

**DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

**RELATIVITÀ E COSMOLOGIA**

RELATIVITY AND COSOLOGY

**INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

|               |           |               |                                                                                         |
|---------------|-----------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A.A.</b>   | 2026-2027 | <b>CdS</b>    | FISICA (LM-17) (mutuato dalla LM in Fisica --> curr. in Astrophysics and Space Science) |
| <b>Codice</b> | 8068183   | <b>Canale</b> | Unico                                                                                   |
| <b>CFU</b>    | 6         | <b>Lingua</b> | Inglese                                                                                 |

**DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA**

**Marina Migliaccio**

**CODOCENTE**

Modulo:

**OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI**

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Italiano</b> | <p><b>OBIETTIVI FORMATIVI:</b></p> <p>Conoscenza della relatività generale classica e degli strumenti del calcolo tensoriale ad essa necessari. Acquisizione di competenze specifiche, mirate alla risoluzione di alcuni problemi in relatività generale. Conoscenza delle problematiche che richiedono una trattazione general-relativistica (collasso gravitazionale, effetto di lente gravitazionale, onde gravitazionali, cosmologia teorica) e delle osservazioni che consentono di validarne la loro trattazione teorica. Sviluppo di competenze volte alla predizione di osservabili di interesse per l'astrofisica e la cosmologia moderna.</p> <p><b>CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPrensIONE:</b></p> <p>Il corso offre una base di formazione teorica, necessaria per acquisire tutti gli strumenti matematici richiesti. Gli studenti devono inoltre maturare una approfondita comprensione degli aspetti osservativi che convalidano lo sviluppo della parte teorica. Si richiede che lo studente abbia la conoscenza del programma svolto durante il corso, ma anche l'abilità di effettuare collegamenti logici tra le diverse parti del corso e con elementi già acquisiti in altri corsi.</p> <p><b>CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPrensIONE:</b></p> <p>Il corso prevede una formazione teorica di base, necessaria per acquisire tutti gli strumenti matematici necessari. Si pone poi molta attenzione agli aspetti osservativi che validano lo sviluppo teorico. Si richiede che lo studente sia in grado di maneggiare gli strumenti matematici per arrivare a formulare specifiche previsioni per alcuni osservabili. Questa stretta</p> |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <p>interconnessione tra strumento matematico e osservazioni consente allo studente di raggiungere una piena comprensione del contenuto del corso, anche per quel che riguarda le sue parti più formali.</p> <p><b>AUTONOMIA DI GIUDIZIO:</b></p> <p>Gli studenti devono essere in grado di ricavare autonomamente i principali risultati presentati a lezione e le dimostrazioni, effettuando le approssimazioni necessarie e riconoscendone i limiti di validità. Il corso prevede l'utilizzo di alcuni di libri di testo, cercando di sottolineare la complementarietà di approcci diversi alle tematiche in oggetto. Oltre ai libri, per alcuni specifici argomenti più di punta, sono forniti allo studente articoli scientifici e/o di rassegna per abituarlo ad una lettura meno scolastica e più orientata alla ricerca.</p> <p><b>ABILITÀ COMUNICATIVE:</b></p> <p>Gli studenti devono essere in grado di esporre in modo chiaro e corretto gli argomenti del programma. Devono essere inoltre in grado di presentare senza ambiguità il processo logico e le conclusioni dell'analisi di un problema fisico.</p> <p><b>CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO:</b></p> <p>Il contenuto del corso copre aspetti diversi che vanno dalla relatività generale, alla meccanica statistica, alla fisica nucleare e alla fisica del plasma, e con diverse tecniche che trovano applicazione anche in altri campi della fisica. L'esposizione a questi argomenti favorisce lo sviluppo di capacità di apprendimento trasversali e di adattamento a nuovi problemi scientifici.</p> |
| English | <p><b>LEARNING OUTCOMES:</b></p> <p>Knowledge of classical general relativity and of the tensor calculus tools required for its formulation. Acquisition of specific skills aimed at solving selected problems in general relativity. Understanding of the issues that require a general-relativistic treatment (gravitational collapse, gravitational lensing, gravitational waves, theoretical cosmology) and of the observations that validate their theoretical description. Development of skills aimed at predicting observables of interest in modern astrophysics and cosmology.</p> <p><b>KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING:</b></p> <p>The course provides a theoretical background necessary to acquire all the required mathematical tools. Students are also expected to develop a thorough understanding of the observational aspects that validate the theoretical framework. Students are required not only to master the material covered during the course, but also to be able to establish logical connections among the different parts of the course and with concepts previously acquired in other courses.</p> <p><b>APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING:</b></p> <p>The course provides foundational theoretical training necessary to acquire all the required mathematical tools. Considerable emphasis is also placed on the observational aspects that</p>                                                                                                                                                                                      |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>validate the theoretical developments. Students are expected to be able to handle the mathematical tools needed to formulate specific predictions for selected observables. This close interplay between mathematical formalism and observations enables students to achieve a full understanding of the course content, including its more formal aspects.</p> <p><b>MAKING JUDGEMENTS:</b></p> <p>Students are expected to be able to independently derive the main results and proofs presented during the lectures, carrying out the necessary approximations and recognizing their limits of validity. The course makes use of several textbooks, highlighting the complementarity of different approaches to the topics under consideration. In addition to textbooks, for some advanced topics students are provided with scientific and/or review articles in order to familiarize them with a style of reading that is less textbook-oriented and more research-oriented.</p> <p><b>COMMUNICATION SKILLS:</b></p> <p>Students are expected to be able to present the topics covered in the course clearly and correctly. They should also be able to explain unambiguously the logical process and conclusions involved in the analysis of a physical problem.</p> <p><b>LEARNING SKILLS:</b></p> <p>The course content covers a variety of topics ranging from general relativity to statistical mechanics, nuclear physics, and plasma physics, and introduces several techniques that also find applications in other areas of physics. Exposure to these topics fosters the development of transferable learning skills and the ability to adapt to new scientific problems.</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## PREREQUISITI

|          |                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------|
| Italiano | Geometria, Calcolo, Fisica Generale e Relatività Ristretta. |
| English  | Geometry, Calculus, General Physics, Special Relativity.    |

## PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Richiami di calcolo tensoriale, moto geodetico e applicazioni (4 ore)</i></li> <li>- <i>Derivazione covariante, il tensore di curvatura di Riemann-Christoffel (4 ore)</i></li> <li>- <i>Principio di equivalenza e test osservativi, equazioni di campo nel vuoto (4 ore)</i></li> <li>- <i>La soluzione di Schwarzschild: moto planetario, deflessione della luce, lenti gravitazionali, coordinate isotrope e Shapiro time-delay (8 ore)</i></li> <li>- <i>Gravità linearizzata per campi scalari e tensoriali, onde gravitazionali (4 ore)</i></li> <li>- <i>Tensore energia-impulso, equazione di campo in presenza di materia, e leggi di conservazione (2 ore)</i></li> <li>- <i>Black holes and Kruskal coordinates (2 ore)</i></li> </ul> |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Mettrica di Lemaître-Tolman-Bondi, mettrica di Friedmann-Robertson-Walker, equazioni di Friedmann (6 ore)</i></li> <li>- <i>Distanze in Cosmologia, Modelli e parametri cosmologici (6 ore)</i></li> <li>- <i>Modello del Big Bang Caldo e inflazione (8 ore)</i></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| English | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Review of tensor calculus, geodesic motion, and applications (4 hours)</i></li> <li>- <i>Covariant derivative, the Riemann–Christoffel curvature tensor (4 hours)</i></li> <li>- <i>Equivalence principle and observational tests, vacuum field equations (4 hours)</i></li> <li>- <i>The Schwarzschild solution: planetary motion, light deflection, gravitational lensing, isotropic coordinates and the Shapiro time delay (8 hours)</i></li> <li>- <i>Linearized gravity for scalar and tensor fields, gravitational waves (4 hours)</i></li> <li>- <i>Energy-momentum tensor, field equations in the presence of matter, and conservation laws (2 hours)</i></li> <li>- <i>Black holes and Kruskal coordinates (2 hours)</i></li> <li>- <i>Lemaître–Tolman–Bondi metric, Friedmann–Robertson–Walker metric, Friedmann equations (6 hours)</i></li> <li>- <i>Distances in cosmology, cosmological models and parameters (6 hours)</i></li> <li>- <i>The hot Big Bang model and inflation (8 hours)</i></li> </ul> |

#### TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | <p>Vittorio, N. "An overview of General Relativity and Space Time, 2022, CRC Press</p> <p>Vittorio, N. "General Relativity: Analytical and Symbolic Problems with Mathematica, 2025, CRC Press</p> <p>S. Carroll, Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity, Addison-Wesley</p> <p>Vittorio, Cosmology, CRC Press</p> |
| English  | <p>Vittorio, N. "An overview of General Relativity and Space Time, 2022, CRC Press</p> <p>Vittorio, N. "General Relativity: Analytical and Symbolic Problems with Mathematica, 2025, CRC Press</p> <p>S. Carroll, Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity, Addison-Wesley</p> <p>Vittorio, Cosmology, CRC Press</p> |

#### DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

|          |                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | Il corso si articola in lezioni frontali presentate alla lavagna o con slide. |
| English  | The course consists of lectures presented on the blackboard or with slides.   |

### MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria      ☒ frequenza facoltativa

### DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

|          |                                                                                                                           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | La frequenza al corso è facoltativa, benché gli studenti siano fortemente incoraggiati a frequentare le lezioni.          |
| English  | <i>The attendance to the course is not compulsory, although we strongly encourage the students to attend the classes.</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

Marina Migliaccio, Nicola Vittorio

### DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Italiano | <p>La valutazione prevede una prova orale in cui lo studente dovrà rispondere a diverse domande sugli argomenti del programma, avvalendosi anche della lavagna per riprodurre le dimostrazioni.</p> <p>La prova di esame sarà valutata secondo i seguenti criteri:</p> <p>Non idoneo: importanti carenze e/o inaccurately nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitate capacità di analisi e sintesi, frequenti generalizzazioni.</p> <p>18-20: conoscenza e comprensione degli argomenti appena sufficiente con possibili imperfezioni; capacità di analisi, sintesi e autonomia di giudizio sufficienti.</p> <p>21-23: Conoscenza e comprensione degli argomenti routinaria; Capacità di analisi e sintesi corrette con argomentazione logica coerente.</p> <p>24-26: Discreta conoscenza e comprensione degli argomenti; buone capacità di analisi e sintesi con argomentazioni espresse in modo rigoroso.</p> <p>27-29: Conoscenza e comprensione degli argomenti completa; notevoli capacità di analisi, sintesi. Buona autonomia di giudizio.</p> <p>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.</p> |
| English  | <p><i>The assessment consists of an oral exam in which the student will have to answer several questions on the topics of the program, also using the blackboard to derive the proofs.</i></p> <p><i>The examination will be evaluated according to the following criteria:</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><i>Ineligible: major deficiencies and/or inaccuracy in knowledge and understanding of topics; limited analytical and synthesis skills, frequent generalizations.</i></p> <p><i>18-20: knowledge and understanding of topics only sufficient with possible imperfections; analytical skills, synthesis and judgment autonomy just sufficient.</i></p> <p><i>21-23: knowledge and understanding of topics at a basic level; Correct analysis and synthesis skills with consistent logical reasoning.</i></p> <p><i>24-26: Fair knowledge and understanding of the topics; good analytical and synthesis skills with rigorous arguments.</i></p> <p><i>27-29: Complete knowledge and understanding of the topics; remarkable ability of analysis, synthesis. Good autonomy of judgment.</i></p> <p><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></p> |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|