DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Struttura ed evoluzione stellare

Stellar structuree and evolution

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	**CdS**	FISICA (LM-17)
Codice		**Canale**	Unico
CFU	6	**Lingua**	Italiano

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Giuseppe Bono

CODOCENTE

Nessun Codocente

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: Il corso di studio è volto a fornire una preparazione avanzata di Fisica, con conoscenze di argomenti specialistici della recente ricerca in ambito Astrofisico. Gli obiettivi formativi prevedono la conoscenza avanzata di fisica quantistica e di struttura della materia. L'obiettivo principale del corso di Astrofisica Stellare è di fornire allo studente le conoscenze di fisica di base necessarie per la comprensione della formazione ed evoluzione delle strutture stellari. Queste conoscenze sono fondamentali non solo per comprendere l'evoluzione della componente barionica dell'Universo ma anche per tracciare la sua evoluzione chimica. Il corso di Stellar Structure and Evolution e' propedeutico non solo per gli studenti interessati a comprendere l'Universo locale ma anche per quelli interessati all'evoluzione su grande scala dell'Universo, ai modelli cosmologici e agli oggetti compatti (buchi neri stellari, stelle di neutroni, nane bianche). CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Gli studenti alla fine del semestre avranno acquisito una conoscenza dettagliata sulle equazione di conservazione (momento, massa, energia) degli interni stellari e dell'equazione del trasporto nei regimi radiativi, conduttivi e convettivi. Saranno inoltre a conoscenza dei meccanismi di micro (equazione di stato, opacità, degenerazione elettronica, reazioni nucleari) e di macro (rotazione, perdita di massa, trasporto convettivo, evoluzione chimica) fisica che governano la formazione e l'evoluzione delle strutture stellari. Queste conoscenze consentiranno agli studenti di comprendere le fasi di bruciamento di idrogeno di elio e le fasi evolutive avanzate per stelle di massa piccola intermedia e massicce. Gli studenti saranno

inoltre in grado di utilizzare il piano fondamentale delle stelle (diagramma di Hertzsprung Russell) per mappare le varie fasi evolutive e il suo uso per la comprensione delle popolazioni stellari risolte.

CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPRENSIONE:

Gli studenti alla fine del corso avranno acquisito le conoscenze di fisica dell'evoluzione stellare che gli consentiranno di affrontare e risolvere un ampio spettro di problemi di astrofisica stellare. Nello specifico gli studenti saranno in grado di determinare le età assolute e relative degli ammassi globulari, di stimare le abbondanze chimiche (elio primordiale, metallicità) e di determinare le distanze cosmiche utilizzando indicatori primari di distanza. Gli studenti avranno inoltre una conoscenza dettagliata di come gli errori di ripetibilità e gli errori sistematici influenzano la stima dei parametri astrofisici e cosmologici.

AUTONOMIA DI GIUDIZIO:

Agli studenti oltre all'esame orale in cui viene verificato lo stato delle conoscenze sulla fisica degli interni stellari viene anche richiesto un elaborato scritto su un progetto specifico. Questo elaborato può essere sviluppato individualmente o in piccoli gruppi. Per lo svolgimento di questo progetto viene chiesto allo studente di effettuare delle scelte critiche a proposito dei dati osservativi (Gaia, Hubble Space Telescope, ground based telescopes) e delle predizioni teoriche (isocrone stellari, funzioni di luminosità, diagrammi colore-magnitudine sintetici), disponibili in rete, necessarie allo svolgimento del progetto. Inoltre dal confronto tra le predizioni teoriche e i dati osservativi lo studente acquisirà una notevole capacità di giudizio critico su come le incertezze osservative e teoriche influenzano la stima dei parametri astrofisici/cosmologici e di conseguenza sulle scelte strategiche e metodologiche effettuate per affrontare il progetto.

ABILITÀ COMUNICATIVE:

Allo studente viene chiesto di discutere oralmente lo stato delle sue conoscenze sulla fisica di base degli interni stellari. Questo implica una notevole capacità di sintesi e collegamento tra i due moduli principali del corso (la parte di fisica di base rispetto a quella applicata alle diverse fasi evolutive). Allo studente viene anche chiesto di presentare un elaborato scritto sul progetto che svolgerà. In questo elaborato è necessario effettuare una ricerca bibliografica, preparare delle figure, delle tabelle e una dettagliata analisi degli errori che gli consentiranno di acquire le conoscenze necessarie ad affrontare e risolvere problemi generici.

CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO:

Lo studente durante il corso acquisisce le conoscenze necessarie su cui sviluppare una futura carriera nel campo dell'Astrofisica Stellare (popolazioni stellari risolte) e/o

	dell'evoluzione su grande scala dell'Universo (popolazioni non risolte) e/o nella stima dei parametri cosmologici. Questo implica delle opportunità uniche non solo per un dottorato di ricerca ma anche per le opportunità di lavoro su big data ed attività spaziali.
English	LEARNING OUTCOMES: The master is aimed at providing an advanced preparation on Physics, with a detailed knowledge of the key topics in the recent research in Astrophysics. The learning outcomes rely on a detailed knowledge of quantum mechanics and solid state physics. The main objective of the course in Stellar Astrophysics is to provide to the student the knowledge of the basic physics required to understand the formation and evolution of stellar structures. This knowledge is fundamental to understand not only the evolution of the baryonic content of the Universe, but also to trace its chemical evolution. These concepts are a stepping stone not only for the students interested in understanding the local Universe, but also for those interested in the large scale structure of the Universe in cosmological models and in compact objects (stellar mass black holes, neutron stars, white dwarfs). KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: The student at the end of the semester will acquire a detailed knowledge on the energy conservation equations (momentum, mass, energy) of stellar interiors and of the trasnport equation (radiation, conduction, convection). Moreover, the student will acquire solid knowledge on micro (equation of state, opacity, electron degeneracy, nuclear reactions) and macro (rotation, mass loss, convective transport, chemical evolution) physics driving the formation and the evolution of stellar structures. This knowledge will allow the students to fully understand the hydrogen-, helium-burning and advanced evolutionary phases for low-, intermediate- and massive stars. The sudent will be able to fully exploit the fundamental plane for stars (Hertzsprung Russell diagram) to trace the different evolutionary phases and its use to understand resolved stellar populations. APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING: The student at the end of the semester will acquire the knowledge of stellar evolution physics to attack and solve a broad range of stellar astrophysical problems. To be more specific, the student will be able to estimate the absolute and relative age of globular clusters, to estimate the chemical abundances (primordial helium, metallicity) and to measure cosmic distances by using primary distance indicators. Moreover, the student will have a detailed knowledge of the impact that

	intrinsic and systematic errors affect the estimate of astrophysical and cosmological parameters. MAKING JUDGEMENTS: The students will take an oral exam aimed at verify the knowledge of stellar evolution physics together with a written report concerning a specific project. The written report can be done either individually or in small groups. To undertake the project, the students are requested to perform several critical choices concerning the empirical data (Gaia, Hubble Space Telescope, ground based telescopes) and the theoretical predictions (stellar isochrones, luminosity functions, synthetic color-mgnitude diagrams) available on the web. Moreover, the students, in dealing with the comparison between theory and observations, will acquire a substantial critical judgement concerning empirical and theoretical uncertainties affecting the estimate of astrophysical/cosmological parameters and in turn, on the strategic and methodological choices to undertake the project. COMMUNICATION SKILLS: The student is requested to take an oral exam to verify the knowledge acquired on the basic physics of stellar interiors. This requires a relevant effort to summarize the entire programm and to link the two main moduls of the course (basic physics for stellar interiors, application to the different evolutionary phases). The student is also requested to submit, before the exam, a written report on a specific project. LEARNING SKILLS: The student during the course will acquire the knowledge required to build up a research activity in stellar Astrophysics (resolved stellar populations) and/or on the large scale structure of the Universe (un-resolved stellar populations) and/or in the estimate of astrophysical/cosmological parameters. This means unique opportunities not only for a PhD, but also job opportunities concerning space activity and big data.

PREREQUISITI

Italiano	E' indispensabile che lo studente sia già in possesso di una conoscenza dettagliata di

	meccanica quantistica (interazione materia radiazione, sezioni d'urto, reazioni nucleari, equazione di Boltzmann e di Saha) e di struttura della materia (degenerazione elettronica, Debye radius, effetti Coulombiani, cristallizzazione). Sarebbe importante che lo studente fosse anche a conoscenza dei metodi numerici utilizzati per la soluzione delle equazioni differenziali. Sarebbe inoltre molto utile che lo studente fosse anche stato esposto ad un corso di trasporto radiativo e dei meccanismi di formazione di uno spettro stellare.
English	*It is mandatory that the student has a solid knowledge of quantum mechanics (interaction between matter and radiation, cross sections, nuclear reactions, Boltzmann and Saha equations) and of solid state physics (electron degeneracy, Debye radius, Coulomb effect, crystallization). It is important that the students has already acquired some knowledge of the numerical methods adopted to solve differential equations. It would be also quite useful that the student has already been exposed to a course of radiative transfer focused on the formation of stellar spectra..*

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	1. Strutture Stellari: scenario empirico 1.1 Sferoide Galattico e popolazioni stellari 1.2 Sistemi stellari 1.3 Distribuzioni di metallicità 1.4 Proprietà cinematiche 2. Strutture Stellari: scenario teorico 2.1 Equazioni degli interni stellari (momento, massa, energia) 2.2 Equazione del Trasporto: radiazione, conduzione 2.3 Il criterio di Schwarzschild e di Ledoux ed il trasporto convettivo 2.4 Teoria della lunghezza di rimescolamento 2.5 Inviluppi ed atmosfere stellari 3. Condizioni fisiche della materia stellare 3.1 Equazione di stato 3.2 Opacità radiative e molecolari 3.3 Generazione di energia e reazioni nucleari

	4. Soluzione delle equazioni degli interni stellari 4.1 Soluzioni analitiche 4.2 Teorema del viriale e degenerazione elettronica 4.3 Condizioni iniziali e condizioni al bordo 4.4 Equazione di Saha ed evoluzione degli elementi chimici 5. Formazione stellare 5.1 Jeans mass e formazione stellare 5.2 Strutture stellari completamente convettive: traccia di Hayashi 5.3 L'approccio alla fase di combustione centrale di Idrogeno 6. Le fasi di bruciamento di idrogeno 6.1 La catena p-p 6.2 Il bi-ciclo CN-NO 6.3 La sequenza principale (MS) in stelle di massa piccola, intermedia e massicce 6.4 Il modello solare standard 6.5 La relazione Massa-Luminosità 6.6 Il limite di Schoönberg-Chandrasekhar 6.7 Il Ramo delle sotto giganti e delle giganti rosse (RGB) 6.8 Il tip dell'RGB e il flash centrale dell'elio 7. La fase di bruciamento dell'elio 7.1 Le reazioni nucleari 7.2 Il ramo orizzontale di età zero (ZAHB) 7.3 La fase di combustione centrale di He in stelle di massa piccola intermedia e massicce 8. Le fasi evolutive avanzate 8.1 Il Ramo Asintotico delle Giganti (AGB)

	8.2 Il limite di Chandrasekhar 8.3 Nane bianche di Carbonio-Ossigeno ed Elio 8.4 Fasi evolutive avanzate in stelle massicce: Supernovae 8.5 Stelle di neutroni e buchi neri stellari 9. Osservabili stellari di interesse cosmologico 9.1 L'abbondanza primordiale di He 9.2 Età assolute e relative degli ammassi globulari 9.3 La striscia di instabilità delle Cefeidi 9.3 Indicatori di distanza primari e secondari 9.4 La costante di Hubble
English	*1. Stellar Structures: empirical scenario* *1.1 Galactic spheroid and stellar populations* *1.2 Stellar systems* *1.3 Metallicity distributions* *1.4 Kinematic properties* *2. Stellar Structures: theoretical framework* *2.1 Equations of stellar interiors (mass, momentum, energy)* *2.2 Radiative and conductive transport equations* *2.3 Convective transport equation: Schwarzschild and Ledoux criteria* *2.4 Mixing length theory* *2.5 Stellar envelopes and atmospheres* *3. Physical conditions in stellar interiors* *3.1 Equation of state* *3.2 Radiative and molecular opacities* *3.3 Energy generation and uclear reactions* *4. Solutions of the equations for stellar interiors* *4.1 Analytical solutions* *4.2 Virial theorem and electron degeneracy* *4.3 Initial conditions and boundary conditions* *4.4 Saha equation and evolution of chemical elements* *5. Star formation* *5.1 Jeans mass and star formation* *5.2 Strutture stellari completamente convettive: Hayashi track*

	5.3 Approach to the central hydrogen burning phase *6. Hydrogen burning phases* *6.1 The p-p chain* *6.2 The bi-cycle CN-NO* *6.3 The Main Sequence (MS) in low-, intermediate- and massive stars* *6.4 Standard solar model* *6.5 The Mass-Luminosity relation* *6.6 The Schoönberg-Chandrasekhar limit* *6.7 The sub giant branch and the red giant branch (RGB)* *6.8 The Tip of the RGB and the central Helium flash* *7. Helium burning phases* *7.1 Nuclear reactions* *7.2 The Zero Age Horizonthal Branch (ZAHB)* *7.3 Central Helium burning phase in low-, intermediate- and massive stars* *8. Advanced evolutionary phases* *8.1 Asymptotic giant Branch (AGB)* *8.2 Chandrasekhar limit* *8.3 Carbon/Oxygen and helium core white dwarfs* *8.4 Advanced evolutionary phases in massive stars: Supernovae* *8.5 Neutron stars and stellar mass Black Holes* *9. Stellar observables of cosmological interest* *9.1 Primordial helium content* *9.2 Absolute and relative ages of globular clusters* *9.3 The Cepheid instability strip* *9.3 Primary and secondary distance indicators* *9.4 The Hubble Constant*

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	Evolution of Stars and Stellar Populations by Salaris & Cassisi Old Stellar Populations by S. Cassisi & M. Salaris, Wiley-VCH Stellar Interiors, by C.J. Hansen, S.D. Kawaler & V. Trimble, Springer
English	Evolution of Stars and Stellar Populations by Salaris & Cassisi Old Stellar Populations by S. Cassisi & M. Salaris, Wiley-VCH Stellar Interiors, by C.J. Hansen, S.D. Kawaler & V. Trimble, Springer

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☒ A distanza

Italiano	I due moduli principali del corso (fisica di base degli interni stellari, differenti fasi evolutive) si basano su didattica frontale. Il corso richiede la conoscenza di un ampio spettro di principi fisici di base. Per agevolare gli studenti nella comprensione delle assunzioni fisiche adottate per calcolare un modello evolutivo il corso viene tenuto interamente alla lavagna. Ovvero senza l'ausilio di presentazioni elettroniche. Per quanto riguarda l'elaborato scritto vengono offerti, agli studenti divisi in piccoli gruppi, diversi tutorials che gli consentano di familiarizzare con i siti web da cui scaricare i dati osservativi da terra e dallo spazio e le predizioni teoriche. Vengono inoltre guidati nei diversi passi richiesti per effettuare una corretta propagazione degli errori nella stima dei parametri astrofisici/cosmologici.
English	*. The two main modules of the course (basic physics of stellar interiors, different stellar evolutionary phases) rely on frontal teaching. The course requires the knowledge of a broad range of basic physical principles. To help the students in understanding the physical assumptions adopted to construct a stellar evolution model the course is entirely given to the blackboard, i.e. without the support of power point presentations.* *The students, concerning the written report are requested to attend a few tutorials to introduce them to the web sites from which they can download either data (space, ground based) or evolutionary prescriptions. Moreover, they are introduced to the different methods adopted to propagate the errors (intrinsic systematic) affecting the estimate of astrophysical/cosmological parameters.*

MODALITÀ DI FREQUENZA

☒ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Gli studenti sono tenuti a partecipare alle lezioni frontali che verranno impartite durante il semestre. Inoltre dovranno partecipare alle lezioni supplementari che verranno dedicate al progetto che verrà loro richiesto per la valutazione dell'esame.
English	Students are requested to attend the lectures given during the semester. Moreover, they are also requested to attend the lectures focussed on the project they have to prepare for the final exam.

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

Giuseppe Bono, Valentina D'Orazi, altri docenti

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	L'esame finale si basa su due tipologie indipendenti di verifica dell'apprendimento. a) Un esame orale il cui obiettivo e' quello di verificare che lo stato delle conoscenze che lo studente ha conseguito durante il semestre della fisica dell'evoluzione stellari. In particolare, viene richiesta una conoscenza dettagliata dei meccanismi di micro (equazione di stato, opacità, degenerazione elettronica, reazioni nucleari) e di macro (rotazione, perdita di massa, trasporto convettivo, evoluzione chimica) fisica che governano la formazione e l'evoluzione delle strutture stellari. Verrà inoltre richiesto come e quando questi meccanismi fisici influenzano le fasi di bruciamento di idrogeno, elio e le fasi evolutive finali di stelle di massa piccola, intermedia e massicce. Verrà inoltre richiesta una certa padronanza nel mappare le diverse fasi evolutive nel piano fondamentale delle strutture stellari (diagramma di Hertzsprung Russell, diagramma colore magnitudine). b) Elaborato scritto di un progetto, svolto individualmente o in gruppo, il cui obiettivo è quello di verificare che lo studente abbia compreso la fisica dell'evoluzione stellare e che sia in grado di applicarla per affrontare e risolvere un problema di astrofisica stellare. I progetti proposti spaziano dalla determinazione delle età assolute e relative degli ammassi globulari, alla stima dell'elio primordiale e/o della metallicità, alla determinazione delle distanze cosmiche utilizzando indicatori primari di distanza. Un aspetto determinante della valutazione del progetto è la comprensione che lo studente ha conseguito della stima dei vari parametri astrofisici/cosmologici e come i medesimi vengono influenzate da errori di ripetibilità e sistematici. Alla valutazione finale concorrono non solo le prove a) e b) ma anche la frequenza e la partecipazione attiva alle lezioni e al progetto.
English	*The final exam is based on two independent types of learning assessment.* *a) An oral exam aimed to verify the knowledge of stellar evolution physics that the student accomplished during the semester. In particular, it is requested a detailed knowledge of micro (equation of state, opacity, electron degeneracy, nuclear reactions) and macro (rotation, mass loss, convective transport, chemical evolution) physics driving the formation and evolution of stellar structures. Moreover, it is also requested to know how and when these physical mechanisms affects hydrogen, helium and advanced evolutionary phases of low-, intermediate and massive stars. The student is also requested to master the mapping of the different evolutionary phases in the fundamental plane of stellar structures (Hertzsprung Russell diagram, color-magnitude diagram).* *b) Report of a project written either alone or in a small group aimed at verify that the student understood stellar evolution physics and that he is able to attack and to solve stellar astrophysics problems. The proposed projects range from the estimate of absolute and relative globular cluster ages, to the estimate of primordial helium abundance and/or of metallicity, to the determination of cosmic distances using primary distance indicators. A key*

	issue in the evaluation of the project is the knowledge that the student accomplished in the estimate of astrophysical/cosmological parameters and the impact that intrinsic and systematic errors have on their determination. *The final evaluation of the exam is based on tests a) and b) together with the participation to the lectures and to the project.*