

Visita virtuale di Virgo

Visita Virgo dalla tua
classe

Fase Orientativa

Domande di orientamento

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

L'interferometro Virgo

La rivelazione delle onde gravitazionali e la scoperta delle loro controparti visibili nel 2016-17 è stata una delle scoperte più importanti del 21-esimo secolo fino ad oggi.

Le onde gravitazionali sono una previsione della relatività generale. Con tale teoria, Einstein ha cambiato la nostra visione di quella forza che i fisici credevano di conoscere meglio: la gravità.

Ci ha mostrato che il concetto di gravità che Newton aveva introdotto doveva essere cambiato. La gravità è solo una conseguenza del cambiamento della geometria dello spazio-tempo prodotta da tutti i corpi che hanno massa non nulla.

Le onde gravitazionali sono increspature dello spazio-tempo, prodotte dal collasso di sorgenti astrofisiche estremamente dense, come i buchi neri o le stelle di neutroni. Tali segnali inducono sulla materia piccole variazioni di lunghezza (meno di 10^{-18} m a 100 Hz) che possono essere rivelate solo con i più precisi righelli del mondo, gli interferometri.

Immagina di versare un bicchiere di acqua nell'oceano. A cause dell'acqua versata il livello globale di tutti i mari sulla terra aumenterà di una quantità molto piccola. Un calcolo approssimativo ti condurrà a questo impressionante livello di innalzamento: 10^{-18} m!! Meno di un millesimo del raggio del protone!! Questa lunghezza, per quanto incredibilmente piccola, è la sensibilità degli attuali rivelatori di onde gravitazionali.

Solo pochi strumenti sulla terra possono raggiungere un tale livello di sensibilità: i due rivelatori LIGO negli Stati Uniti e Virgo a Cascina, in provincia di Pisa.

Questi rivelatori sono veramente enormi! Hanno la forma di una L di lunghezza di diversi chilometri per ogni braccio. Virgo, visto dall'alto in figura 1, è lungo 3 km mentre LIGO ha bracci di 4 km di lunghezza.



Figura 1 Vista area di Advanced Virgo (EGO / collaborazione Virgo)

Virgo and LIGO hanno cambiato la storia della scienza due volte: prima, quando hanno misurato le onde gravitazionali per la prima volta nel 2015, scoperta che è stata premiata con il premio Nobel per la fisica 2017, poi, quando, il 17 Agosto 2017, hanno osservato il segnale prodotto da una stella binaria di neutroni.

Questo tipo di stella binaria, costituita da due oggetti estremamente densi fatti solo di neutroni, collassando diventa un singolo oggetto che emette raggi gamma e luce visibile. La radiazione prodotta da questi strani oggetti non era mai stata rivelata prima. Nell'Agosto del 2017 Virgo e LIGO sono stati in grado di localizzare la posizione della sorgente di onde gravitazionali con una tale precisione da consentire di puntare i telescopi di tutto il mondo in una regione estremamente ridotta del cielo. Tutti loro hanno trovato una nuova stella mostrata in figura 2.

Questa scoperta segna l'inizio di una nuova era nella storia dell'astronomia. Grazie alle onde gravitazionali infatti adesso non solo siamo in grado di studiare sorgenti astrofisiche già presenti nell'universo, possiamo predire la loro nascita!

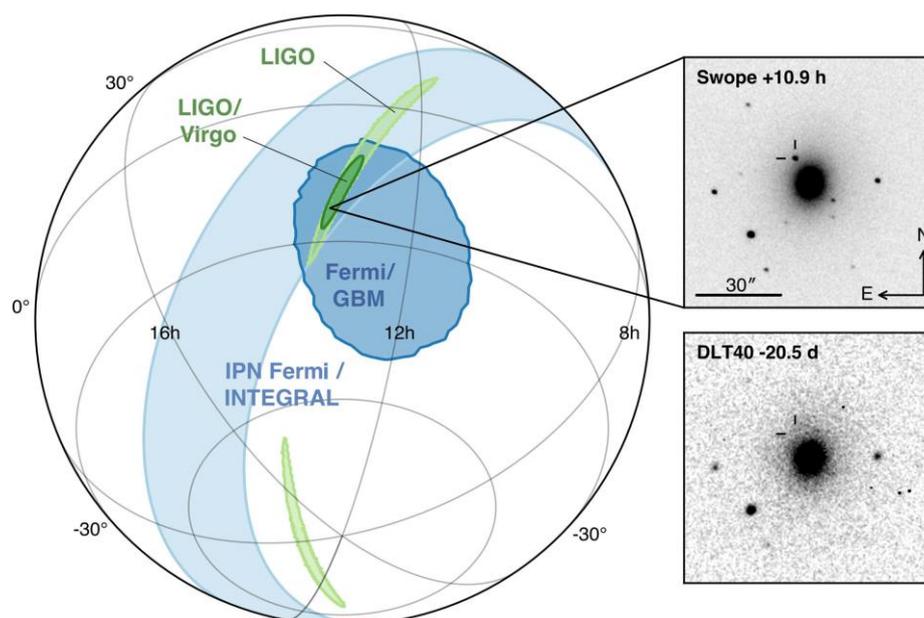


Figure 2 L'impressionante contributo di Virgo alla localizzazione della stella, mostrata nell'immagine in alto a destra, formatasi dopo l'evento del 17 Agosto 2017.

Linee guida per l'insegnante:

La lezione può iniziare usando il set di slides PowerPoint che vengono fornite. Stimola una piccola conversazione con la tua classe by chiedendo ai tuoi studenti le domande qui elencate o quesiti analoghi:

- Che cos'è la gravità? Cosa ha compreso Einstein rispetto a Newton?
- Che cosa sono i buchi neri? Cosa sono le stelle di neutroni.
- Che cosa sono le onde gravitazionali? Chi ha vinto il premio Nobel per la fisica 2017 e perché?
- Che cos'è Virgo?
- Come funziona?
- Visitiamo insieme l'interferometro!!

Le risposte a queste domande sono fornite nelle seguenti sezioni di questo documento e costituiscono l'introduzione alla visita virtuale.

Fase Esplorativa

Domande o Affermazioni

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

- Che cosa sono le onde gravitazionali?
- Come funzionano i rivelatori di onde gravitazionali?
- Quali sono i problemi che devono essere affrontati per poterli progettare e costruire?

Generazione delle ipotesi o spiegazioni preliminari

Linee guida per l'insegnante:

- Il fisico B. Greene, intervistato in un talk show, fornisce una spiegazione molto breve e divertente delle onde gravitazionali e della loro rivelazione:
<https://www.youtube.com/watch?v=ajZojAwfEbs>
- Fumetto INFN sulle onde gravitazionali:
https://www.asimmetrie.it/images/26/pdf/fumetto_allegato_AS26.pdf
- R. Weiss parla della relatività generale e delle onde gravitazionali:
<https://www.youtube.com/watch?v=x7rjlm4SH5U>
- Semplice spiegazione usando disegni:
<https://www.youtube.com/watch?v=YHS9g72npqA>

Step 1



Figure 3 Lo stato dell'astronomia dopo la rivelazione delle onde gravitazionali

Cosa sono le onde gravitazionali?

Le onde gravitazionali possono essere interpretate come la musica dell'universo. Questi segnali sono stati previsti dalla relatività generale, una teoria scientifica, ampiamente confermata sperimentalmente, che Einstein finì di concepire quasi esattamente 100 anni fa, nel 1916.

La relatività fornisce la descrizione più accurata a nostra disposizione della forza che tiene insieme tutto l'Universo, la gravità. Tale forza, studiata fin dall'antichità, raggiunse la sua prima formulazione matematica nei Principia Mathematica di Isaac Newton del 1687. Tale descrizione assumeva che corpi massivi fossero attratti da una forza, inversamente proporzionale al quadrato della distanza, che agiva

istantaneamente su di essi. Tuttavia, Einstein capì per primo che nessun segnale si può propagare in natura a velocità superiori a quelle della luce. Comprese inoltre che il tempo non è una grandezza assoluta ma dipende dal sistema di riferimento in cui siamo. In particolare, più veloci ci muoviamo, più lentamente scorrono le lancette del nostro orologio. Mettendo insieme questi ed altri concetti Einstein giunse ad una descrizione puramente geometrica della forza di gravità. Essa è l'effetto della curvatura dell'intima struttura dell'universo, il cosiddetto spazio-tempo.

Possiamo immaginare lo spazio-tempo come un materasso estremamente rigido, grande come l'universo (figura 4). In assenza di corpi massivi esso è perfettamente piatto; ma appena ci appoggiamo un oggetto pesante, come una palla da bowling, si incurverà in prossimità dell'oggetto, costringendo ogni corpo più leggero, ad esempio una pallina da ping-pong, a scivolare verso di esso o a ruotarvi attorno. In altre parole, corpi leggeri tendono a muoversi verso corpi pesanti, non perché sono attratti da una forza, ma perché i corpi di massa piccola si muovono attraverso lo spazio-tempo che è deformato dai corpi di massa grande.

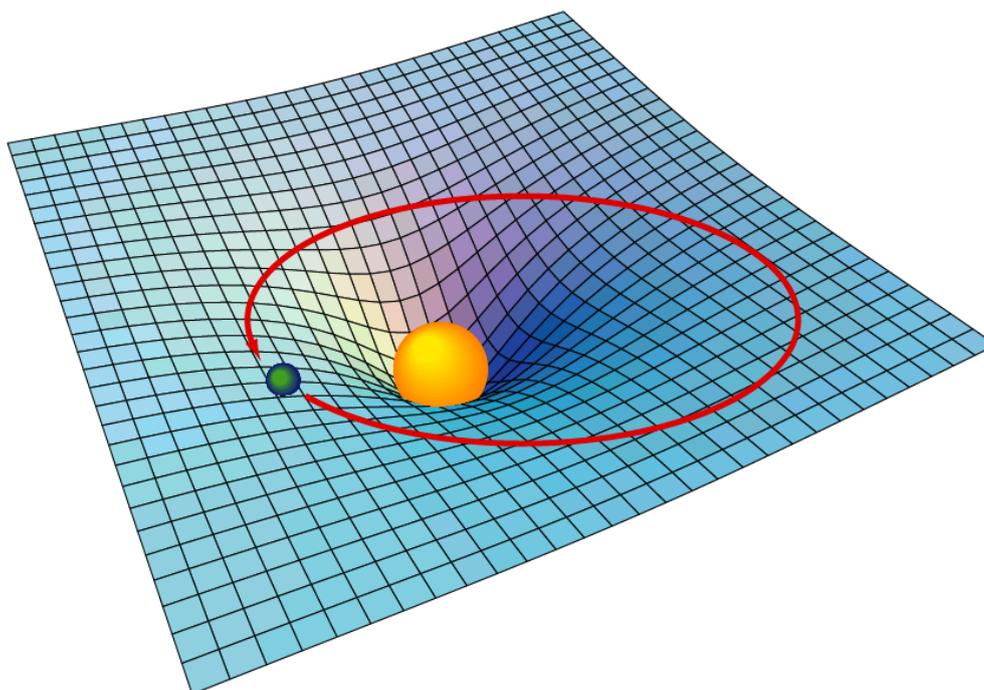


Figure 4 Rappresentazione dello spazio-tempo. Un pianeta orbita attorno al sole a causa della deformazione geometrica prodotta dalla massa della stella.

Se la massa degli oggetti e la loro velocità sono costanti la curvatura prodotta non varia nel tempo. Tuttavia, se immaginiamo ad esempio di togliere istantaneamente i corpi massivi dal materasso esso, per quanto rigido, inizierà ad oscillare per breve tempo. A queste oscillazioni viene dato il nome di onde gravitazionali.

Gli eventi astronomici che producono onde gravitazionali di maggiore intensità sono l'esplosione di supernove o la fusione di resti di stelle ormai morte come le stelle di neutroni o i buchi neri. In prossimità di questi ultimi oggetti il campo gravitazionale è talmente intenso che la luce stessa non è in grado di sfuggirvi.

L'effetto delle onde gravitazionali sulla materia è quello di deformare dinamicamente lo spazio-tempo alla frequenza dell'onda, alterando le dimensioni degli oggetti che l'onda attraversa. Tale deformazione si attenua linearmente con la distanza e diventa piccolissima quando giunge fino a noi. Infatti, quando Einstein prevede l'esistenza delle onde gravitazionali, e ne calcolò l'effetto, giunse alla conclusione che non sarebbe mai stato costruito nessun dispositivo abbastanza sensibile per rivelarle.

Step 2

Possiamo rivelare le onde gravitazionali!!

Fortunatamente si sbagliò: oggi tre potenti strumenti ottici, chiamati interferometri, sono in grado di osservare questi segnali prodotti dall'universo e di localizzarne la provenienza.

Due di questi strumenti, chiamati entrambi LIGO, sono negli Stati Uniti, uno in Louisiana, l'altro nello stato di Washington, mentre il terzo, Virgo, è in Italia, a Cascina, in provincia di Pisa. I tre esperimenti lavorano insieme come un unico rivelatore condividendo i dati.

Virgo è stato inaugurato nel 2003 ed è nato grazie alla collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) italiano e l'equivalente francese del CNR (CNRS). Oggi vi lavorano a turno 400 tra fisici, ingegneri e tecnici di otto paesi europei. Il centro è amministrato e gestito da un consorzio denominato European Gravitational Observatory (EGO).

Cerchiamo di capire come funziona un interferometro!!

Un interferometro laser è come un righello ad alta precisione!

Questo potente orecchio, in piena campagna toscana, ha la forma di una gigantesca L 3 km x 3 km (figura 1). Il principio di funzionamento di tutti gli interferometri è abbastanza semplice. La luce prodotta da un LASER molto potente (25 W per Virgo) attraversa uno specchio semi-trasparente denominato beam-splitter.

Perché si usa un LASER?

Usare un LASER invece di una sorgente luminosa standard – come un LED ad esempio – ha diversi vantaggi. Quello principale è che l'energia del fascio prodotto è concentrata quasi completamente ad una singola frequenza.

Come funziona un interferometro?

Il 50% della radiazione prodotta dal LASER attraversa lo specchio il beam-splitter mentre il 50% viene riflesso a 90 gradi. I due fasci perpendicolari percorrono i due bracci della L, lunghi 3 km, al termine dei quali si riflettono su due specchi; tornano quindi indietro, attraversano nuovamente il beam-splitter e si ricombinano su un banco ottico equipaggiato con una serie di sensori di luce, detti fotodiodi.

Lo schema ottico è disegnato in modo da avere i due fasci in opposizione di fase quando si ricombinano. L'interferometro lavora quindi in una condizione operativa di interferenza distruttiva denominata frangia scura.

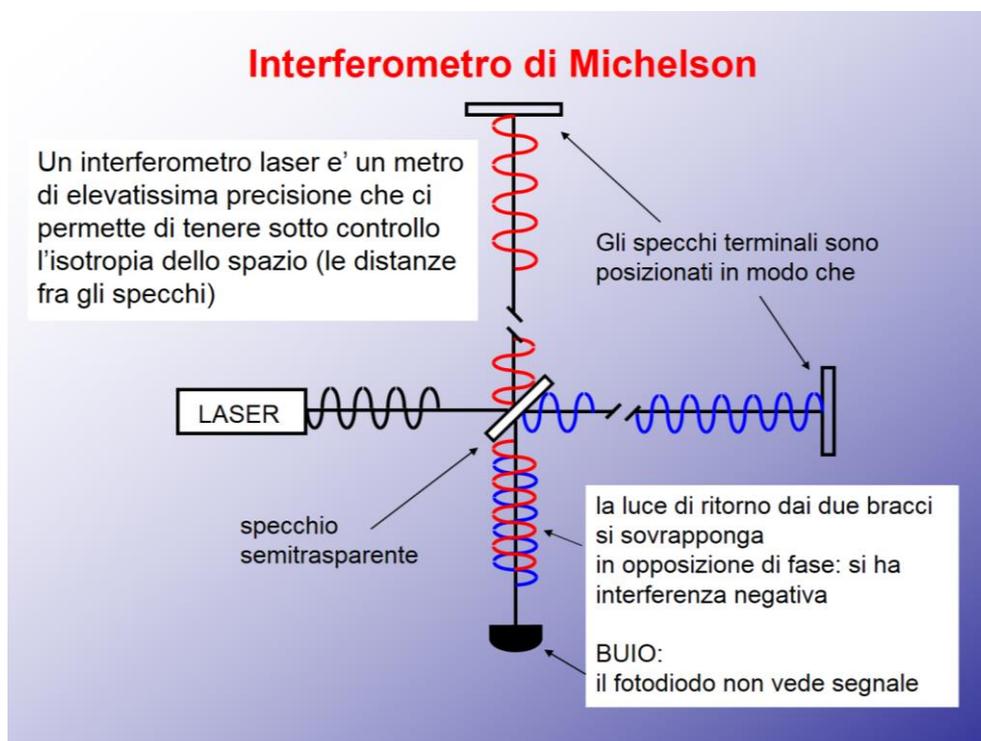


Figura 5 Schema dell'interferometro di Michelson

Step 2

Che cosa succede quando arriva un'onda gravitazionale?

L'onda gravitazionale in arrivo, deformando lo spazio-tempo, produce uno spostamento degli specchi terminali che allontana leggermente l'interferometro dalla condizione di frangia scura, producendo un po' di luce, che viene misurata dai fotodiode, alla frequenza dell'onda.

Ognuno dei bracci dell'interferometro funziona quindi come un grande righello lungo 3 km in grado di misurare piccolissime alterazioni della sua lunghezza. Tali variazioni misurabili da Virgo e da LIGO sono dell'ordine di 10^{-18} m a 100 Hz, una grandezza 1000 volte più piccola del raggio del protone!

Linee guida per l'insegnante:

- Il suono delle onde gravitazionali:
<https://www.youtube.com/watch?v=QyDcTbR-kEA>

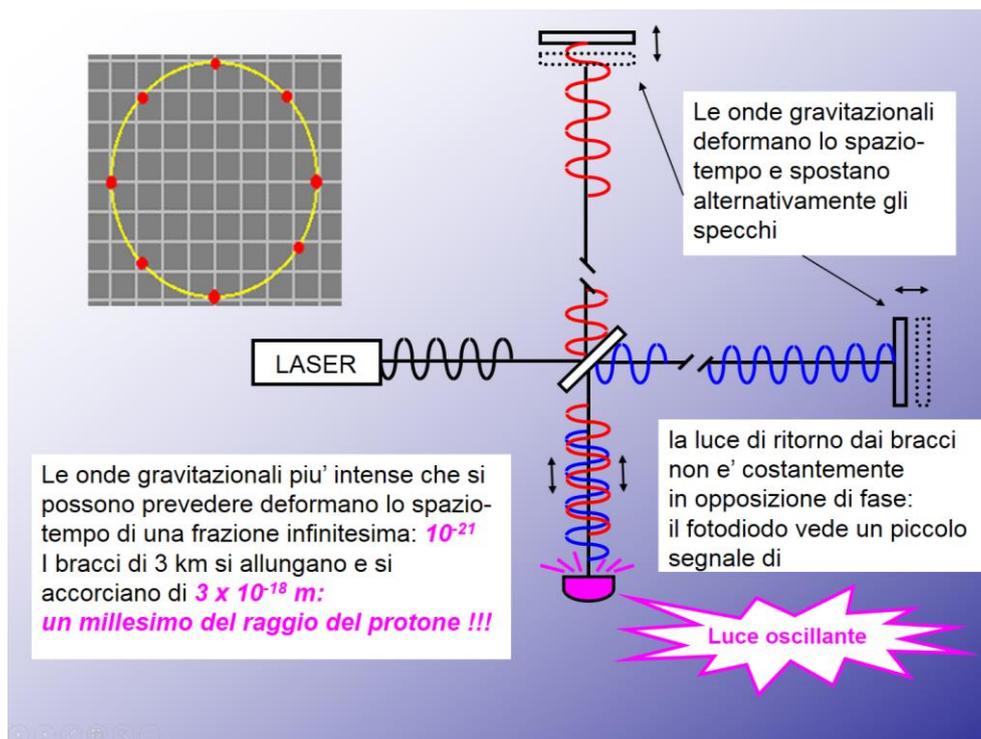


Figura 6 L'effetto di un'onda gravitazionale su interferometro.

Step 3

Quanto sono piccoli 10^{-18} m?

Immagina di versare un bicchiere di acqua nell'oceano. A cause dell'acqua versata il livello globale di tutti i mari sulla terra aumenterà di una quantità molto piccola.

Assumiamo che la Terra sia una sfera con il 70 % della sua superficie ricoperta di acqua. Avremo:

$$S = 70\% \text{ of } 4 \times \pi \times r^2 = 0.7 \times 4 \times 3.14 \times (6.37e6 \text{ m})^2 \sim 3.6e14 \text{ m}^2$$

Il volume di un bicchiere può essere stimato approssimativamente con

$$V = 25 \text{ cc} = 0.25e-3 \text{ m}^3$$

Il rapporto diventa quindi

$$V/S \sim 1e-18 \text{ m}$$

Questa è la stessa sensibilità in spostamento dei moderni rivelatori di onde gravitazionali!!!

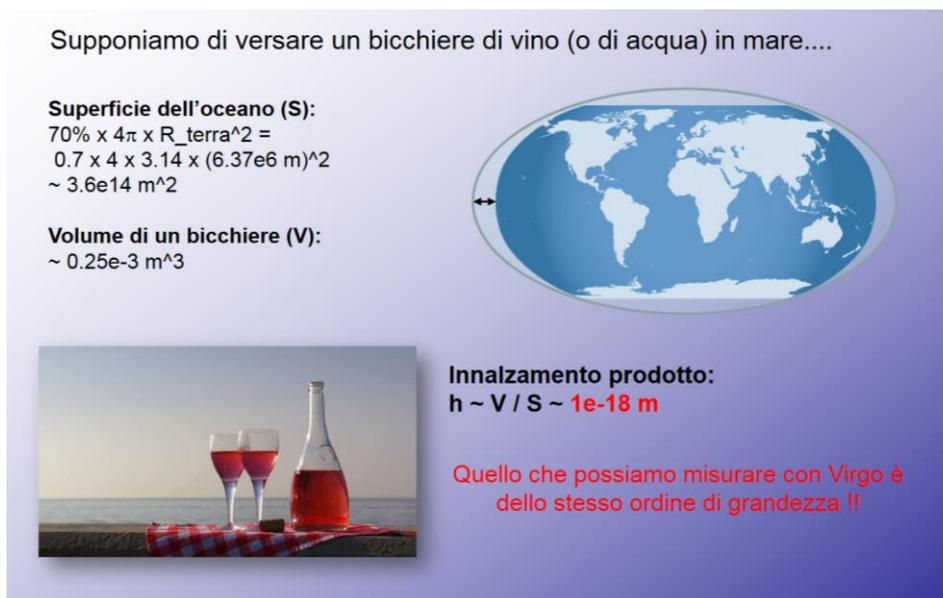


Figura 7 L'impressionante sensibilità dei moderni rivelatori di onde gravitazionali

Quali sono le sorgenti di rumore dei rivelatori di onde gravitazionali?

Molti fenomeni naturali possono produrre un effetto analogo al passaggio di un'onda gravitazionale muovendo gli specchi dell'interferometro o disturbando il suo fascio laser.

Ecco una lista dei rumori principali:

Rivelare onde gravitazionali

Misurare spostamenti di 10^{-18} metri *una misura estremamente difficile*

per **Virgo** sono state sviluppate **tecnologie estreme** per battere i "rumori" che possono produrre falsi segnali, molto più grandi di quelli generati dalle onde gravitazionali:

problema	soluzione
vibrazioni sismiche	specchi sospesi a "superattenuatori" $\times 10^{-12}$
fluttuazioni di pressione	ultra alto vuoto $P = 10^{-12}$ bar
laser	$\nu = 10^{15}$ Hz $\Delta\nu = 10^{-6}$ Hz
specchi	rugosità 10^{-8} m
rumore termico	temperature criogeniche (in futuro)

Figura 8 Sorgenti di rumore di un interferometro per le onde gravitazionali

Step 4

Il rumore sismico ed i super-attenuatori

- Che cos'è il rumore sismico?
- Che cosa succede durante un terremoto?
- Il terreno si muove quando non ci sono terremoti? Se sì, perché?

Il terreno si muove continuamente anche quando non ci sono terremoti. Mentre la parte ad alta frequenza del rumore sismico (sopra 1 Hz) è causata dall'attività umana, il rumore a bassa frequenza è causato dall'eccitazione prodotta dalle onde del mare sulla crosta terrestre.

Il rumore sismico costituisce la principale limitazione a bassa frequenza per la rivelazione delle onde gravitazionali sulla Terra.

Per questa ragione tutte le principali componenti ottiche degli interferometri devono essere sospese rispetto a terra. Virgo utilizza una catena di pendoli lunga 8 m chiamata super-attenuatore. Questo complesso dispositivo meccanico è in grado di ridurre il movimento del terreno di un fattore 10^{12} ossia di un milione di milioni di volte!!

Linee guida per l'insegnante:

- Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Microseism>
- Simple and well done paper on Science magazine:
<https://science.sciencemag.org/content/307/5710/682>

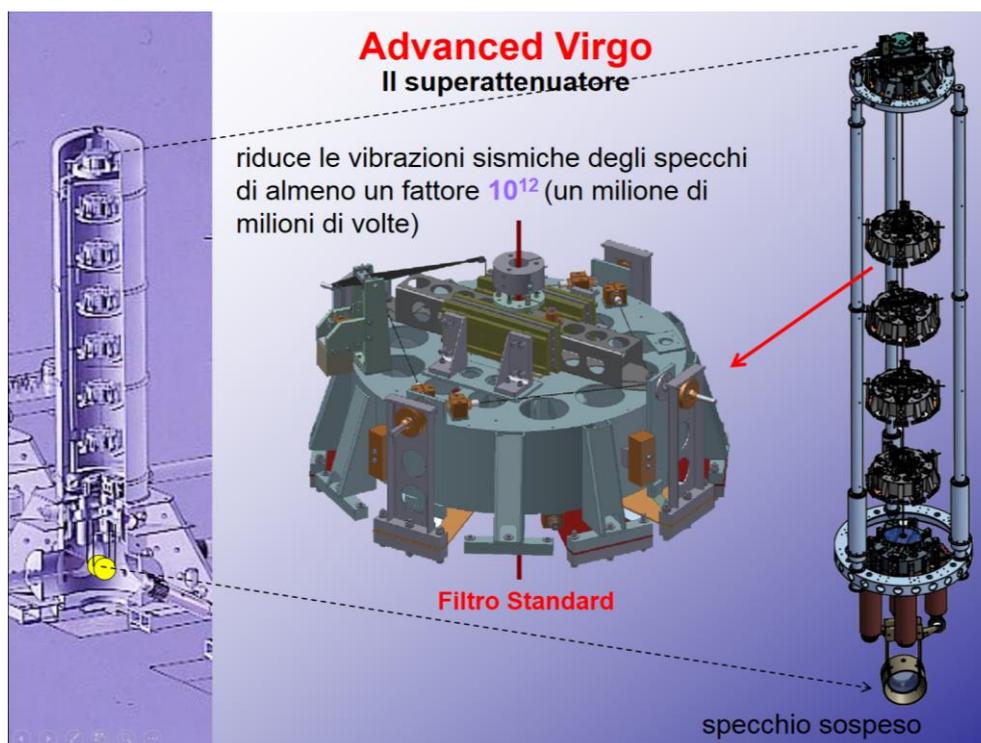


Figura 9 L'impressionante isolatore sismico di Virgo: il super-attenuatore

Step 4

Come è fatto un moderno rivelatore?

Come mostrato in figura 10, un moderno rivelatore di onde gravitazionali come Advanced Virgo è molto più complesso di un interferometro di Michelson.

Tuttavia, le componenti principali rimangono:

- Il LASER.
- Il Beam Splitter (BS).
- Gli specchi terminali. Vengono chiamati North End (NE) e West End (WE) dato che i bracci sono approssimativamente allineati con le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest.
- Il fotodiode o fotorivelatore

Gli specchi di ingresso, chiamati North Input (NI) e West Input (WI), costituiscono la differenza più importante: all'ingresso di ciascun braccio viene aggiunto uno specchio quasi completamente trasparente. Questo stratagemma consente di tenere la luce confinata dentro i bracci aumentando così il cammino ottico effettivo di circa un fattore 400.

Questo vuol dire quindi che Advanced Virgo è equivalente ad un interferometro di Michelson di $400 \times 3 \text{ km} = 1200 \text{ km}$ di lunghezza!!

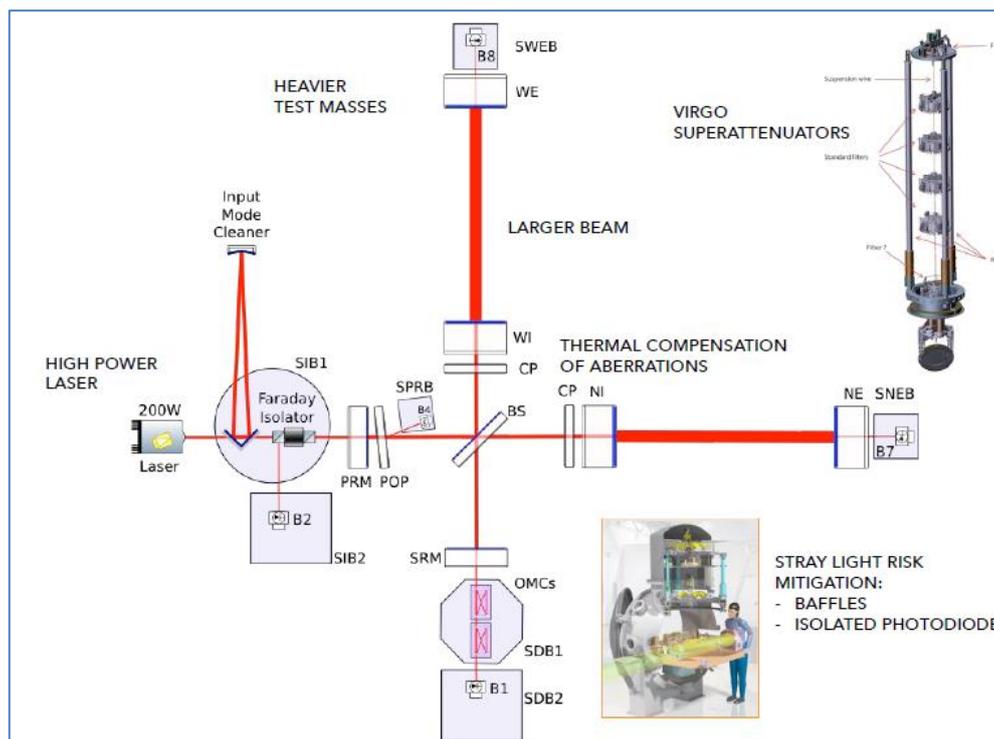


Figure 10 Schema ottico di Advanced Virgo

Linee guida per l'insegnante:

- Video con alcuni dettagli costruttivi di Virgo fatto da NKHEF:
https://www.youtube.com/watch?v=h_FbHipV3No

Prova



Esegui l'investigazione

Opzione 1: Visita standard di Virgo

Esattamente come in una visita standard di Virgo, l'insegnante guiderà gli studenti all'interno dell'edificio sperimentale facendo domande.

Opzione 2: Gioco

Visitiamo l'edificio centrale, il cuore di Virgo, l'unico strumento in Europa capace di vedere!

Sei in grado di riconoscere le parti che costituiscono Virgo?

Dividi i tuoi studenti in gruppi di 4 ed inizia a giocare con loro.

Dov'è il LASER?

Dov'è lo specchio beam splitter?

Dov'è lo specchio North Input?

Una volta che hai identificato le componenti puoi iniziare a muoverti verso di esse per raggiungerle. L'edificio sperimentale di Virgo è come un grande labirinto. Ti devi abbassare e saltare per raggiungere i suoi specchi.

La squadra che raggiunge uno degli obiettivi vince punti.

Analisi e Spiegazione

Analisi: Analizza le prove a disposizione per trovare una possibile risposta

Inizia ad esplorare l'interferometro usando la figura 10 come una mappa del tesoro.

Sei in grado di orientarti nell'edificio sperimentale?

Spiegazione: Formula una spiegazione basata sull'analisi delle tue prove

Inizia identificando una singola componente ottica ed allinea la tua mappa!

Fase di consolidamento

Connetti

Connetti la tua spiegazione con l'attuale conoscenza scientifica

Capisci adesso quanto è grande l'interferometro Virgo?

Capisci quanto è difficile colpire il centro di uno specchio di 30 cm alla fine di un tubo di 3 km di lunghezza? Si riesce a farlo solo perché gli specchi ed il LASER sono fermissimi.

Puoi confrontare l'interno di Virgo con quello del suo fratello americano, LIGO: cerca sul web foto e dati dell'interferometro statunitense.

Comunica

Comunica e giustifica la tua spiegazione

Riassumi tutto ciò che hai imparato, durante questa lezione, con una presentazione.

La presentazione può trattare ognuno dei concetti che hai imparato.

Scegline anche solo uno!! Confronta le tue idee con i tuoi compagni di classe!

Rifletti

Rifletti su quello che hai imparato durante il processo di apprendimento

Rifletti sul tuo viaggio nel mondo delle onde gravitazionali:

Cosa ti ha colpito di più in questa lezione/visita?

Capisci adesso perché ci sono voluti 100 anni per rivelare le onde gravitazionali?

Capisci adesso l'importanza delle onde gravitazionali per il futuro dell'astronomia?