

DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Ammassi di Galassie

CLUSTERS OF GALAXIES

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	CdS	FISICA (LM-17)
Codice	8068802 – (8067545 25/26)	Canale	Unico
CFU	6	Lingua	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Pasquale Mazzotta

CODOCENTE

Nessuno / None | Modulo: non previsto / Module: not applicable

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: L'insegnamento contribuisce alla formazione avanzata in Astrofisica e Cosmologia del Corso di Laurea Magistrale in Fisica. Il corso fornisce gli strumenti teorici e osservativi necessari per comprendere la formazione, la struttura e l'osservazione degli ammassi di galassie nel quadro della cosmologia moderna. Il percorso collega l'evoluzione delle perturbazioni primordiali alla formazione degli aloni di materia oscura, alla fisica del mezzo intracluster, alle principali osservabili e alla determinazione della massa mediante dinamica delle galassie, equilibrio idrostatico ed effetti di lente gravitazionale. Particolare attenzione è dedicata alle assunzioni, alle approssimazioni e alle sorgenti di incertezza e bias che intervengono nel passaggio dalle osservabili alla massa e dalla popolazione degli ammassi ai vincoli cosmologici. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPrensione: Al termine del corso lo studente dovrà comprendere i principi fisici che governano la crescita delle perturbazioni cosmologiche e la formazione delle strutture gravitazionalmente legate. Dovrà conoscere il significato fisico del fattore di crescita, dello spettro di potenza, della varianza di massa, del collasso sferico e della funzione di massa degli aloni; la termodinamica e i processi radiativi del mezzo intracluster; l'emissione X, l'effetto Sunyaev-Zel'dovich, il raffreddamento, il feedback da AGN, gli shock e le cold fronts; i fondamenti della lente gravitazionale, fino a convergenza, shear, magnification, curve critiche, caustiche e flexion. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPrensione: Lo studente dovrà saper utilizzare modelli fisici semplici per derivare e interpretare quantitativamente le principali proprietà degli ammassi. Dovrà saper applicare le equazioni della crescita delle perturbazioni, del collasso sferico, della funzione di massa, dell'equilibrio idrostatico, delle relazioni di scala e della lente gravitazionale; effettuare stime d'ordine di grandezza; interpretare grafici e osservabili; confrontare previsioni teoriche e misure. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Lo studente dovrà saper valutare criticamente l'applicabilità delle approssimazioni utilizzate, distinguere tra quantità direttamente osservate e quantità inferite tramite un modello e riconoscere il ruolo dello scatter intrinseco, della selezione osservativa, della calibrazione della massa e dei bias sistematici. ABILITÀ COMUNICATIVE: Lo studente dovrà saper presentare in modo chiaro, rigoroso e quantitativamente corretto un problema di fisica degli ammassi, utilizzando il linguaggio scientifico appropriato e illustrando il collegamento tra osservabile, modello fisico, equazioni e inferenza delle quantità fisiche. Poiché il corso è erogato in inglese, è richiesta la capacità di discutere gli argomenti fondamentali anche in lingua inglese. CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Lo studente dovrà acquisire gli strumenti concettuali necessari per approfondire autonomamente argomenti di cosmologia osservativa, formazione
----------	---

	delle strutture, fisica del plasma intracluster e lente gravitazionale, anche attraverso la lettura critica di testi avanzati, review e articoli scientifici.
English	LEARNING OUTCOMES: <i>The course contributes to advanced training in Astrophysics and Cosmology within the Master's Degree in Physics. It provides the theoretical and observational tools required to understand the formation, structure and observation of galaxy clusters in the framework of modern cosmology. The course connects the evolution of primordial density perturbations to dark-matter halo formation, intracluster-medium physics, the main cluster observables, and mass determination through galaxy dynamics, hydrostatic equilibrium and gravitational lensing. Particular attention is devoted to the assumptions, approximations and sources of uncertainty and bias involved in connecting observables to mass and cluster populations to cosmological constraints.</i> KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>At the end of the course, students should understand the physical principles governing the growth of cosmological perturbations and the formation of gravitationally bound structures. They should understand the growth factor, matter power spectrum, mass variance, spherical collapse and halo mass function; the thermodynamics and radiative processes of the intracluster medium; X-ray emission, the Sunyaev-Zel'dovich effect, cooling, AGN feedback, shocks and cold fronts; and the foundations of gravitational lensing, including convergence, shear, magnification, critical curves, caustics and flexion.</i> APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: <i>Students should be able to use simple physical models to derive and quantitatively interpret the main properties of galaxy clusters. They should be able to apply the equations describing perturbation growth, spherical collapse, the halo mass function, hydrostatic equilibrium, scaling relations and gravitational lensing; perform order-of-magnitude estimates; interpret graphs and observables; and compare theoretical predictions with measurements.</i> MAKING JUDGEMENTS: <i>Students should be able to critically assess the validity of the approximations used, distinguish between directly observed and model-dependent inferred quantities, and evaluate the roles of intrinsic scatter, observational selection, mass calibration and systematic biases.</i> COMMUNICATION SKILLS: <i>Students should be able to present a problem in galaxy-cluster physics clearly, rigorously and quantitatively, using appropriate scientific terminology and explaining the connection between observables, physical models, equations and inferred physical quantities.</i> LEARNING SKILLS: <i>Students should acquire the conceptual tools required to independently study advanced topics in observational cosmology, structure formation, intracluster plasma physics and gravitational lensing, including the critical reading of advanced textbooks, reviews and research papers.</i>

PREREQUISITI

Italiano	Conoscenze di base di cosmologia relativistica, incluse le equazioni di Friedmann, l'espansione dell'Universo e le principali distanze cosmologiche. Sono inoltre richieste conoscenze di base di gravitazione, meccanica statistica, fluidodinamica e processi radiativi. I concetti fondamentali necessari allo studio della crescita delle perturbazioni cosmologiche saranno richiamati nella parte iniziale del corso. Non sono previsti ulteriori requisiti formali, salvo eventuali propedeuticità stabilite dal Regolamento del Corso di Studio.
English	<i>Basic knowledge of relativistic cosmology, including the Friedmann equations, cosmic expansion and the main cosmological distance measures. Basic knowledge of gravitation, statistical mechanics, fluid dynamics and radiative processes is also required. The fundamental concepts needed for the study of cosmological perturbation growth will be reviewed in the initial part of the course. No additional formal prerequisites are required, except for any prerequisites established by the Degree Programme regulations.</i>

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	PARTE I - FORMAZIONE DELLE STRUTTURE COSMICHE E POPOLAZIONE DEGLI ALONI (10.5 ORE): richiami di cosmologia; crescita lineare delle perturbazioni; fattore di crescita; spettro di potenza, smoothing e varianza di massa; collasso sferico; teoria di Press-Schechter; funzione di massa degli aloni e dipendenza dalla cosmologia. 1. 1.5 h - Dalle fluttuazioni primordiali agli ammassi di galassie. 2. 1.5 h - Background cosmologico per la formazione delle strutture. 3. 1.5 h - Crescita lineare delle perturbazioni di densità. 4. 1.5 h - Spettro di potenza, smoothing e varianza di massa. 5. 1.5 h - Evoluzione non lineare e modello di collasso sferico. 6. 1.5 h - Dalle fluttuazioni di densità alle abbondanze degli aloni: teoria di Press-Schechter. 7. 1.5 h - Funzione di massa degli aloni e cosmologia con gli ammassi. PARTE II - AMMASSI OSSERVABILI, MEZZO INTRACLUSTER E COSMOLOGIA (15 ORE): identificazione ottica e dinamica delle galassie; fisica ed emissione X del mezzo intracluster; equilibrio idrostatico; self-similarity, relazioni di scala e mass proxies; osservazioni X e SZ; raffreddamento, cool cores e feedback da AGN; fusioni, shock e cold fronts; calibrazione della massa, scatter, selezione e bias. 8. 1.5 h - Ammassi nella banda ottica: identificazione, membership e dinamica. 9. 1.5 h - Il mezzo intracluster: fisica di base ed emissione X. 10. 1.5 h - Equilibrio idrostatico e masse degli ammassi. 11. 1.5 h - Self-similarity, relazioni di scala e mass proxies. 12. 1.5 h - Osservazioni X degli ammassi di galassie. 13. 1.5 h - Effetto Sunyaev-Zel'dovich e osservazioni nella banda delle microonde. 14. 1.5 h - Raffreddamento del mezzo intracluster e modello classico di cooling flow. 15. 1.5 h - Dai cooling flows ai cool cores: feedback da AGN e riscaldamento. 16. 1.5 h - Fusioni di ammassi, shock e cold fronts. 17. 1.5 h - Dalle osservabili alla cosmologia: calibrazione della massa, scatter e bias. PARTE III -LENTE GRAVITAZIONALE APPLICATA AGLI AMMASSI (10.5 ORE): deflessione gravitazionale e principio di Fermat; approssimazione di lente sottile; equazione della lente; lenti assialsimmetriche; potenziale, densità superficiale e convergenza; shear, magnification, curve critiche e caustiche; molteplicità delle immagini; lensing di ordine superiore e flexion. 18. 1.5 h - Introduzione alla lente gravitazionale: deflessione della luce e fenomenologia. 19. 1.5 h - Principio di Fermat e deflessione gravitazionale della luce. 20. 1.5 h - Lente generale e approssimazione di lente sottile. 21. 1.5 h - Equazione della lente e lenti assialsimmetriche. 22. 1.5 h - Potenziale di lente, densità superficiale e convergenza. 23. 1.5 h - Magnification e distorsione: shear e curve critiche. 24. 1.5 h - Lensing di secondo ordine, flexion e formazione delle immagini.
English	PART I - COSMOLOGICAL STRUCTURE FORMATION AND HALO POPULATIONS (10.5 HOURS): review of cosmology; linear growth of perturbations; growth factor; matter power spectrum, smoothing and mass variance; spherical collapse; Press-Schechter theory; halo mass function and its cosmological dependence. 1. 1.5 h - From primordial fluctuations to galaxy clusters. 2. 1.5 h - Cosmological background for structure formation. 3. 1.5 h - Linear growth of density perturbations. 4. 1.5 h - Power spectrum, smoothing and mass variance. 5. 1.5 h - From linear to non-linear evolution: the spherical-collapse model. 6. 1.5 h - From density fluctuations to halo abundances: Press-Schechter theory. 7. 1.5 h - The halo mass function and cluster cosmology.

	PART II - OBSERVABLE CLUSTERS, INTRACLUSTER MEDIUM AND COSMOLOGY (15 HOURS): optical identification and galaxy dynamics; intracluster-medium physics and X-ray emission; hydrostatic equilibrium; self-similarity, scaling relations and mass proxies; X-ray and SZ observations; cooling, cool cores and AGN feedback; mergers, shocks and cold fronts; mass calibration, scatter, selection and biases. 8. 1.5 h - Galaxy clusters in the optical: identification, membership and dynamics. 9. 1.5 h - The intracluster medium: basic physics and X-ray emission. 10. 1.5 h - Hydrostatic equilibrium and cluster masses. 11. 1.5 h - Self-similarity, scaling relations and mass proxies. 12. 1.5 h - X-ray observations of galaxy clusters. 13. 1.5 h - The Sunyaev-Zel'dovich effect and microwave observations. 14. 1.5 h - Cooling of the intracluster medium: the classical cooling-flow model. 15. 1.5 h - From cooling flows to cool cores: AGN feedback and heating. 16. 1.5 h - Cluster mergers, shocks and cold fronts. 17. 1.5 h - From observables to cosmology: mass calibration, scatter and biases. PART III - GRAVITATIONAL LENSING BY GALAXY CLUSTERS (10.5 HOURS): gravitational deflection and Fermat's principle; thin-lens approximation; lens equation; axially symmetric lenses; lensing potential, surface density and convergence; shear, magnification, critical curves and caustics; image multiplicity; higher-order lensing and flexion. 18. 1.5 h - Introduction to gravitational lensing: light deflection and lensing phenomena. 19. 1.5 h - Fermat's principle and gravitational deflection of light. 20. 1.5 h - The general lens and the thin-lens approximation. 21. 1.5 h - The lens equation and axially symmetric lenses. 22. 1.5 h - Lensing potential, surface density and convergence. 23. 1.5 h - Magnification and distortion: shear and critical curves. 24. 1.5 h - Second-order lensing, flexion and the occurrence of images.
--	---

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	MATERIALE PRINCIPALE: dispense, slide e materiale didattico forniti dal docente. TESTI CONSIGLIATI: N. Vittorio, <i>Cosmology</i>, CRC Press, ISBN 978-1498731324. M. Meneghetti, <i>Introduction to Gravitational Lensing: With Python Examples</i>, Springer, ISBN 978-3-030-73581-4. BIBLIOGRAFIA DI APPROFONDIMENTO: G. M. Voit (2005), <i>Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies</i>; A. V. Kravtsov & S. Borgani (2012), <i>Formation of Galaxy Clusters</i>; M. Markevitch & A. Vikhlinin (2007), <i>Shocks and cold fronts in galaxy clusters</i>; J. R. Peterson & A. C. Fabian (2006), <i>X-ray spectroscopy of cooling clusters</i>; A. C. Fabian (2012), <i>Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback</i>; W. H. Press & P. Schechter (1974); R. K. Sheth & G. Tormen (1999); J. Tinker et al. (2008); G. L. Bryan & M. L. Norman (1998).
English	MAIN TEACHING MATERIAL: lecture notes, slides and teaching material provided by the instructor. RECOMMENDED TEXTBOOKS: N. Vittorio, <i>Cosmology</i>, CRC Press, ISBN 978-1498731324. M. Meneghetti, <i>Introduction to Gravitational Lensing: With Python Examples</i>, Springer, ISBN 978-3-030-73581-4. FURTHER READING: G. M. Voit (2005), <i>Tracing cosmic evolution with clusters of galaxies</i>; A. V. Kravtsov & S. Borgani (2012), <i>Formation of Galaxy Clusters</i>; M. Markevitch & A. Vikhlinin (2007), <i>Shocks and cold fronts in galaxy clusters</i>; J. R. Peterson & A. C. Fabian (2006), <i>X-ray spectroscopy of cooling clusters</i>; A. C. Fabian (2012), <i>Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback</i>; W. H. Press & P. Schechter (1974); R. K. Sheth & G. Tormen (1999); J. Tinker et al. (2008); G. L. Bryan & M. L. Norman (1998).

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

Italiano	L'insegnamento è organizzato in 24 lezioni frontali in presenza, ciascuna della durata di 1.5 ore, con uso integrato della lavagna e di materiale didattico proiettato. Le lezioni comprendono derivazioni analitiche, esempi quantitativi, stime d'ordine di grandezza e interpretazione di dati, immagini e grafici osservativi. Sono inoltre proposte brevi domande concettuali, attività di peer instruction, esercizi e problemi di sintesi per verificare la comprensione e sviluppare la capacità di applicare i modelli fisici. Particolare attenzione è dedicata alla sequenza osservabile - modello fisico - equazione - inferenza - verifica osservativa. Il materiale didattico utilizzato durante il corso è reso disponibile agli studenti.
<i>English</i>	<i>The course consists of 24 face-to-face lectures, each lasting 1.5 hours, combining blackboard derivations with projected teaching material. Lectures include analytical derivations, quantitative examples, order-of-magnitude estimates, and interpretation of observational data, images and graphs. Short conceptual questions, peer-instruction activities, exercises and synthesis problems are used to assess understanding and develop the ability to apply physical models. Particular emphasis is placed on the sequence observable - physical model - equation - inference - observational test. Teaching material used during the course is made available to students.</i>

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Le lezioni si svolgono in presenza. La frequenza non è obbligatoria ma è fortemente consigliata, in particolare per le attività di discussione, gli esercizi quantitativi e l'interpretazione di grafici e osservazioni svolti durante le lezioni.
<i>English</i>	<i>Classes are held face-to-face. Attendance is not compulsory but is strongly recommended, particularly for discussion activities, quantitative exercises and the interpretation of graphs and observations carried out during the 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

Pasquale Mazzotta (docente responsabile); ulteriori componenti secondo la nomina ufficiale del Corso di Studio.

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	L'esame consiste in una prova orale e riguarda l'intero programma dell'insegnamento. Durante la prova lo studente sarà chiamato a discutere concetti fisici e osservativi trattati nel corso, a esplicitare le assunzioni alla base dei modelli utilizzati, a ricavare o discutere brevi relazioni quantitative, a effettuare stime d'ordine di grandezza e a interpretare grafici, schemi o risultati osservativi. La prova verifica la comprensione dei principi fisici, la capacità di collegare teoria e osservazioni, la correttezza del ragionamento quantitativo, la capacità di individuare le approssimazioni utilizzate e i loro limiti e l'uso appropriato del linguaggio scientifico. La valutazione finale è espressa in trentesimi. Non idoneo: importanti carenze e/o inaccurately nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitata capacità di analisi e sintesi e difficoltà nel collegare concetti teorici e osservativi.
-----------------	--

	18-20: conoscenza e comprensione degli argomenti appena sufficienti, con possibili imperfezioni; capacità di analisi, sintesi e autonomia di giudizio sufficienti. 21-23: conoscenza e comprensione degli argomenti a livello discreto; capacità di analisi e sintesi corrette e argomentazione logicamente coerente. 24-26: buona conoscenza e comprensione degli argomenti; buona capacità di analisi quantitativa e di collegamento tra modelli fisici e osservazioni; argomentazione rigorosa. 27-29: conoscenza e comprensione complete; notevole capacità di analisi e sintesi; buona autonomia di giudizio e capacità di riconoscere criticamente assunzioni, approssimazioni e limiti dei modelli. 30-30 e lode: eccellente livello di conoscenza e comprensione; notevole capacità di analisi quantitativa, sintesi e autonomia di giudizio; capacità di stabilire collegamenti originali tra differenti aspetti del corso e di esporre con particolare chiarezza e rigore.
English	<i>The examination consists of an oral test covering the entire course programme. Students will be asked to discuss physical and observational concepts addressed in the course, explain the assumptions underlying the models used, derive or discuss short quantitative relations, perform order-of-magnitude estimates, and interpret graphs, diagrams or observational results. The examination assesses the understanding of the underlying physical principles, the ability to connect theoretical models with observations, the correctness of quantitative reasoning, the ability to identify approximations and their limitations, and the appropriate use of scientific terminology. The final assessment is expressed on a 30-point scale.</i> <i>Fail: major deficiencies and/or inaccuracies in the knowledge and understanding of the topics; limited analytical and synthesis skills and difficulty in connecting theoretical and observational concepts.</i> <i>18-20: barely sufficient knowledge and understanding of the topics, with possible imperfections; sufficient analytical, synthesis and judgement skills.</i> <i>21-23: fair knowledge and understanding of the topics; correct analytical and synthesis skills and logically consistent reasoning.</i> <i>24-26: good knowledge and understanding of the topics; good quantitative reasoning and ability to connect physical models with observations; rigorous argumentation.</i> <i>27-29: complete knowledge and understanding of the topics; strong analytical and synthesis skills; good independent judgement and ability to critically identify assumptions, approximations and limitations of the models.</i> <i>30-30 cum laude: excellent knowledge and understanding; outstanding quantitative reasoning, synthesis and independent judgement; ability to establish original connections between different aspects of the course and to present arguments with particular clarity and rigour.</i>