

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Ottimizzazione e Meccanica Statistica

Optimization and Statistical Mechanics

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8067176-8068917	Canale	Unico
CFU	8	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Giulio Cimini

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: L'insegnamento mira a fornire conoscenze avanzate relative alla meccanica statistica moderna, con particolare riguardo all'ottimizzazione vincolata, i fenomeni critici, la teoria delle reti complesse ed i processi stocastici. Il corso si propone inoltre di sviluppare le capacità di ricerca negli ambiti sopraindicati, dal punto di vista sia teorico che computazionale, attraverso lo svolgimento di progetti individuali (anche su tematiche interdisciplinari) che prevedono la realizzazione di modelli e simulazioni e l'analisi di grandi basi dati. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Gli studenti dovranno acquisire conoscenza dei diversi strumenti analitici, computazionali e statistici che verranno illustrati nel corso, e comprenderne le modalità di utilizzo a seconda delle peculiarità dei problemi affrontati. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPRENSIONE: Gli studenti dovranno saper applicare alcuni dei metodi e tecniche descritte a lezione per risolvere problemi su tematiche generali relative ai sistemi complessi. Attraverso la realizzazione del progetto, gli studenti familiarizzeranno con la pianificazione ed esecuzione delle varie fasi di un'attività di ricerca. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Gli studenti dovranno saper astrarre ed individuare gli ingredienti fondamentali di un problema complesso, integrare le conoscenze che si possono acquisire sul problema dalle varie tipologie di analisi (analitica, numerica, statistica), ed imparare a formulare conclusioni sulla base di informazioni limitate o approssimate. Inoltre, dovranno essere in grado di effettuare ricerche bibliografiche, selezionare le tecniche di analisi appropriate, sviluppare algoritmi complessi in autonomia e valutare la correttezza dei risultati ottenuti.
-----------------	--

	ABILITÀ COMUNICATIVE: Gli studenti dovranno essere in grado di presentare in maniera efficace un progetto di ricerca: formulare propriamente le domande, descrivere le tematiche e lo stato dell'arte, i metodi utilizzati, i risultati e le implicazioni delle proprie analisi in modo convincente e non ambiguo. CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Gli studenti dovranno acquisire una comprensione dei metodi di meccanica statistica avanzata utilizzati nella ricerca in fisica, e di come questi siano applicabili a molti campi diversi dalla fisica stessa. Dovranno essere in grado di leggere e comprendere pubblicazioni scientifiche, derivazioni analitiche, manuali di codici, specifiche di dati.
English	LEARNING OUTCOMES: <i>The course aims to provide advanced knowledge of modern statistical mechanics, with particular attention to constrained optimization, critical phenomena, complex networks theory and stochastic processes. The course also aims to develop research skills in the above-mentioned areas, from both a theoretical and computational point of view, through the development of individual projects (also on interdisciplinary topics) which involve the creation of models and simulations and the analysis of large databases.</i> KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>Students will have to acquire knowledge of the different analytical, computational and statistical tools that will be illustrated in the course, and to understand how to use them depending on the specifics of the problems addressed.</i> APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>Students must be able to apply some of the methods and techniques described in class to solve problems on general topics relating to complex systems. Through the implementation of their project, students will become familiar with the planning and execution of the various phases of a research activity.</i> MAKING JUDGMENTS: <i>Students will acquire the ability to abstract and identify the fundamental ingredients of a complex problem, integrate the knowledge that can be acquired on the problem from the various types of analysis (analytical, numerical, statistical), and learn to formulate conclusions based on limited or approximate information. Furthermore, they must be able to carry out bibliographic searches, select the appropriate analysis techniques, develop complex algorithms independently and evaluate the correctness of the results obtained.</i> COMMUNICATION SKILLS: <i>Students must be able to effectively present a research project: formulate the questions properly, describe the issues and the state of the art, the methods used, the results and implications of their analyses in a convincing and unambiguous way.</i> LEARNING ABILITY: <i>Students will gain an understanding of the advanced statistical mechanics methods used in physics research, and how these are applicable to many fields other than physics itself. They should be able to read and understand scientific publications, analytical derivations, code manuals, data specifications.</i>

PREREQUISITI

Italiano	Conoscenze generali: fisica classica, analisi matematica, algebra e geometria. Conoscenze specifiche: meccanica statistica, calcolo delle probabilità, fisica computazionale.
English	<i>General knowledge: classical physics, mathematical analysis, algebra and geometry. Specific knowledge: statistical mechanics, probability calculus, computational physics.</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	- Introduzione ai sistemi complessi: definizioni, tecniche di analisi e simulazione - Elementi di Teoria dell'Informazione, relazione con la Meccanica Statistica. - Teoria delle reti, processi di crescita e Master Equations. Funzioni generatrici. - Ottimizzazione vincolata e massima entropia. Grafi random-esponenziali, modelli nulli e validazione statistica. - Modelli di percolazione, epidemici e processi di contatto. Campo medio eterogeneo. Disordine quenched e annealed. - Algoritmi gerarchici di partizione. Algoritmi di ranking. - Passeggiate casuali. Catene di Markov in tempo discreto e continuo. PageRank e applicazioni. Operatore Laplaciano discreto. - Equazioni differenziali stocastiche. Equazioni di Fokker-Plank e Kolmogorov Backward e Forward. Formula di Cramer. Analisi in Componenti Principali. - Simulazioni Monte Carlo e in temperatura. Applicazione al modello di Ising. Ottimizzazione tramite algoritmi genetici. - Fenomeni critici e gruppo di rinormalizzazione su spazi eterogenei. - Teoria del trasporto ottimale. Esempi di applicazioni in sociofisica ed econofisica.
English	- <i>Introduction to Complex Systems: definitions, analysis and simulation techniques</i> - <i>Elements of Information Theory, relationship with Statistical Mechanics.</i> - <i>Network theory, growth processes and Master equations. Generating functions.</i> - <i>Constrained optimization and maximum entropy. Exponential Random Graphs, null models and statistical validation.</i> - <i>Percolation, epidemic and contact process models. Heterogeneous mean field. Quenched and annealed disorder.</i> - <i>Hierarchical partition algorithms. Ranking algorithms.</i> - <i>Random walks. Markov chains in discrete and continuous time. PageRank and applications. Discrete Laplacian operator.</i> - <i>Stochastic differential equations. Fokker-Plank and Kolmogorov Backward and Forward equations. Cramer's formula. Principal Components Analysis.</i> - <i>Monte Carlo and simulated annealing simulations. Application to the Ising model. Optimization via genetic algorithms.</i> - <i>Critical phenomena and renormalization group on heterogeneous spaces.</i> - <i>Optimal transport theory. Examples of applications in sociophysics and econophysics.</i>

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	Il materiale verrà indicato dal docente nel corso delle lezioni. Slides, dispense e articoli di ricerca su specifici argomenti saranno condivisi nella classe Teams del corso. I testi principali di riferimento sono: - C Gardiner. "Stochastic Methods: A Handbook for the Natural and Social Sciences". Springer (2009) - M Newman. "Networks". Oxford University Press (2018) - H J Jensen. "Complexity Science: The Study of Emergence". Cambridge University Press (2022)
English	<i>The material will be indicated by the teacher during the lessons.</i> <i>Slides, lecture notes and research articles on specific topics will be shared in the Teams class of the course.</i> <i>The main reference books are:</i> - C Gardiner. "Stochastic Methods: A Handbook for the Natural and Social Sciences". Springer (2009) - M Newman. "Networks". Oxford University Press (2018) - H J Jensen. "Complexity Science: The Study of Emergence". Cambridge University Press (2022)

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

Italiano	Il corso si svolge principalmente con lezioni frontali. Alcuni seminari specifici sono previsti nella parte finale del corso. Nello svolgimento del progetto individuale sono previsti incontri con il docente per valutare lo stato di avanzamento e le modalità di analisi adottate.
English	<i>The course takes place mainly with frontal lessons. Some specific seminars are scheduled in the final part of the course.</i> <i>During the development of the individual project, meetings with the teacher are scheduled to evaluate the state of progress and the analysis methods adopted.</i>

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Lezioni in aula (2 ore, 3 volte la settimana)
English	<i>Class lectures (2 hours, 3 times per week)</i>

MODALITÀ DI VALUTAZIONE

- ☐ Prova scritta ☐ Prova orale ☐ Prova di laboratorio ☐ Prova pratica
☐ Valutazione in itinere ☒ Valutazione di progetto ☐ Valutazione di tirocinio

COMPOSIZIONE DELLA COMMISSIONE VALUTATRICE

Giulio Cimini, Roberto Benzi, Michele Buzzicotti, Mauro Sbragaglia

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	La valutazione dello studente prevede la realizzazione un progetto individuale di approfondimento su uno degli argomenti trattati nel corso (da concordare preventivamente con il docente). L'esame consiste nella presentazione del lavoro svolto utilizzando delle diapositive e altro materiale multimediale, a cui seguiranno le domande del docente inerenti alla tematica del progetto. Lo studente dovrà dimostrare di aver acquisito conoscenze adeguate nell'argomento affrontato, padronanza delle tecniche analitiche, numeriche e statistiche utilizzate, contezza dei risultati ottenuti, capacità di inquadramento della tematica di ricerca (stato dell'arte, domande aperte, potenziali applicazioni e limitazioni), capacità di sintesi e chiarezza espositiva. Il punteggio della prova d'esame è attribuito mediante un voto espresso in trentesimi. La prova di esame sarà valutata secondo i seguenti criteri: Non idoneo: importanti carenze e/o inaccuratezza nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitate capacità di analisi e sintesi, frequenti generalizzazioni. 18-20: conoscenza e comprensione degli argomenti appena sufficiente con possibili imperfezioni; capacità di analisi, sintesi e autonomia di giudizio sufficienti. 21-23: Conoscenza e comprensione degli argomenti routinaria; Capacità di analisi e sintesi corrette con argomentazione logica coerente. 24-26: Discreta conoscenza e comprensione degli argomenti; buone capacità di analisi e sintesi con argomentazioni espresse in modo rigoroso. 27-29: Conoscenza e comprensione degli argomenti completa; notevoli capacità di analisi, sintesi. Buona autonomia di giudizio. 30-30L: Ottimo livello di conoscenza e comprensione degli argomenti. Notevoli capacità di analisi e di sintesi e di autonomia di giudizio. Argomentazioni espresse in modo originale.
English	<i>The student's evaluation involves the realization of an individual project to deepen one of the topics covered in the course (to be agreed in advance with the teacher).</i> <i>The exam consists of the presentation of the work done using slides and other multimedia material, followed by the teacher's questions relating to the topic of the project.</i>

The student must demonstrate to have acquired adequate knowledge in the topic addressed, mastery of the analytical, numerical and statistical techniques used, knowledge of the results obtained, ability to frame the research topic (state of the art, open questions, potential applications and limitations), ability to summarize and clarity of presentation.

The score of the exam is attributed by means of a mark expressed out of thirty.

The examination will be evaluated according to the following criteria:

Ineligible: major deficiencies and/or inaccuracy in knowledge and understanding of topics; limited analytical and synthesis skills, frequent generalizations.

18-20: knowledge and understanding of topics only sufficient with possible imperfections; analytical skills, synthesis and judgment autonomy just sufficient.

21-23: knowledge and understanding of topics at a basic level; Correct analysis and synthesis skills with consistent logical reasoning.

24-26: Fair knowledge and understanding of the topics; good analytical and synthesis skills with rigorous arguments.

27-29: Complete knowledge and understanding of the topics; remarkable ability of analysis, synthesis. Good autonomy of judgment.

30-30L: Excellent level of knowledge and understanding of topics. Remarkable ability of analysis and synthesis and autonomy of judgment. Arguments expressed in an original way