționară cu fluctuații mici în jurul valorilor medii care variază lent și evenimente intermitente de tip erupție caracterizate prin explozii bruște de concentrație care se propagă prin coloana de măsurare.

Analiza spectrală de putere a revelat vârfuri caracteristice la perioade de 12 ore și 24 de ore corespunzătoare ciclurilor diurne, împreună cu trei domenii distincte de scalare de tip lege de putere. Calculele randamentului de flux au arătat corelații cu parametrii de mediu: corelație negativă cu ratele de schimbare a presiunii și corelație pozitivă cu ratele de schimbare a temperaturii.

A fost dezvoltat un model computațional folosind o abordare de rețea de camere pentru simularea transportului subteran de gaze, încorporând rezistivitatea dependentă de temperatură și fluxul determinat de presiune între camere. Modelul a capturat cu succes variațiile de flux pe termen mediu bazate pe parametrii atmosferici, dar nu a putut reproduce evenimentele de erupție, sugerând mecanisme subterane suplimentare dincolo de influențele atmosferice.

Descoperirile au implicații practice pentru utilizarea terapeutică a mofetelor, deoarece exploziile bruște pot crește semnificativ concentrațiile de CO₂, creând potențial pericole de asfixiere.

Metode și validare

Fiecare investigație a utilizat configurații experimentale personalizate: senzori de radiație termică și camere de viteză mare pentru studiile cu flăcări, vizualizarea Schlieren pentru coloanele de heliu și matrice de senzori multipli pentru monitorizarea mofetelor. Abordările teoretice au inclus modele de sisteme dinamice pentru oscilații, modele stocas-

tice pentru statisticile cutremurelor și modele de transport de fluid pentru fluxul de gaze. Metodele computaționale au variat de la dinamica fluidelor cu elemente finite la simulări cu blocuri și arcuri și modele de rețele de camere.

Validarea a fost realizată prin compararea sistematică între observațiile experimentale, predicțiile teoretice și rezultatele simulărilor. Consistența între aceste abordări diferite a oferit încredere în mecanismele fizice identificate și tiparele statistice.

Concluzii

Această teză demonstrează cum metodele experimentale și teoretice ale fizicii statistice pot revela tipare fundamentale în diverse fenomene naturale. Contribuțiile cheie includ: identificarea instabilităților hidrodinamice ca factori primari ai oscilației și sincronizării în fluxuri determinate de flotabilitate, demonstrarea universalității statistice în fenomenele similare cutremurelor la multiple scale, dezvoltarea de modele teoretice îmbunătățite care încorporează constrângeri fizice realiste și avansarea tehnicilor de monitorizare pentru emisiile naturale de CO_2 într-o mofetă.

Lucrarea arată cum metodologiile fizicii statistice pot conecta fenomene aparent fără legătură prin principii subiacente comune, subliniind în același timp importanța validării experimentale atente și modelării teoretice adecvate. Cercetarea contribuie la înțelegerea fundamentală a sistemelor complexe și are aplicații practice în domenii precum evaluarea hazardelor naturale și monitorizarea de mediu.