

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

FISICA DEI FLUIDI COMPLESSI E TURBOLENZA

Physics of complex fluids and turbulence

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA
Codice	8068558-8067535	Canale	Unico
CFU	8	Lingua	Italiano

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Michele Buzzicotti

CODOCENTE

Mauro Chinappi (6 CFU)

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso fornisce un'introduzione su argomenti avanzati di dinamica dei fluidi. Il filo conduttore del corso è la complessità e le metodologie per affrontarla. Gli esempi selezionati saranno scelti in un'ottica multiscala (diverse scale spaziali e temporali rilevanti per l'analisi del fenomeno) e multi-fisica (diversi effetti contribuiscono alla fenomenologia). In particolare, verranno trattati i seguenti argomenti: moti turbolenti per fluidi semplici, soluzioni colloidali di particelle micrometriche (moto Browniano), flussi bifase ed elettro-idrodinamica. Nel corso vengono forniti gli strumenti concettuali e analitici per descrivere fluidi e flussi complessi. CONOSCENZA E COMPRESIONE: Al termine dell'insegnamento, lo/la studente sarà in grado di comprendere i principali fenomeni relativi alla dinamica dei fluidi complessi, in particolare relativamente alla descrizione del trasporto di particelle in fluidi e all'elettro-idrodinamica. Inoltre, lo/la studente conoscerà le principali fenomenologie associate a flussi turbolenti e la loro descrizione teorica.
English	LEARNING OUTCOMES: The course introduces advanced topics in fluid dynamics. The common thread of the course is the complexity and the methodologies to face it. The selected examples will be chosen from a multiscale perspective (different spatial and temporal scales relevant to the analysis of the phenomenon) and multi-physics (different effects contribute to the phenomenology). In particular, the following topics will be covered: turbulent motions for simple fluids, colloidal solutions of micrometric particles (Brownian motion), two-phase and electro-dynamic flows. The course provides conceptual and analytical tools to describe complex fluids and flows. KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: At the end of the course, the student will be able to understand the main phenomena related to the dynamics of complex fluids, regarding the description of the transport of particles in fluids and to electro-dynamics. Furthermore, the

	<i>student will know the main phenomenology associated with turbulent flows and their theoretical description.</i>
--	--

PREREQUISITI

Italiano	Lo/la studente dovrebbe preferibilmente aver già frequentato il corso di Fluidodinamica. È necessario che lo/la studente abbia una buona dimestichezza con gli strumenti dell'analisi differenziale e integrale e con gli aspetti di base della meccanica e della termodinamica. È inoltre utile una conoscenza di base della programmazione scientifica e dei metodi numerici elementari.
English	<i>The student should preferably have already attended the Fluid Dynamics course. It is necessary that the student is familiar with the differential and the integral analysis, with the basic aspects of mechanics and thermodynamics. Basic knowledge of scientific programming and elementary numerical methods is also useful.</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	Descrizione continua dei fluidi: Descrizione atomistica e descrizione continua. Campi continui. Conservazione della massa. Forma integrale e forma differenziale. Richiami su gradiente, divergenza e notazione indiciale. Bilancio della quantità di moto. Forze di volume e forze di superficie. Introduzione del tensore degli sforzi. Relazioni costitutive per fluidi newtoniani. Equazioni di Navier-Stokes. Condizioni al bordo per problemi fluidodinamici. Pareti solide, ingressi e uscite. Numero di Reynolds. Limite di Stokes. Cenni qualitativi ai flussi turbolenti. Medie alla Reynolds. Cenni alle equazioni RANS e al significato fisico delle quantità mediate. Discussione qualitativa di esempi applicativi. Introduzione alla turbolenza sviluppata. Introduzione alla Teoria Di Kolmogorov del 1941 (K41). Introduzione all'intermittenza e al modello multifrattale. Particelle in fluidi: Moto di particelle immerse in un fluido. Caduta di una particella in un fluido viscoso. Tempo di Stokes. Forze idrodinamiche su particelle di dimensione finita. Particelle piccole e fluttuazioni termiche. Descrizione browniana e descrizione al continuo. Equazione di diffusione. Soluzione dell'equazione di diffusione in una dimensione. Soluzione gaussiana. Richiami al teorema di equipartizione dell'energia. Advezione, diffusione e migrazione indotta da campi esterni. Sedimentazione. Fenomeni foretici. Applicazioni al trasporto di particelle e soluti in fluidi. Elementi computazionali: Introduzione alla modellistica computazionale del moto dei fluidi e dei fenomeni di trasporto. Integrazione numerica di semplici equazioni differenziali. Metodo di Eulero. Metodi espliciti elementari. Simulazione numerica di problemi di diffusione, moto browniano, advezione e trasporto di particelle.
----------	--

	Elettroidrodinamica e trasporto ionico: Richiami di elettrostatica. Elettroidrodinamica. Lunghezza di Debye. Equazioni di Poisson-Nernst-Planck-Stokes. Soluzioni in canali piani e discussione dei principali limiti fisici. Potenziale di membrana. Applicazioni a membrane, sensori e separazioni: Fenomeni di trasporto in membrane e sensori. Effetti fisici rilevanti in sistemi microfluidici e nanofluidici. Applicazioni alla separazione di specie ioniche e alla progettazione di membrane biomimetiche. Esempi relativi alla separazione di terre rare.
English	<i>Continuum description of fluids: Atomistic description and continuum description. Continuum fields. Conservation of mass. Integral form and differential form. Review of gradient, divergence, and index notation. Balance of momentum. Body forces and surface forces. Introduction to the stress tensor. Constitutive relations for Newtonian fluids. Navier-Stokes equations. Boundary conditions for fluid-dynamic problems. Solid walls, inlets, and outlets. Reynolds number. Stokes limit. The problem of turbulence. Reynolds averages. Overview of RANS equations and of the physical meaning of averaged quantities. Qualitative discussion of applied examples. Introduction to fully developed Turbulent Flows. Kolmogorov 1941 (K41) Theory and introduction to intermittency and multifractal model.</i> <i>Particles in fluids: Motion of particles immersed in a fluid. Falling motion of a particle in a viscous fluid. Stokes time. Hydrodynamic forces on finite-size particles. Small particles and thermal fluctuations. Brownian description and continuum description. Diffusion equation. Solution of the diffusion equation in one dimension. Gaussian solution. Review of the equipartition theorem. Advection, diffusion, and migration induced by external fields. Sedimentation. Phoretic phenomena. Applications to the transport of particles and solutes in fluids.</i> <i>Computational elements: Introduction to computational modelling of fluid motion and transport phenomena. Numerical integration of simple differential equations. Euler method. Elementary explicit methods. Numerical simulation of diffusion, Brownian motion, advection, and particle transport problems. Electrohydrodynamics and ionic transport.</i> <i>Review of electrostatics: Electrohydrodynamics. Debye length. Poisson-Nernst-Planck-Stokes equations. Solutions in planar channels and discussion of the main physical limits. Membrane potential.</i> <i>Applications to membranes, sensors, and separations: Transport phenomena in membranes and sensors. Relevant physical effects in microfluidic and nanofluidic systems. Applications to the separation of ionic species and to the design of biomimetic membranes. Examples related to the separation of rare earth elements.</i>

Italiano	1) Frisch, Uriel. Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov. Cambridge Univ. press, 1995. 2) Pope, Stephen B. Turbulent flows. Cambridge University press, 2000. 3) San Miguel, M., & Toral, R. (2000). Stochastic effects in physical systems. In Instabilities and nonequilibrium structures VI (pp. 35-127). Springer, Dordrecht. 4) Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2015). Fluid Mechanics, 6th edition. Academic Press. 5) Bruus, H. (2008). Theoretical Microfluidics. Oxford University Press.
English	1) Frisch, Uriel. Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov. Cambridge Univ. press, 1995. 2) Pope, Stephen B. Turbulent flows. Cambridge University press, 2000. 3) San Miguel, M., & Toral, R. (2000). Stochastic effects in physical systems. In Instabilities and nonequilibrium structures VI (pp. 35-127). Springer, Dordrecht. 4) Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2015). Fluid Mechanics, 6th edition. Academic Press. 5) Bruus, H. (2008). Theoretical Microfluidics. Oxford University Press.

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza

☐ A distanza

Italiano	Il corso segue un modello didattico tradizionale basato su lezioni frontali ed esercitazioni. Le lezioni introduttive verranno principalmente svolte alla lavagna, derivando le equazioni in modo tradizionale. Il resto del corso utilizzerà anche presentazioni. Il materiale verrà pubblicato on-line tipicamente prima delle lezioni. Nella parte finale del corso, verranno tenuti seminari specialistici su temi specifici (esempio: reologia dei fluidi complessi, trasporto di particelle in flussi turbolenti). Nell'ambito dello studio dei moti Browniani, due lezioni verranno svolte in aula di informatica dove gli studenti svilupperanno un codice per il moto Browniano di una particella.
English	The course follows a traditional teaching model based on lectures and exercises. The introductory lessons will mainly be carried out on the blackboard, deriving the equations in a traditional and rigorous way. The rest of the course will also use presentations. The material will be published on-line typically before classes. In the final part of the course, specialized seminars will be held on selected topics (e.g. reology of complex flow, particle transport in turbulent flows). As part of the study of Brownian motions, two lessons will be held in the computer lab where the students will develop a code for the Brownian motion of a particle.

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria

☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Lezioni in aula. Frequenza facoltativa anche se fortemente consigliata
----------	--

English	<i>Class lectures. Attendance is optional but students are strongly encouraged to attend lectures</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

Prof. Michele Buzzicotti, Prof. Mauro Chinappi
Membri Supplenti: Prof. Mauro Sbragaglia, Prof. Luca Biferale

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	La valutazione dello/la studente prevede una prova scritta preliminare, una prova orale e una prova di progetto. La prova scritta preliminare si svolge immediatamente prima della prova orale e consiste in un breve test di 10 domande su concetti fondamentali del corso. A questa prova sono assegnati 10 punti. Dal momento che questa prova verte su temi fondamentali, lo/la studente che non ottenga almeno 6 punti non accede al resto dell'esame. La prova orale prevede l'accertamento della conoscenza dei concetti fondamentali esposti a lezione e della loro formulazione fisico-matematica. Lo/la studente dovrà dimostrare di conoscere gli argomenti principali trattati nel corso e di saper formulare correttamente i principali modelli matematici per lo studio della dinamica dei fluidi e dei fenomeni di trasporto. A questa parte dell'esame sono assegnati 10 punti. Per rendere più efficace la valutazione, il docente potrà assegnare brevi quesiti scritti, la cui discussione durante la prova orale costituirà la valutazione dell'orale. Durante la prova orale sarà anche discusso un breve progetto svolto in autonomia dallo/la studente. Il progetto consisterà nella formulazione del modello matematico più appropriato per una situazione reale descritta dal docente. La discussione del progetto permetterà di valutare la capacità dello/la studente di applicare i modelli presentati nel corso, discutendone ipotesi, limiti e campo di validità. Il docente fornirà dettagli sui progetti almeno un mese prima del primo appello. Alla discussione del progetto sono assegnati 10 punti. Il voto finale, espresso in trentesimi, sarà ottenuto sommando il punteggio della prova scritta preliminare, della prova orale e della prova di progetto, ciascuna valutata fino a un massimo di 10 punti. Criteri per la formulazione del giudizio espresso in trentesimi: 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 assessment of the student includes a preliminary written test, an oral exam, and a project.</i> <i>The preliminary written test takes place immediately before the oral exam and consists of a short test with 10 questions on fundamental concepts of the course. This test is worth 10 points. Since this test concerns fundamental topics, the student who does not obtain at least 6 points is not admitted to the rest of the exam.</i> <i>The oral exam assesses the student's knowledge of the fundamental concepts presented during the course and of their physical and mathematical formulation. The student must demonstrate knowledge of the main topics covered in the course and the ability to correctly formulate the main mathematical models used to study fluid dynamics and transport phenomena. This part of the exam is worth 10 points. To make the assessment more effective, the instructor may assign short written questions, whose discussion during the oral exam will be considered as part of the assessment of the oral exam itself. During the oral exam, a short project carried out independently by the student will also be discussed. The project will consist of the formulation of the most appropriate mathematical model for a real situation described by the instructor. The discussion of the project will assess the student's ability to apply the models presented in the course, discussing their assumptions, limitations, and range of validity.</i> <i>The instructor will provide details on the projects at least one month before the first exam session. The discussion of the project is worth 10 points.</i> <i>The final grade, expressed out of 30, will be obtained by adding the scores of the preliminary written test, the oral exam, and the project, each evaluated up to a maximum of 10 points.</i> <i>Criteria for the determination of the final grade:</i> <i>Ineligible: major deficiencies and/or inaccuracy in knowledge and understanding of topics; limited analytical and synthesis skills, frequent generalizations.</i> <i>18-20: knowledge and understanding of topics only sufficient with possible imperfections; analytical skills, synthesis and judgment autonomy just sufficient.</i> <i>21-23: knowledge and understanding of topics at a basic level; correct analysis and synthesis skills with consistent logical reasoning.</i>



	<i>24-26: Fair knowledge and understanding of the topics; good analytical and synthesis skills with rigorous arguments.</i> <i>27-29: Complete knowledge and understanding of the topics; remarkable ability of analysis, synthesis. Good autonomy of judgment.</i> <i>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</i>
--	---