DENOMINAZIONE INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Onde Gravitazionali

Gravitational Waves

INFORMAZIONI INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

A.A.	2026-2027	**CdS**	FISICA (LM-17)
Codice	8068799	**Canale**	Unico
CFU	6	**Lingua**	Inglese

DOCENTE RESPONSABILE DELL'INSEGNAMENTO / ATTIVITÀ FORMATIVA

Viviana Fafone

CODOCENTE

Modulo:

OBIETTIVI FORMATIVI E RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI

Italiano	OBIETTIVI FORMATIVI: L'insegnamento si propone di fornire una preparazione avanzata nell'ambito della teoria della radiazione gravitazionale, delle sue sorgenti e dei metodi di rivelazione. Il percorso approfondisce i temi di frontiera del campo, sottolineando il collegamento tra i diversi aspetti dell'astrofisica e della fisica fondamentale investigabili tramite questo tipo di segnali. Pur richiedendo conoscenze di base della Relatività Generale, la struttura modulare garantisce una trattazione autoconsistente di ogni aspetto trattato. CONOSCENZA E CAPACITÀ DI COMPRENSIONE: Gli studenti e le studentesse devono raggiungere una approfondita comprensione dello stato attuale della ricerca nel campo delle onde gravitazionali, e delle relative problematiche, sia a livello teorico che osservativo e tecnologico. Devono avere sviluppato la capacità di approfondire argomenti di ricerca in modo autonomo, in particolare su articoli specialistici pubblicati su riviste internazionali. La verifica della conoscenza e delle capacità di comprensione viene svolta attraverso un esame orale e risposta a domande sugli argomenti del corso. CAPACITÀ DI APPLICARE CONOSCENZA E COMPRENSIONE: Al termine dell'insegnamento, gli studenti e le studentesse devono aver acquisito familiarità con i concetti fondamentali dell'astronomia gravitazionale ed essere in grado di identificare i punti chiave delle principali problematiche di interesse del campo, inquadrandole nel contesto delle conoscenze attuali e creando connessioni con le discipline affini. Devono

	inoltre essere in grado di applicare gli strumenti ricevuti anche in contesti diversi da quelli trattati nel corso. AUTONOMIA DI GIUDIZIO: Il percorso mira a rendere gli studenti e le studentesse in grado di analizzare criticamente e in modo autonomo un argomento di attualità scientifica, di approfondire specifici aspetti di un problema e di fare ricerche bibliografiche tramite la consultazione di testi, di riviste scientifiche di settore, di archivi elettronici disponibili sul WEB, operando la necessaria selezione dell'informazione disponibile. ABILITÀ COMUNICATIVE: Gli studenti e le studentesse devono acquisire esperienza su come lavorare in un gruppo interdisciplinare e avranno appreso come presentare la propria ricerca o i risultati di una ricerca bibliografica con rigore metodologico, tanto ai propri colleghi che al pubblico generico, rendendo accessibile la comprensione dell'astrofisica gravitazionale. CAPACITÀ DI APPRENDIMENTO: Gli studenti e le studentesse devono acquisire un metodo di indagine flessibile ed essere in grado di affrontare nuovi argomenti attraverso uno studio autonomo. Devono inoltre acquisire la capacità di proseguire gli studi in un dottorato di ricerca o altre scuole di specializzazione.
English	*LEARNING OUTCOMES:* *The course aims to provide advanced training in the theory of gravitational radiation, its sources, and detection methods. It explores frontier topics in the field, highlighting the connections between different aspects of astrophysics and fundamental physics that can be investigated through gravitational-wave signals. Although a basic knowledge of General Relativity is required, the modular structure of the course ensures that each topic is presented in a self-contained manner.* *KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING:* *Students are expected to develop an in-depth understanding of the current state of research in gravitational-wave science, as well as the related theoretical, observational, and technological challenges. They must develop the ability to explore research topics independently, particularly through the study of specialized articles published in international scientific journals. Knowledge and understanding will be assessed through an oral examination consisting of questions on the topics covered in the course.* *APPLYING KNOWLEDGE AND UNDERSTANDING:* By the end of the course, students must become familiar with the fundamental concepts of gravitational-wave astronomy and able to identify the key issues underlying the main research questions in the field. They must be able to place these questions in the context of current knowledge and establish connections with related disciplines. They are also expected

	to be able to apply the knowledge and methods acquired to contexts beyond those explicitly addressed in the course. *MAKING JUDGEMENTS:* The course aims to enable students to analyse current scientific topics critically and independently, investigate specific aspects of a problem in greater depth, and conduct literature searches using textbooks, specialized scientific journals, and online electronic archives. Students must be able to critically evaluate and select relevant information from the available sources. *COMMUNICATION SKILLS:* Students must gain experience in working in interdisciplinary teams and learn to present their own research or the results of a literature review with methodological rigor. They must be able to communicate effectively with both their peers and a general audience, making the concepts and results of gravitational-wave astrophysics accessible to non-specialists. *LEARNING SKILLS:* Students must develop a flexible approach to scientific inquiry and be able to address new topics through independent study. They must also acquire the skills needed to pursue further studies in a PhD programme or other advanced postgraduate training programmes.

PREREQUISITI

Italiano	Conoscenza dei fondamenti di relatività generale e di astrofisica
English	*Fundamentals of general relativity and astrophysics*

PROGRAMMA E CRONOPROGRAMMA

Italiano	La relatività generale in approssimazione di campo debole: equazione d'onda per la radiazione gravitazionale. Sorgenti astrofisiche di onde gravitazionali. Calcolo del segnale gravitazionale emesso da sistemi binari coalescenti. Il collasso gravitazionale e i suoi messaggeri. Radiazione gravitazionale emessa da stelle di neutroni. Fondo stocastico. Spettro della radiazione gravitazionale e concetti fondamentali sui vari metodi di rivelazione. Principali tecniche sperimentali nei rivelatori interferometrici. Basi di analisi dati. Sinergie con esperimenti di tipo elettromagnetico e neutrinico: l'approccio multi-messenger. Risultati recenti e loro implicazioni in fisica fondamentale, astrofisica e cosmologia.
English	*General relativity in the weak field approximation: the wave equation for gravitational radiation. Astrophysical sources of gravitational waves. Calculation of the gravitational wave signal emitted by coalescing binary systems. Gravitational collapse and its messengers. Gravitational radiation emitted by neutron stars. The stochastic gravitational-wave background. The gravitational wave spectrum and fundamental concepts underlying the*

	various detection methods. Main experimental techniques used in interferometric detectors. Fundamentals of data analysis. Synergies with electromagnetic and neutrino experiments: the multi-messenger approach. Recent results and their implications for fundamental physics, astrophysics, and cosmology.

TESTI ADOTTATI E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Italiano	M. Maggiore Gravitational Waves Volume 1. Theory and Experiments Oxford University Press Advanced Interferometric Gravitational-wave Detectors (2 Volumes: Essentials of Gravitational Wave Detectors / Advanced Ligo, Advanced Virgo and Beyond) P. Saulson, D. Reitze, H. Grote eds (World Scientific; EAN: 9789813146075) Peter Saulson: Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors (World Scientific; ISBN 9810218206) Living Reviews in Relativity, https://link.springer.com/journal/41114 B. P. Abbott et al., “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016) B. P. Abbott et al., “GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence”, Phys. Rev. Lett. 119, 141101 (2017) Abbott, B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2017). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. Physical Review Letters, 119 (16), 161101.
English	*M. Maggiore Gravitational Waves Volume 1. Theory and Experiments Oxford University Press* *Advanced Interferometric Gravitational-wave Detectors (2 Volumes: Essentials of Gravitational Wave Detectors / Advanced Ligo, Advanced Virgo and Beyond) P. Saulson, D. Reitze, H. Grote eds (World Scientific; EAN: 9789813146075)* *Peter Saulson: Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors (World Scientific; ISBN 9810218206)* *Living Reviews in Relativity, https://link.springer.com/journal/41114* *B. P. Abbott et al., “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)* *B. P. Abbott et al., “GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence”, Phys. Rev. Lett. 119, 141101 (2017)* *Abbott, B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2017). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. Physical Review Letters, 119 (16), 161101.*

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI SVOLGIMENTO E METODI DIDATTICI ADOTTATI

☒ In presenza ☐ A distanza

Italiano	Lezioni frontali con utilizzo di supporti telematici. Il materiale didattico, sia trasparenze che riferimenti bibliografici, viene reso disponibile agli studenti entro poche ore dalla conclusione della lezione stessa.
English	*Frontal lessons with the use of telematic supports. The teaching material, both transparencies and bibliographic references, is made available to students within a few hours of the conclusion of the lesson.*

MODALITÀ DI FREQUENZA

☐ frequenza obbligatoria ☒ frequenza facoltativa

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ DI FREQUENZA

Italiano	Lezioni frontali in aula non obbligatorie ma fortemente consigliate.
English	*Lectures. Not mandatory but highly recommended.*

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

Viviana Fafone, Lorenzo Aiello, Matteo Lorenzini, Alessio Rocchi

DESCRIZIONE DELLE MODALITÀ E DEI CRITERI DI VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

Italiano	La prova d'esame sarà valutata secondo i seguenti criteri: • **Non idoneo:** gravi lacune e/o imprecisioni nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitata capacità di analisi e sintesi, con frequenti generalizzazioni. • **18–20:** conoscenza e comprensione appena sufficienti, con possibili imperfezioni; capacità di analisi, sintesi e giudizio autonome adeguate. • **21–23:** conoscenza di base degli argomenti e comprensione complessiva; analisi e sintesi corrette, con argomentazioni coerenti. • **24–26:** buona conoscenza e comprensione; capacità di analisi e sintesi solide, espresse con discreto rigore. • **27–29:** conoscenza completa; spiccate capacità di analisi e sintesi e buona autonomia di giudizio. • **30–30 e lode:** padronanza eccellente degli argomenti; elevate capacità di analisi, sintesi e giudizio autonomo, con esposizione originale.
English	*The exam will be assessed according to the following criteria:*

	• ***Fail:*** *serious gaps and/or inaccuracies in knowledge and understanding of the topics; limited ability to analyze and synthesize, with frequent overgeneralizations.* • ***18–20:*** *barely sufficient knowledge and understanding, with possible imperfections; adequate analytical, synthesis, and independent judgment skills.* • ***21–23:*** *basic knowledge and overall understanding; correct analysis and synthesis, with coherent reasoning.* • ***24–26:*** *good knowledge and understanding; solid analytical and synthesis skills, expressed with reasonable rigor.* • ***27–29:*** *thorough knowledge; strong analytical and synthesis skills and good independent judgment.* • ***30–30 with honors:*** *excellent mastery of the topics; outstanding analytical, synthesis, and independent judgment skills, with original presentation.*