

Física Estatística Aplicada à Geofísica

Fenômenos naturais como terremotos, eventos climáticos extremos e aquecimento global produzem riscos significativos à humanidade. Devido às interações não-lineares e de longo alcance entre os diversos elementos das estruturas terrestres, a compreensão e, em particular, a previsão de tais eventos disruptivos representam enormes desafios para a comunidade científica. Durante os últimos anos, o surgimento e evolução da ciência do sistema terrestre atraiu muita atenção e produziu novos conceitos e estruturas. De forma especial, novas técnicas de física estatística e técnicas baseadas em sistemas e redes complexas foram desenvolvidas e implementadas para avançar substancialmente o conhecimento do sistema terrestre. Apresentamos aqui uma revisão abrangente sobre o progresso científico recente no desenvolvimento e aplicação de abordagens combinadas de física estatística e ciência de sistemas complexos (como fenômenos críticos, teoria de redes, fractais e entropia) aplicadas a sistemas geofísicos. Notavelmente, essas ferramentas e abordagens de integração fornecem novos insights e perspectivas para entender a dinâmica dos sistemas terrestres. Assim, o objetivo geral desta disciplina é realçar como conceitos e teorias da física estatística podem ser úteis no campo da Geofísica.

Tópicos:

1- Fundamentos de Mecânica Estatística

- 1.1- Conceitos elementares de estatística
- 1.2- Noções de teoria de probabilidade
- 1.3- Valores médios e cálculos de momentos
- 1.4- Distribuições de probabilidades
- 1.5- Distribuição de Boltzmann
- 1.6- Equilíbrio termodinâmico
- 1.7- Entropia como: irreversibilidade, desordem e incerteza.

2- Sistemas Complexos

- 2.1- Sistemas Complexos e Complexidade
- 2.2- Emergência e Auto-Organização
- 2.3- Criticalidade Auto-Organizada
- 2.4- Distribuições em Lei de Potência
- 2.5- Fractais e Leis de Escalas
- 2.6- Aplicações em Geofísica

3- Mecânica Estatística Não-extensiva

- 3.1- Extensividade e Aditividade
- 3.2- Limitações do Formalismo de Boltzmann em Sistemas Complexos
- 3.3- Entropia de Tsallis
- 3.4- Funções q-exponenciais
- 3.5- Propriedades Matemáticas
- 3.6- Auto-similaridade, efeitos de memória, correlações de longo-alcance
- 3.6- Aplicações em Geofísica

4- Redes Complexas

- 4.1- Teoria de Grafos
- 4.2- Matriz Adjacência
- 4.3- Redes Simples e Ponderadas
- 4.4- Redes Regulares
- 4.5- Redes Aleatórias
- 4.6- Fenômeno Small world

4.7- Redes Livres de Escala

4.8- Medidas em Redes:

- conectividade
- conectividade média
- distribuição de conectividade
- coeficiente de aglomeração
- comprimento de caminho médio
- small-world-ness
- propriedades de correlação

4.9- Detecção de comunidades

4.10- Aplicações em Geofísica

5- Aplicações Computacionais

5.1- Modelos e algoritmos de construção de redes a partir de dados iniciais

5.2- Modelos de redes complexas: aleatório, small-world e livre de escala

5.3- Extração de padrões através de detecção de comunidades em redes complexas

5.4- Autômato celular aplicado à Geofísica

Statistical Physics Applied to Geophysics

Natural phenomena such as earthquakes, extreme weather events, and global warming pose significant risks to humanity. Due to the non-linear and long-range interactions between the various elements of terrestrial structures, the understanding and, in particular, the prediction of such disruptive events represent enormous challenges for the scientific community. During the last few years, the emergence and evolution of Earth system science have attracted much attention and produced new concepts and frameworks. In particular, new statistical physics techniques and techniques based on complex systems and networks were developed and implemented to advance the Earth system's knowledge substantially. We present here a comprehensive review of recent scientific progress in the development and application of combined approaches from statistical physics and complex systems science (such as critical phenomena, network theory, fractals, and entropy) applied to geophysical systems. Remarkably, these integration tools and approaches provide new insights and perspectives for understanding the dynamics of Earth systems. Thus, the general objective of this course is to highlight how concepts and theories of statistical physics can be helpful in the field of Geophysics.

Topics:

1- Fundamentals of Statistical Mechanics

- 1.1- Elementary concepts of statistics
- 1.2- Notions of probability theory
- 1.3- Average values and *moments* calculations
- 1.4- Probability distributions
- 1.5- Boltzmann Distribution
- 1.6- Thermodynamic equilibrium
- 1.7- Entropy as: irreversibility, disorder, and uncertainty.

2- Complex Systems

- 2.1- Complex Systems and Complexity
- 2.2- Emergence and Self-Organization
- 2.3- Self-Organized Criticality
- 2.4- Power Law Distributions

- 2.5- Fractals and Scale Laws
- 2.6- Applications in Geophysics

3- Nonextensive Statistical Mechanics

- 3.1- Extensivity and Additivity
- 3.2- Limitations of Boltzmann Formalism in Complex Systems
- 3.3- Tsallis' entropy
- 3.4- q -exponential functions
- 3.5- Mathematical Properties
- 3.6- Self-similarity, memory effects, long-range correlations
- 3.6- Applications in Geophysics

4- Complex Networks

- 4.1- Graph Theory
- 4.2- Adjacency Matrix
- 4.3- Simple and Weighted Networks
- 4.4- Regular Networks
- 4.5- Random Networks
- 4.6- Small-world Phenomenon
- 4.7- Scale-free Networks
- 4.8- Measurements in Networks:
 - connectivity
 - average connectivity
 - connectivity distribution
 - clustering coefficient
 - average path length
 - small-world-ness
 - correlation properties
- 4.9- Communities Detection
- 4.10- Applications in Geophysics

5- Computational Applications

- 5.1- Models and algorithms for building networks from initial data
- 5.2- Complex network models: random, small-world, and scale-free
- 5.3- Extraction of patterns through community detection in complex networks
- 5.4- Cellular automaton applied to Geophysics

Física Estadística Aplicada a la Geofísica

Fenómenos naturales como terremotos, eventos climáticos extremos y calentamiento global producen riesgos significativos a la humanidad. Debido a las interacciones no-lineales y de largo alcance entre los diversos elementos de las estructuras terrestres, la comprensión y, en particular, la previsión de tales eventos disruptivos representan enormes desafíos para la comunidad científica. Durante los últimos años, el surgimiento y evolución de la ciencia del sistema terrestre atrajo mucha atención y produjo nuevos conceptos y estructuras. De forma especial, nuevas técnicas de física estadística y técnicas basadas en sistemas y redes complejos fueron desenvueltas e implementadas para avanzar substancialmente el conocimiento del sistema terrestre. Presentamos aquí una revisión amplia sobre el progreso científico reciente en el desenvolvimiento y aplicación de abordajes combinadas de física estadística y ciencia de sistemas complejos (como fenómenos críticos, teoría de redes, fractales y entropía) aplicadas a sistemas geofísicos. Notablemente, esas herramientas y abordajes de integración ofrecen nuevos insights y perspectivas para entender la dinámica de los sistemas te-

restres. Así, el objetivo general de esta disciplina es realzar como conceptos y teorías de la física estadística pueden ser útiles en el campo de la Geofísica.

Tópicos:

1- Fundamentos de Mecánica Estadística

- 1.1- Conceptos elementares de estadística
- 1.2- Nociones de teoría de la probabilidad
- 1.3- Valores medios y cálculos de momentos
- 1.4- Distribuciones de probabilidades
- 1.5- Distribución de Boltzmann
- 1.6- Equilibrio termodinámico
- 1.7- Entropía como: irreversibilidad, desorden e incerteza.

2- Sistemas Complejos

- 2.1- Sistemas Complejos y Complejidad
- 2.2- Emergencia e Auto-Organización
- 2.3- Criticalidad Auto-Organizada
- 2.4- Distribuciones en Ley de Potencia
- 2.5- Fractales y Leyes de Escalas
- 2.6- Aplicaciones en Geofísica

3- Mecánica Estadística No-extensiva

- 3.1- Extensividad y Aditividad
- 3.2- Limitaciones del Formalismo de Boltzmann en Sistemas Complejos
- 3.3- Entropía de Tsallis
- 3.4- Funciones q-exponenciales
- 3.5- Propiedades Matemáticas
- 3.6- Auto-similaridad, efectos de memoria, correlaciones de largo-alcance
- 3.6- Aplicaciones en Geofísica

4- Redes Complejas

- 4.1- Teoría de Grafos
- 4.2- Matriz Adyacencia
- 4.3- Redes Simples y Ponderadas
- 4.4- Redes Regulares
- 4.5- Redes Aleatorias
- 4.6- Fenómeno Small world
- 4.7- Redes Libres de Escala
- 4.8- Medidas en Redes:
 - conectividad
 - conectividad media
 - distribución de conectividad
 - coeficiente de aglomeración
 - longitud de camino medio
 - small-world-ness
 - propiedades de correlación
- 4.9- Detección de comunidades
- 4.10- Aplicaciones en Geofísica

5- Aplicaciones Computacionales

- 5.1- Modelos y algoritmos de construcción de redes a partir de datos iniciales

- 5.2- Modelos de redes complejas: aleatorio, small-world y libre de escala
- 5.3- Extracción de padrones a través de detección de comunidades en redes complejas
- 5.4- Autómata celular aplicado a la Geofísica

Bibliografia / Bibliography / Bibliografia:

- A. BARABÁSI, Network Science, Cambridge University Press, 2016.
- A. BARRAT, M. BARTHELEMY, A. VESPIGNANI, Dynamical processes on complex networks, Cambridge University Press, 2008.
- D. PHILLIPS, W. SCHWANGHART, T. HECKMANN. Graph theory in the geosciences. Earth-Science Reviews, v. 143, p. 147-160, 2015.
- D. SORNETTE, Critical phenomena in natural sciences: Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools. Springer Science & Business Media, 2006.
- F. REIF, Fundamentals of statistical and thermal physics. Waveland Press, 2009.
- I. GLERIA, R. MATSUSHITA, S. D. SILVA, Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência. Revista Brasileira de Ensino de Física, 26(2), pp.99-108, 2004.
- J. FAN, et. al., Statistical physics approaches to the complex Earth system. Physics reports 896 (2021): 1-84.
- J. SETHNA, Statistical Mechanics: Entropy, Order Parameters, and Complexity, vol. 14, Oxford University Press, 2006.- K. ERCIYES, Complex Networks: An Algorithmic Perspective, 2017.
- L. COSTA, et. al., Analyzing and Modeling Real-World Phenomena with Complex Networks: A Survey of Applications, Advances in Physics, 60:3, pg 329-412, 2011.
- M. GELL-MANN, C. TSALLIS, Nonextensive Entropy (Interdisciplinary Applications), Oxford University Press, 2004.
- M. NEWMAN, A. BARABÁSI, D. WATTS, The Structure and Dynamics of Networks, 2006.
- M. NEWMAN, Networks: An introduction, Oxford University Press, 2010.
- P. DORN, D. HUGHES, Self-Organized Criticality in Cellular Automata, MSci Project Report, Imperial College, London, UK, 2000.
- R. ALBERT, A. L. BARABASI, Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics 74, 47-97, 2002.
- S. ABE, Y. OKAMOTO, Nonextensive Statistical Mechanics and Its Applications, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- S. SALINAS,. Introdução à física estatística, 2ed., Edusp, 2005.
- S. AU YANG, Foundations of Complex-system Theories: In Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics, Cambridge University Press, 1999.

- V. DIMRI, (Ed.). Fractal Behaviour of the Earth System. Berlin: Springer, 2005.