



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## FISICA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

### FRANCESCO FIDECARO

Anno accademico 2023/24  
CdS FISICA  
Codice 257BB  
CFU 9

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
FISICA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI	FIS/01	LEZIONI	54	FRANCESCO FIDECARO MASSIMILIANO RAZZANO

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

Al termine del corso lo studente avrà acquisito le conoscenze necessarie ad iniziare una attività di ricerca nel campo delle onde gravitazionali. Avrà inoltre gli strumenti necessari per comprendere il contributo dei risultati ottenuti dalla rivelazione delle onde gravitazionali ad altri campi della fisica. Con l'accordo degli studenti il corso potrà essere tenuto in inglese.

##### *Modalità di verifica delle conoscenze*

La verifica avverrà attraverso un seminario su un argomento concordato e successiva discussione. Si valuterà la padronanza dell'argomento scelto e del suo contesto scientifico.

##### *Capacità*

Al termine del corso lo studente potrà valutare il rumore presente di un rivelatore di onde gravitazionali e i tipi di segnali che possono essere rivelati, qual'è lo stato della disciplina e le prospettive future.

##### *Modalità di verifica delle capacità*

Le capacità saranno verificate nell'ambito del seminario finale.

##### *Comportamenti*

Lo studente potrà acquisire conoscenze trasversali in numerosi campi della fisica rimasti a lungo separati, che vengono riuniti dallo studio della fisica delle onde gravitazionali.

##### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Le conoscenze trasversali saranno valutate nel seminario finale.

##### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

E' necessario avere una buona conoscenza della fisica classica: meccanica, gravitazione newtoniana, termodinamica, elettromagnetismo, relatività ristretta e dei primi elementi di meccanica quantistica. La conoscenza della Relatività Generale è auspicabile .

##### *Indicazioni metodologiche*

Le lezioni si tengono con l'ausilio di un videoproiettore connesso a computer. Si riproduce la scrittura alla lavagna, corredata da immagini, grafici e filmati.  
E' prevista la visita all'interferometro Virgo.

##### *Programma (contenuti dell'insegnamento)*

1. Cenni di Relatività generale. Trasformazioni di Lorentz. Invarianti. Tensori. Polvere e flusso di particelle. Tensore energia impulso. Derivata covariante. Tensore di curvatura. Deviazione geodetica. Moto con curvatura debole determinata da potenziale newtoniano. Metrica stazionaria e conservazione dell'energia. Equazione della geodetica per le componenti spaziali e secondo principio della dinamica. Equazioni di Einstein. Equazioni di Einstein in campo debole, equazione d'onda. Metrica di una onda



## UNIVERSITÀ DI PISA

- gravitazionale in gauge TT. Effetto sulla materia. Analogia con le onde elettromagnetiche, espressione per il quadrupolo TT. Espressione per il flusso di energia associato alle onde gravitazionali. Energia irradiata da GW150914.
2. Sorgenti astrofisiche di onde gravitazionali. Lo spettro elettromagnetico e lo spettro di onde gravitazionali. Formula di emissione di quadrupolo. Stelle di neutroni e pulsar: contesto astrofisico e caratteristiche principali. Emissione elettromagnetica e formule approssimate di dipolo. Diagramma P-Pdot. Emissione di onde gravitazionali. Caso di ellissoide in rotazione. Angolo di inclinazione. Spin-down limit e limiti osservativi.
  3. Formula di flusso e luminosità nelle onde gravitazionali. Sistemi binari: contesto astrofisico e osservazioni. Binarie di stelle di neutroni e di buchi neri. Pulsar di Hulse-Taylor. Evoluzione dei sistemi binari. Emissione di onde gravitazionali da sistemi binari, inclinazione, luminosità. Decadimento orbitale e coalescenza. Massa di chirp. Emissione di onde gravitazionali da coalescenza. Le prime osservazioni di binarie di buchi neri durante O1, O2 e O3. Lo scenario osservativo futuro post O3.
  4. Astronomia multimessaggera. Sorgenti astrofisiche multimessaggere. Il caso dei GRB, supernovae e pulsar. Localizzazione e EM-follow up. IL programma di follow-up e il caso di GW150914. L'evento GW170817 e la nascita dell'astronomia multimessaggera. Osservazioni e risultati dall'evento. Cenno a interferometri di 3 generazione e LISA
  5. Introduzione all'analisi dati. Processi stocastici. Distribuzioni di probabilità a tempi diversi. Distribuzioni congiunte. Media e varianza. Autocorrelazione. Stazionarietà, rumore Gaussiano. Spettro di potenza. Significato e proprietà dello spettro di potenza. Richiamo al teorema di Bayes. Filtro ottimale e statistica associata. Matched filter e template. Rapporto segnale rumore. Analisi di segnali impulsivi con la statistica di eccesso di potenza. Rumore non stazionario e glitches. Probabilità di falso allarme, efficienza di rivelazione. Applicazioni di reti neurali nella caratterizzazione dei glitch negli interferometri. Analisi di sorgenti continue. Correzioni baricentriche e correzioni legate allo spin-down. Timing noise. Cenni ai tipi di metodi di ricerca: targeted, directed e all sky.
  6. Rivelazione di onde gravitazionali. Ordini di grandezza dell'ampiezza. Strumento di misura: trasduzione e funzione di trasferimento. Rumore in uno strumento di misura. Rumore sismico. Attenuazione con filtri meccanici. Attenuazione verticale. Requisiti di attenuazione e superattenuatore. Rivelazione di segnali. Filtraggio ottimale. Rapporto segnale rumore. Rumore termico. Posizione quadratica media. Teorema di fluttuazione-dissipazione. Applicazione al pendolo. Rumore di misura.
  7. Rumore di misura. Conteggio di fotoni in un interferometro di Michelson. Sensibilità e precisione. Linee di ritardo. Cavità Fabry-Perot. Campo elettrico nella cavità. Coefficiente di riflessione. Condizione di risonanza. Intervallo spettrale libero. Finezza. Sensibilità allo spostamento. Effetto sulla sensibilità di un interferometro. Interferometro come specchio. Cavità di ricircolo. Rumore di frequenza. Fattore di risonanza di modo comune. Influenza dell'asimmetria delle cavità. Controllo del punto di lavoro dell'interferometro, tecnica di Pound Drever Hall. Ottica gaussiana. Equazione d'onda parassiale. Fasci gaussiani sferici. Modi di ordine superiore. Modi di Hermite Gauss e di Laguerre Gauss. Risonatori ottici. Le cavità Fabry Perot di Virgo. Modi superiori e ottica quantistica. Quantizzazione dell'oscillatore armonico. Quantizzazione del campo elettromagnetico. Teoria del separatore di fasci, o beam splitter. Modello a due ingressi e due uscite. Coefficienti di riflessione e di trasmissione. Rivelazione omodina. Espressione di campi elettrici e magnetici. Quadrature. Stati coerenti del campo elettromagnetico. Operatore di spostamento. Operatore di squeezing. Stati coerenti squeezed. Grafico dello spazio delle fasi. Relazione di indeterminazione. Generazione di stati coerenti. Uso di cristalli non lineari per la generazione di seconda armonica e stati di vuoto squeezed. Schemi usati per il rivelatore GEO 600, LIGO e Virgo.

### Bibliografia e materiale didattico

- Bernard F. Schutz, A First Course in General Relativity, Cambridge University Press, 1985.  
Misner, Thorne, Wheeler, Gravitation, W.H. Freeman & Co, 1973.  
R. Loudon, The Quantum Theory of Light, Oxford University Press, 2000.  
A. Siegman, Lasers, Univ Science Books, 1986.  
M. Maggiore, Gravitational Waves, Vol I and II, Oxford University Press.

### Indicazioni per non frequentanti

Non ci sono variazioni di programma

### Modalità d'esame

L'esame è composto da una prova orale sotto forma di seminario.

Ultimo aggiornamento 20/07/2023 16:36