

Dall'esperimento di Michelson e Morley alla rilevazione delle onde gravitazionali

Costruire e comprendere un interferometro di Michelson

PCCP
demonstrator



Interferometro di Michelson prodotto dal laboratorio NIKHEF in Olanda. Kit di assemblaggio realizzato da H.Hennes

Orientamento e formulazione di domande

Entra in contatto con il contenuto e/o stimola la curiosità

Introduzione: Dai misteri dell'etere alle onde gravitazionali

Grazie ad un piccolo modello educativo, scopriremo un dispositivo ottico allo stesso tempo semplice, estremamente potente e cruciale per la storia della scienza: l'interferometro di Michelson.

L'interferometro di Michelson fu inventato dal fisico americano Albert Abraham Michelson, nella seconda metà del XIX secolo. Michelson vinse il premio Nobel per la fisica nel 1907 per "gli strumenti ottici di precisione da lui sviluppati e per le ricerche spettroscopiche e metrologiche condotte con essi".



Albert Abraham Michelson,
Nobel prize in physics 1907

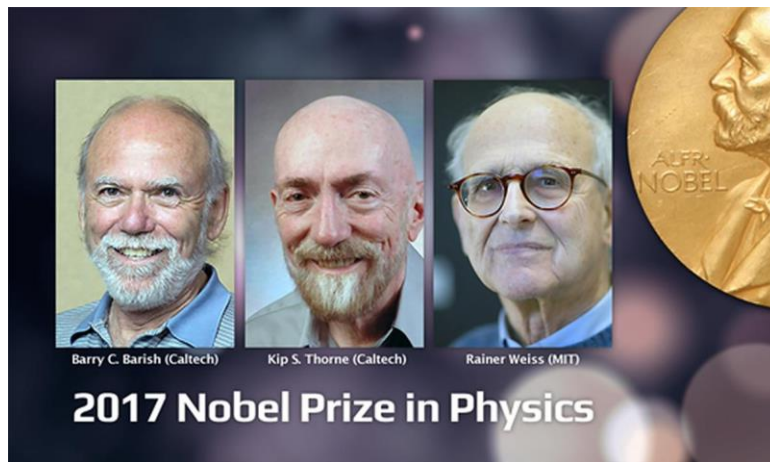


L'interferometro di Michelson fu usato da Michelson e dal suo collega Edward Williams Morley nel tentativo di dimostrare una speciale sostanza denominata 'etere', che i fisici del tempo ritenevano riempisse lo spazio e costituisse il mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche.

Il risultato del famoso esperimento di Michelson e Morley, effettuato nel 1887, fu invece opposto: l'etere non esiste. Questo fu un passo fondamentale che generò una crisi ed un profondo ripensamento di tutta la fisica classica. Fu questo esperimento e le sue conseguenze che condussero alla nascita della teoria della relatività ristretta elaborata da Albert Einstein nel 1905.

Quasi 130 anni dopo quel momento cruciale, l'interferometro di Michelson è stato nuovamente utilizzato da LIGO e Virgo per rilevare per la prima volta le onde gravitazionali e per illuminare il cielo grazie a un nuovo messaggero cosmico, alternativo alle onde elettromagnetiche.

La rivelazione delle onde gravitazionali è stata definita come "una scoperta che ha scioccato il mondo", dal comitato del premio Nobel, che ha assegnato ai tre padri fondatori del rilevatore LIGO il premio per la fisica 2017.



Barish, Thorne and Weiss, vincitori del premio Nobel 2017, per la rivelazione delle onde gravitazionali (Credit: nobelprize.org)

Le onde gravitazionali, increspature nel tessuto dello spazio-tempo previste nel 1905 dalla teoria della relatività generale, viaggiano attraverso l'Universo alla velocità della luce e portano informazioni su fenomeni molto violenti, come le fusioni di buchi neri e stelle di neutroni.

L'interferometro di Michelson unisce 130 anni di storia della scienza e due premi Nobel, collegando un test fondamentale per la relatività speciale ad una conferma fondamentale della relatività generale.

L'uso dell'interferometro di Michelson ci consente, non solo di parlare di relatività, messaggeri cosmici e buchi neri, ma anche di familiarizzare con concetti come la natura ondulatoria della luce e il concetto di "interferenza": la sovrapposizione di raggi luminosi, che può generare, a seconda dei casi, luce con ampiezza maggiore, minore, o persino buio.

Inoltre, lo strumento ci mostrerà l'incredibile "potenza dell'interferometria" come metodo per misurare le distanze con una precisione incredibile.

LINEE GUIDA PER L'INSEGNANTE

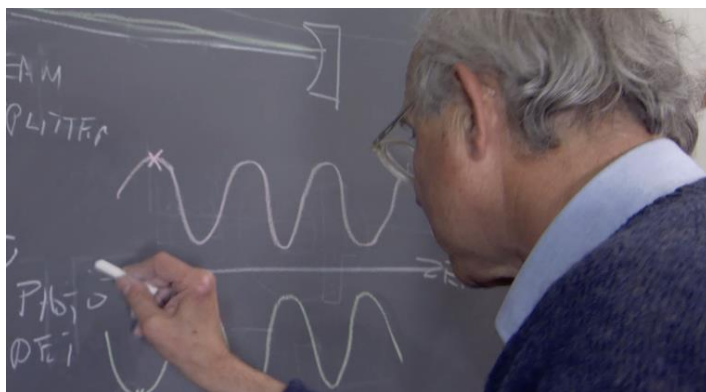
L'esperimento Michelson e Morley è molto interessante da a) un punto di vista storico (nascita della relatività speciale) e perché è un esempio di esperimento di fisica dei "vecchi tempi", con una tecnologia molto scarsa (nessuna luce laser, nessun fonorilevatore, nessun computer...).

I fisici alla fine del XIX secolo stavano cercando una prova dell'esistenza di un mezzo di propagazione della luce, poiché altre onde vengono trasmesse attraverso un mezzo (onde acustiche attraverso l'aria o materiali, onde sismiche attraverso la crosta terrestre e il mantello, ecc ...).

Un osservatore che si muove rispetto all'etere, misurerebbe una diversa velocità della luce rispetto a un osservatore a riposo relativamente all'etere. Poiché la Terra si sta muovendo intorno al sole a una velocità di $\sim 30 \text{ km / s}$ (domanda per gli studenti: perché non avvertiamo questo movimento?), inviando raggi di luce in due direzioni ortogonali (una nella direzione del movimento della Terra e il secondo nella direzione perpendicolare al movimento terrestre), possiamo misurare la velocità relativa dei fasci di luce.

Il risultato dell'esperimento fu che non esiste nessun etere: **la luce viaggia alla stessa velocità in tutte le direzioni e in tutte le circostanze**. Ciò ebbe conseguenze molto profonde per la successiva crisi della fisica classica e nello sviluppo della teoria della relatività speciale di Einstein. a medium (acoustic waves through air or materials, seismic waves through the Earth crust and mantle, etc...).

Prima di iniziare, dai un'occhiata a questo video che mostra come funziona l'interferometro di Michelson nel contesto del rilevamento delle onde gravitazionali, con la presenza di Rai Weiss, premio Nobel per la fisica 2017.



<https://www.ligo.caltech.edu/video/IFO-response>

Rai Weiss, premio Nobel per la fisica 2017 per la scoperta delle onde gravitazionali, mentre spiega l'interferenza ed i principi alla base degli interferometri di Michelson (Crediti: LIGO).

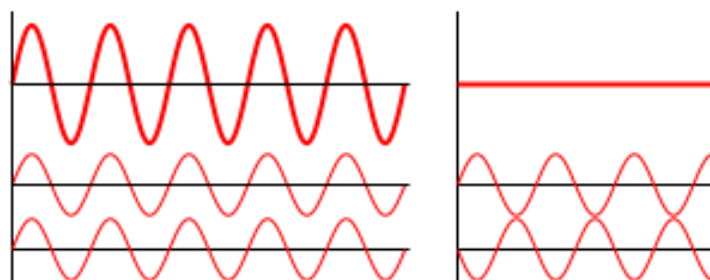
Introduzione alle onde e alla loro interferenza

Prima di fornire maggiori dettagli sull'interferometro di Michelson, introduciamo la natura ondulatoria della luce.

La luce è un'onda elettromagnetica: è composta da campi elettrici e magnetici che oscillano, propagando e trasportando energia. La luce visibile è una particolare onda elettromagnetica, la cui frequenza è compresa tra 0,4 e 0,8 micrometri. Alle frequenze inferiori a quelle della luce visibile, c'è la luce infrarossa e alle frequenze superiori quella ultravioletta.

La luce è un'onda. Le onde hanno una proprietà particolare che le rende molto diverse dalle particelle: l'interferenza.

Se metti insieme due particelle, il risultato sarà una particella più grande. Se sommi due onde, il totale può essere un'onda più grande, o un'onda più piccola, o addirittura nessuna onda. L'immagine seguente dà un'idea di come funziona l'interferenza.



Nel pannello di sinistra, la sovrapposizione di due onde genera un'onda più grande: le due onde sono "in fase". Nel pannello di destra, invece, la sovrapposizione delle stesse due onde, spostate semplicemente lungo l'asse x, non generano onde: le onde sono "sfasate". Nel secondo esempio, dato che non c'è onda alla fine, non abbiamo luce, solo oscurità.

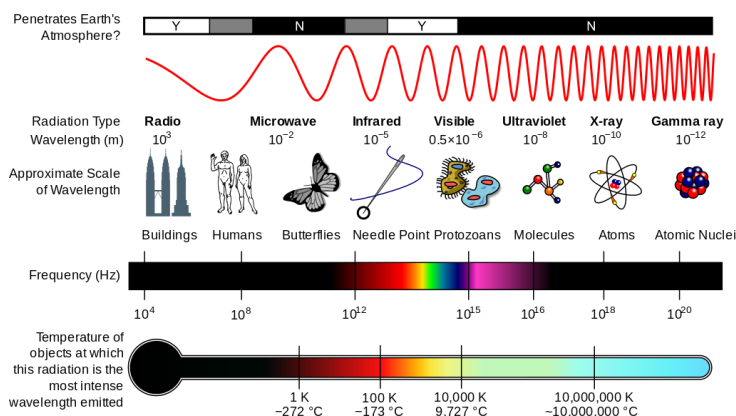
Pensa a come utilizziamo l'espressione nella vita di tutti i giorni: se sei "in fase" con qualcuno, sei in armonia e la somma dei tuoi sforzi otterrà risultati maggiori rispetto ai singoli sforzi. Se non si fosse in fase, i rispettivi sforzi potrebbero annullarsi a vicenda.

LINEE GUIDA PER L'INSEGNANTE

Other kind of waves: Before speaking about electromagnetic waves, you can introduce other, more familiar, kind of waves: waves in a pond, acoustic waves, seismic waves. You can introduce concepts such as the wavelength, the frequency, the speed of the wave, and also the polarisation. With waves in a pond (or in a bucket in a classroom) you can also highlight the process of interference.



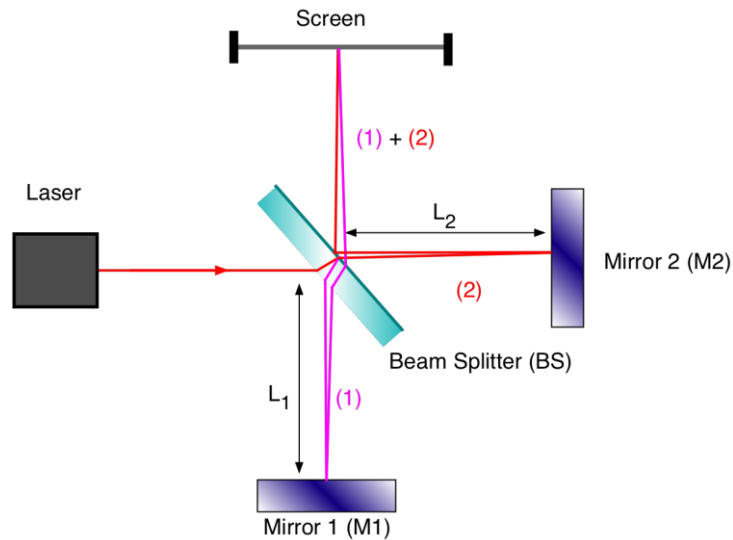
Lo spettro elettromagnetico: è interessante dare un'occhiata allo spettro elettromagnetico e, per ogni tipo di onda elettromagnetica (visibile, radio, ecc ...), identificare la lunghezza d'onda (e la frequenza), i fenomeni e/o i dispositivi che generano le onde (per esempio: i raggi UV sono presenti nello spettro della luce solare ecc ...).



L'interferometro di Michelson

In un interferometro di Michelson (vedi lo schema qui sotto), un raggio di luce è diviso in due parti grazie a uno specchio semi-riflettente, chiamato beam splitter (divisore di fascio), che riflette metà della luce a 90 gradi consentendo al contempo che l'altra metà lo attraversi. Questo crea due fasci di luce perpendicolari l'uno rispetto all'altro. I due fasci di luce vengono inviati a due specchi, dove vengono riflessi e si ricombinano, dopo aver attraversato il beam splitter, su uno schermo dove interferiscono.

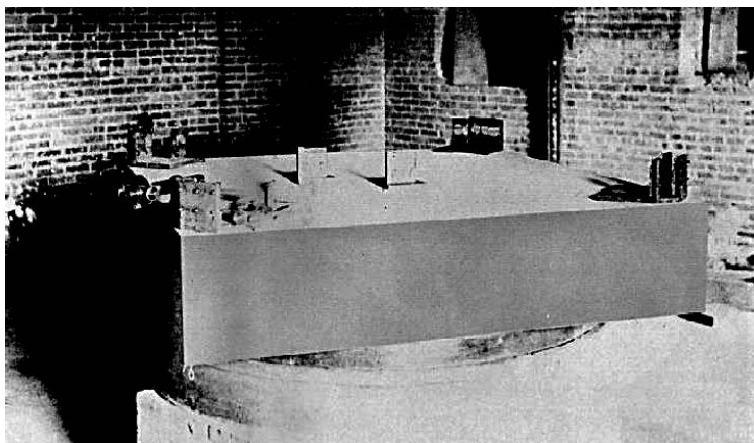
Nei moderni interferometri utilizziamo i laser invece di sorgenti luminose standard come fecero Michelson e Morley, ma il principio di funzionamento è lo stesso.



La condizione di interferenza (essere "in fase" o "fuori fase" o "leggermente in fase o fuori fase") dipende dalle due lunghezze relative del percorso. Se il primo raggio percorre un percorso più lungo rispetto al secondo, la sua fase sarà leggermente diversa. Questa differenza di fase cambia la condizione di interferenza e, quindi, la potenza ottica misurata sullo schermo.

Guarda di nuovo il video con Rai Weiss per capire come la variazione della distanza viene trasformata in una variazione di luminosità sullo schermo dell'interferometro dall'interferenza.

<https://www.ligo.caltech.edu/video/IFO-response>



L'interferometro originale di Michelson e Morley

Definisci gli obiettivi e/o le domande a partire dall'attuale conoscenza

Assembleremo un interferometro Michelson utilizzando un piccolo kit di costruzione sviluppato da NIKHEF, l'Istituto nazionale olandese per la fisica subatomica, un laboratorio di fisica delle alte energie e astroparticellare ad Amsterdam, Paesi Bassi, che partecipa all'esperimento Virgo.

NOTA PER GLI INSEGNANTI: L'interferometro di NIKHEF costa circa 70 € + IVA. Lo stesso interferometro può anche essere costruito con semplici componenti ottiche.

Costruiamo lo strumento

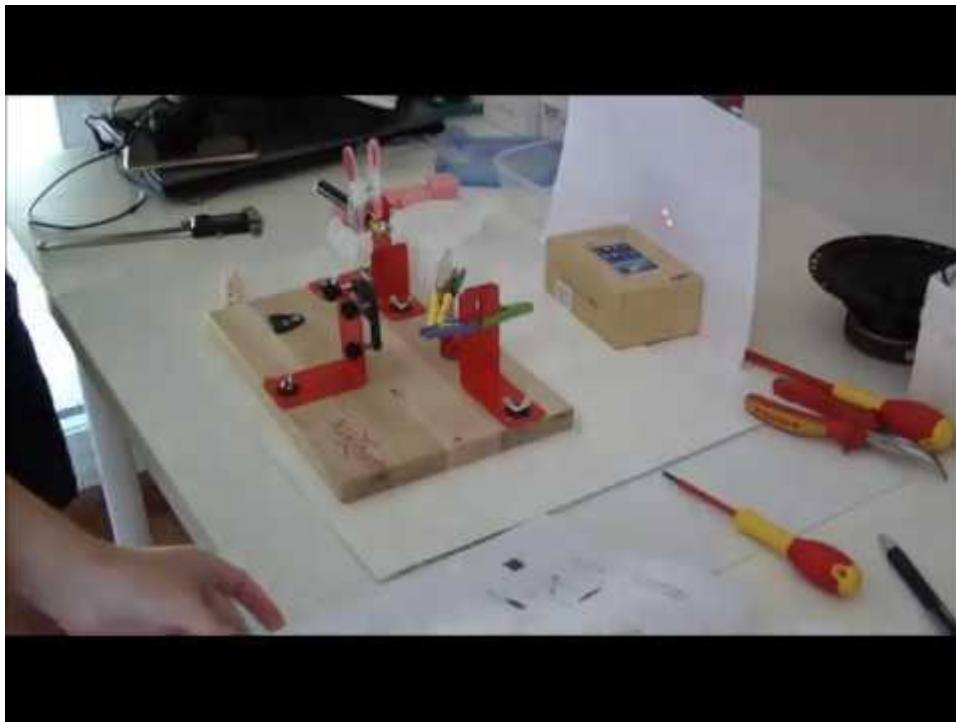
La ricerca non è fatta solo di complesse teorie. Consiste anche nella costruzione di strumenti di alta sensibilità, in grado di testare quelle teorie. Michelson ha ricevuto il premio Nobel per i suoi strumenti nel 1907, così come i tre padri fondatori di LIGO lo hanno vinto nel 2017.

Costruiremo un interferometro Michelson, un dispositivo di misura della distanza estremamente sensibile. La differenza fondamentale con un righello è che l'interferometro di Michelson non misura la distanza assoluta, ma la differenza di lunghezza tra i due bracci dell'interferometro. Il kit di costruzione Nikhef contiene:

- Tutti i pezzi necessari per costruire l'interferometro
- Il manuale di istruzioni



Segui le varie fasi di costruzione dello strumento come mostrato nel manuale ed in questo video:



Una volta che l'interferometro è stato assemblato deve essere allineato, finché non compaiono le frange di interferenza circolari mostrate nella figura qui sotto.



Domanda: Perché si vedono questi anelli concentrici?

Pianificazione e investigazione

Pianifica un'indagine

Prima di tutto, osserva. La ricerca è fatta anche di osservazione e di scrittura di tutto ciò che si nota. Confronta le tue note con quelle dei tuoi compagni di classe.

Osserva come cambiano le frange sullo schermo.

Domande:

- La parte centrale diventa chiara e scura alternativamente? Se sì perché?
- Di che ordine di grandezza sono i tempi in cui cambia?
- Qual è secondo te la ragione di queste variazioni di luminosità?

Esegui l'indagine

Ora interagiamo con lo strumento per investigare e comprenderne il comportamento. Non dimenticare di prendere sempre nota delle tue osservazioni.

Puoi dare una piccola spinta a una parte dello strumento o soffiare aria in una dei due bracci (fai attenzione con gli occhi!). Che effetto producono queste azioni sul modello di interferenza?

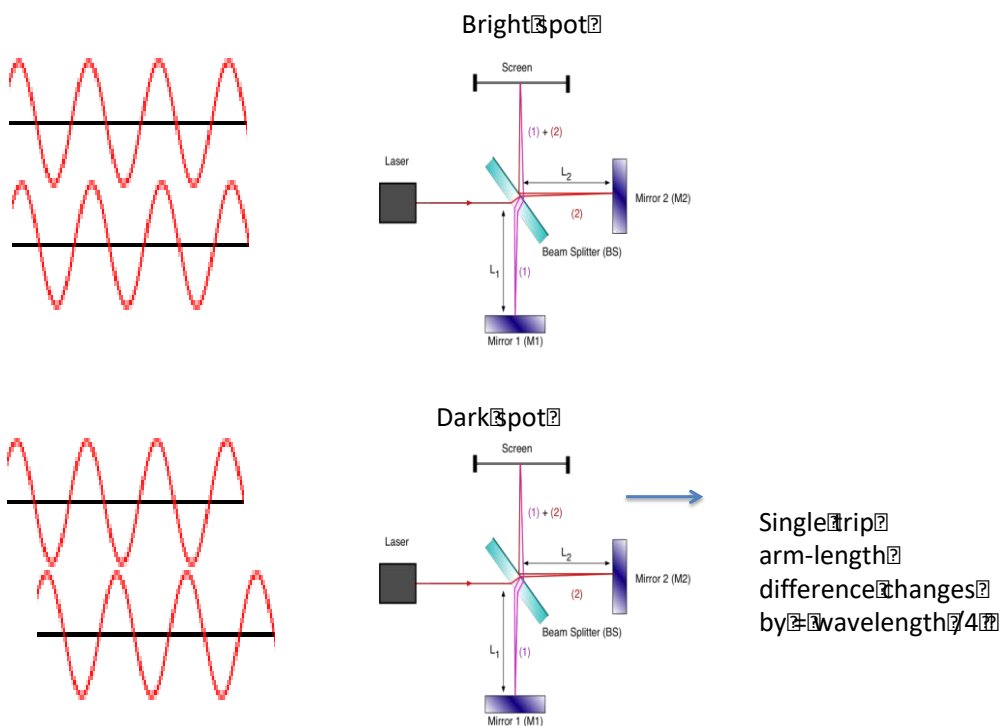
Cerca di studiare le caratteristiche delle frange e di identificare quelle che ritieni più pertinenti.

Analisi e Interpretazione: Raccogli i risultati a partire dai dati

Iniziamo ad apprezzare l'incredibile precisione dell'interferometria

Dalle precedenti osservazioni dovresti aver notato quanto sia instabile e vibri l'apparato sperimentale. Per fare ciò devi solo notare che la distanza tra due massimi è uguale alla lunghezza d'onda della luce, nel nostro caso ~ 0,6 micrometri, dato che la luce è rossa.

Se il punto centrale cambia da chiaro a scuro, la differenza di distanza di andata e ritorno tra i due bracci cambia della metà di 0,3 micrometri = 0,15 micrometri. Ciò significa che la differenza di percorso di sola andata del fascio cambia di 0,2 micrometri. Vedi la figura:



Domande:

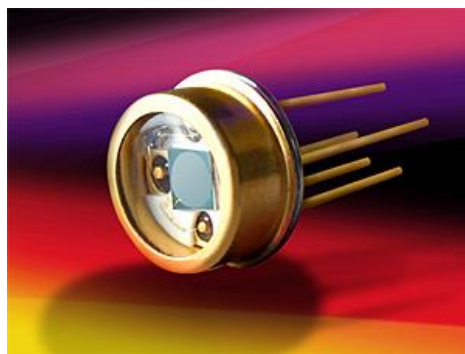
- Puoi confrontare questo numero con le dimensioni di un atomo?
- Secondo te, come si fa a costruire un interferometro più stabile?

Testa le tue ipotesi sullo strumento che hai a disposizione.

- Prova a spiegare perché lo strumento è così sensibile.
- Qual è il vantaggio di usare la luce di un laser rispetto alla luce normale (ad esempio quella di una lampada)? Qual è la proprietà fondamentale della luce laser, rispetto alla luce normale?

Aumentiamo la sensibilità: i fotorivelatori

Nei moderni esperimenti misuriamo la variazione della potenza ottica sullo schermo con un fotorilevatore, un dispositivo che converte la potenza ottica in una corrente elettrica, che a sua volta può essere facilmente convertita in una variazione di tensione



Il limite di questo tipo di misurazione è dovuto alla natura quantistica della luce, al fatto che la luce non è solo un'onda, ma anche una particella. Ciò genera un'inevitabile fluttuazione all'uscita del fotorilevatore chiamato 'shot noise'. Tuttavia, aumentando la potenza del laser, è possibile ridurre l'impatto dello shot noise. In Virgo e LIGO è possibile misurare una frazione della lunghezza d'onda pari a 10-12 (un milionesimo di milionesimo)!!

Conclusione e Valutazione

Trai le conclusioni e presenta i risultati ottenuti

Esercizio 1:

Prova a rispondere brevemente alle seguenti domande (in poche righe)

- Come funziona un interferometro di Michelson?
- Che differenza c'è tra un'onda ed una particella?
- Perché abbiamo usato un laser nel nostro esperimento invece di una lampada? Che differenza c'è tra la luce di un laser e quella di una lampada?
- È possibile far interferire onde radio invece che luce visibile? Perché?
- Perché l'interferometria è una tecnica così potente per misurare le distanze?
- Ci sono metodi alternativi per misurare le distanze in modo molto preciso?
- Hai qualche idea su come ridurre le vibrazioni indotte sugli interferometri di NIKHEF che hai assemblato?

Esercizio 2:

Trova materiale sul web a proposito dell'esperimento di Michelson e Morley e fai una breve presentazione (5-10 min) alla tua classe

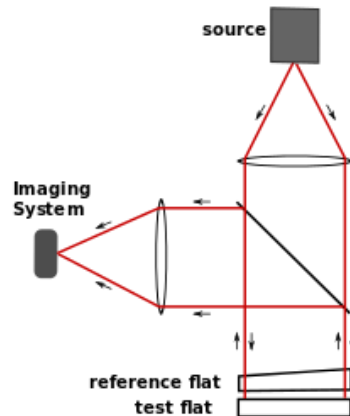
Valutazioni e Riflessioni

Abbiamo visto come l'interferometria ottica sia uno strumento estremamente potente per misurare piccole differenze di distanza.

L'interferometro di Michelson non è l'unico apparato ottico che usa l'interferometria. Analizziamo altri due tipi di interferometro con differente disposizione delle proprie componenti.

L'interferometro di Fizeau

Gli interferometri sono anche strumenti molto potenti per misurare la forma o la planarità di una superficie, come mostrato nel sistema ottico qui sotto, detto interferometro di Fizeau.

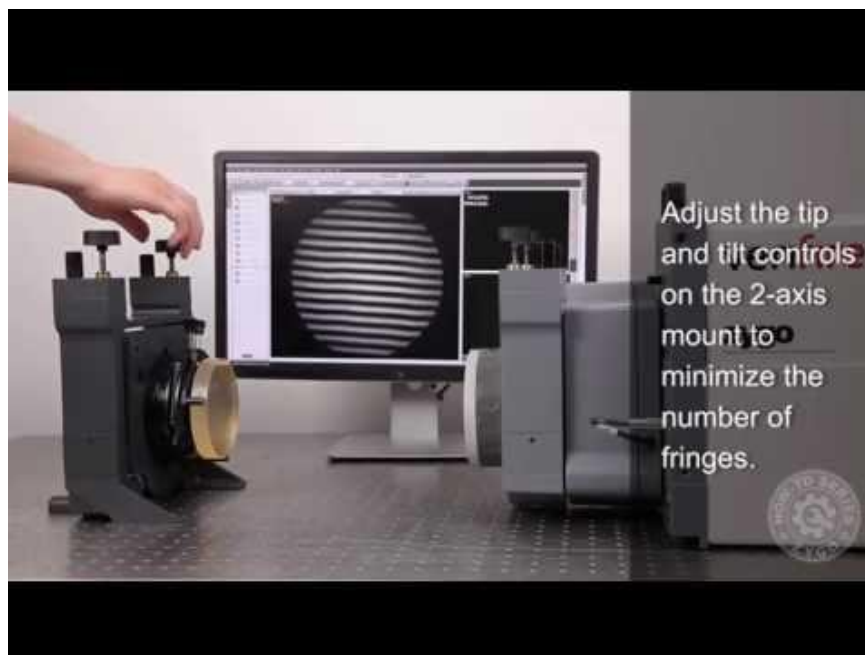


In questo apparato i due fasci che fanno interferenza sono costituiti da: 1) il fascio riflesso da una superficie di riferimento, 2) il fascio riflesso dalla superficie di test, dopo che è stato trasmesso dalla superficie di riferimento.

Guarda ad esempio la pagina web qui sotto:

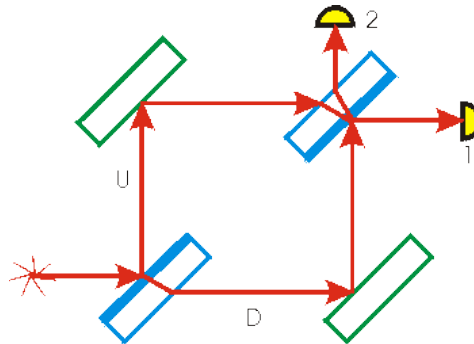
<https://www.zygo.com/?/met/interferometers/verifire/>

E la corrispondente guida online:



L'interferometro di Mach-Zehnder

Il cosiddetto interferometro di Mach-Zehnder è mostrato nella seguente figura



In questo apparato la luce è divisa in due da un beam splitter (come nell'interferometro di Michelson) ma i due fasci non si ricombinano tramite lo stesso divisore di fascio.

L'interferometro di Mach-Zehnder è ampiamente usato negli esperimenti di meccanica quantistica. Dai un'occhiata a questo video:

MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER IN CLASSICAL OPTICS

$$\delta L = [OM_2O'] - [OM_1O']$$
$$N_0 = N_{in} f(\delta L)$$
$$N_2 = N_{in} [1 - f(\delta L)]$$

L'interferometro di Mach-Zehnder può anche essere usato per stabilizzare in modo molto preciso la potenza in uscita alle porte 1 o 2. Dato che l'ampiezza

della luce dipende dall'interferenza tra i due fasci, è possibile cambiare la posizione di uno dei due specchi disegnati in verde, al fine di cambiare di una piccola quantità il percorso della luce, controllando così in modo molto fine la potenza di uscita.

Una straordinaria applicazione dell'interferometro di Michelson:

La rivelazione delle onde gravitazionali

La rilevazione delle onde gravitazionali è stata ottenuta usando interferometri di Michelson enormi, come Virgo e LIGO. Nell'immagine riportata qui sotto riconosciamo chiaramente le due braccia. L'edificio centrale ospita il laser, il divisore di fascio e l'uscita del rivelatore. In questo caso il cambiamento della lunghezza ottica tra i due bracci è dovuto a un'onda gravitazionale, una piccola oscillazione dello spazio-tempo, ed è misurata usando un fotorilevatore.

Virgo e LIGO sono, in effetti, molto più complessi di un semplice interferometro Michelson, ma il principio di base è lo stesso del piccolo prototipo che hai costruito.

Nel seguente video puoi apprezzare la complessità dell'ottica dell'interferometro LIGO:



È possibile notare un raggio lampeggiante in uno degli schermi: questa è l'interferenza tra i due bracci e la variazione di intensità di quel raggio, misurata con un fotorilevatore, contiene il segnale dell'onda gravitazionale.



Vista aerea dell'interferometro Virgo: in questa foto si può apprezzare chiaramente la forma ad L dell'interferometro di Michelson