

LE ONDE GRAVITAZIONALI

Il dossier è articolato nelle seguenti sezioni:

Articoli

Glossario

Competenze

Collegamenti interdisciplinari

Ulteriori risorse online

Articoli

Articolo di Veronica Nicosia, pubblicato su OggiScienza

Onde gravitazionali scoperte: confermata relatività di Einstein

Segui il link per leggere l'articolo direttamente sul sito di OggiScienza

<http://oggiscienza.it/2016/02/11/onde-gravitazionali-relativita-einstein/>

CRONACA – Le **onde gravitazionali** sono state osservate per la prima volta e promettono di aprire un nuovo capitolo nella storia della fisica. I ricercatori degli esperimenti **Ligo** e **Virgo** alle 16,30 dell'11 febbraio hanno annunciato di aver scoperto le onde gravitazionali, le vibrazioni dello spazio-tempo ipotizzate da **Albert Einstein** un secolo fa nella sua teoria della relatività generale. Una scoperta annunciata in contemporanea a Washington e a Cascina, in provincia di Pisa, le due città in cui si trovano le sedi delle due antenne che hanno permesso la rivelazione di questo “chirp”, letteralmente in italiano un “cinguettio”, come lo definiscono i ricercatori che hanno ascoltato per la prima volta le onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due buchi neri.

L'emozione nei volti degli scopritori delle onde gravitazionali che hanno preso parte alla conferenza stampa è molta e l'annuncio è senza precedenti. Un annuncio che vale doppio per la storia della fisica. Non solo le onde gravitazionali costituiscono la conferma della teoria della relatività enunciata da Einstein, ma anche la prova diretta dell'esistenza dei buchi neri. La scoperta è il frutto della collaborazione delle antenne interferometriche Ligo, Advanced Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, costituito da due giganti rilevatori, uno a Livingston in Louisiana e uno ad Hanford, vicino Washington, e all'esperimento Virgo, le cui antenne che si trovano a Cascina vicino Pisa fanno capo allo European Gravitational Observatory (Ego), dove a coordinare le operazioni c'è un ruolo attivo e importante dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Infn, insieme ai colleghi del Centre National de la Recherche Scientifique (Cnrs).

Il primo segnale delle onde gravitazionali è stato rivelato da Ligo il 14 settembre 2015 alle 10,50 ora italiana da entrambi gli strumenti, sia le antenne di Livingston che quelle di Hanford, con una finestra temporale di coincidenza di 10 millisencondi. Un risultato che è stato pubblicato l'11 febbraio sulla rivista scientifica Physical Review in cui viene descritto il processo da cui le onde gravitazionali sono state originate.

L'esperimento Ligo ha osservato il segnale prodotto nell'ultima frazione di secondo del processo di fusione di due buchi neri che orbitavano uno intorno all'altro, costituendo così un sistema binario, con masse pari a 29 e 36 masse solari. I due buchi neri si sono fusi fino ad originare un unico buco nero di 62 masse solari e proprio le 3 masse solari mancanti dalla somma equivalgono all'energia che è stata emessa sotto forma di onde gravitazionali, queste vibrazioni che secondo la teoria della relatività generale di Einstein si originano proprio da un evento cosmico violento, come la collisione di due buchi neri, l'esplosione di una supernova o il Big Bang da cui ha avuto inizio l'universo.

Fulvio Ricci, ricercatore dell'Infn che coordina la collaborazione internazionale Virgo e professore dell'Università La Sapienza di Roma, ha spiegato che il risultato rappresenta “una pietra miliare nella storia della fisica”:

“Ma ancor più è l'inizio di un nuovo capitolo per l'astrofisica, perché nei prossimi anni continueranno ad arrivare altri importanti risultati dagli interferometri Ligo e Virgo, che oggi sono organizzati in un'unica rete globale di rivelatori di onde gravitazionali. Osservare il cosmo attraverso le onde gravitazionali cambia radicalmente le nostre possibilità di studiarlo: fino ad ora è come se lo avessimo guardato attraverso delle radiografie, mentre adesso siamo in grado di fare l'ecografia del nostro universo”.

Quella che sembrava una sfida impossibile, perché i segnali da rivelare apparivano troppo deboli, è stata vinta e con successo. A parlarne è Pia Astone, ricercatrice Infn che ha curato l'articolo pubblicato sulla rivista scientifica insieme ad altri cinque colleghi di Virgo e Ligo: “Finalmente possiamo osservare l'universo con occhi diversi, non è un caso, infatti, che la prima misura diretta di ampiezza e fase delle onde gravitazionali sia stata accompagnata da un'altra importante scoperta, quella della fusione di un sistema binario di buchi neri”.

Una doppia scoperta, dunque, che arriva in una occasione speciale e cioè nel centenario della Relatività Generale, come ha aggiunto il presidente dell'Infn Fernando Ferroni commentando l'annuncio: “Questo risultato rappresenta un regalo speciale, il sigillo finale sulla meravigliosa teoria che ci ha lasciato il genio di **Albert Einstein**”.

Articolo di Veronica Nicosia, pubblicato su OggiScienza

Onde gravitazionali, istruzioni per l'uso: ascolteremo l'universo

Segui il link per leggere l'articolo direttamente sul sito di OggiScienza

<http://oggiscienza.it/2016/02/12/onde-gravitazionali-astrofisica-relativita-einstein/>

APPROFONDIMENTO – “Abbiamo scoperto le [onde gravitazionali](#)”. Un annuncio che cambia per sempre la storia della fisica e dell'astrofisica e il modo in cui indaghiamo i misteri dell'universo. La scoperta delle onde gravitazionali, che come effetto “collaterale” ha portato anche alla prima prova diretta dell'esistenza dei buchi neri, apre la strada all'ascolto dell'universo. Il segnale rivelato da **Ligo**, Advanced Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, è infatti un segnale di tipo sonoro, un “chirp” o cinguettio che porta con sé dati e informazioni unici, che combinati con i telescopi di tipo elettromagnetico e ottico possono aiutare a comprendere e svelare i misteri che il cosmo ancora cela.

Una doppia scoperta dall'odore di doppio Premio Nobel e una grande soddisfazione per i ricercatori di Ligo e dell'esperimento **Virgo** di Cascina frutto della collaborazione Ego (European Gravitational Observatory) che ha visto gli italiani dell'Infn (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) attivi in prima linea. Il risultato di anni di duro lavoro è stato pubblicato sulla rivista scientifica [Physical Review Letters](#), solo il primo di una lunga serie di paper che aprono un nuovo metodo di indagine del cielo.

Un cinguettio dallo spazio

La prima onda gravitazionale della storia della fisica è stata ascoltata il 14 settembre 2015 alle ore 10.50 ora italiana. Le collaborazioni Ligo e Virgo hanno osservato le onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due **buchi neri**, che costituivano un sistema binario formato da due oggetti con masse rispettivamente di 36 e 29 masse solari (il Sole ha una massa 332 946 volte quella della Terra), lontani dal nostro pianeta 1,3 miliardi di anni luce.

I due buchi neri hanno spiraleggiato uno attorno all'altro fino a collidere e dare vita ad una fusione che ha irradiato il 4,6% di energia del sistema sotto forma di onde gravitazionali, mentre la restante energia ha dato vita a un altro buco nero ruotante con una massa pari a 62 volte quella del Sole e rotazione adimensionale pari a 0,67.

Cosa sono le onde gravitazionali?

Immaginate di lanciare un sasso in uno stagno. La cresta dell'acqua inizierà a incresparsi e delle onde concentriche si propagheranno sulla superficie. Ora immaginate il tessuto dello spazio-tempo descritto da **Albert Einstein** nella teoria della **relatività generale** enunciata 100 anni fa. Ogni oggetto avente massa nello spazio-tempo crea delle increspature, o meglio delle vibrazioni, che lo perturbano. Queste vibrazioni sono proprio le onde gravitazionali.

Dato che le onde gravitazionali emesse da un qualsiasi corpo sono talmente deboli da poter essere rivelate, Einstein aveva previsto che per poterle ascoltare avrebbero dovuto essere prodotte da fenomeni cosmici violentissimi, proprio come la collisione di due buchi neri massivi, l'esplosione di una supernova o addirittura come eco del Big Bang, l'esplosione da cui l'universo ha avuto vita così (come iniziamo a conoscerlo oggi).

Onde gravitazionali, istruzioni per l'uso

Le vibrazioni nello spazio-tempo possono essere osservate sotto forma di suono, proprio come hanno fatto gli interferometri Ligo e Virgo, tanto che il segnale rivelato è un "cinguettio" in una finestra temporale di appena una decina di millisecondi. Una frazione di tempo sufficiente a rilevare l'onda e a indagare con altri tipi di telescopio, ad esempio quelli ottici o elettromagnetici, il fenomeno appena osservato. Ma a cosa serve la scoperta più importante per l'astronomia e la fisica moderna?

I buchi neri esistono davvero. Il primo risvolto è sicuramente questa conferma. Le onde gravitazionali hanno permesso sì di confermare la validità scientifica della teoria della **relatività generale** di Einstein, ma hanno anche fornito la prima evidenza diretta dell'esistenza dei buchi neri, oggetti che non possono essere osservati con gli altri telescopi dato che il loro campo gravitazionale è così potente da non lasciar scappare dall'orizzonte degli eventi nemmeno i fotoni, le particelle prive di massa che viaggiano alla velocità della luce.

Solo un paio di giorni prima della scoperta a sottolineare l'importanza di una prova come questa in un articolo su *Nature* era Frans Pretorius, specialista in simulazioni di relatività generale alla Princeton University del New Jersey, che aveva detto: "La comunità scientifica, me incluso, è diventata scettica circa i buchi neri. Li abbiamo presi per buoni, ma se si pensa che si tratta di previsioni sorprendenti, abbiamo davvero bisogno di prove sorprendenti".

Quanto pesa un **gravitone**? Altra domanda a cui la scoperta potrà rispondere è se il gravitone, la particella "portatrice" della gravità (proprio come il fotone si fa carico della luce), abbia o meno massa. Secondo la teoria della relatività generale le onde gravitazionali si propagano nello spazio-tempo viaggiando alla velocità della luce. Questo accadrebbe se i gravitoni, proprio come i fotoni, fossero privi di massa. Se invece ne avessero una, anche piccolissima, le onde si propagherebbero a una velocità inferiore a quella della luce.

Nell'articolo pubblicato da Virgo e Ligo si è ottenuta una stima del limite superiore della massa del gravitone pari a 1,2 per 10⁻²² elettronvolt/c. Una stima che apre la strada alla determinazione della massa di questa particella.

Dallo scetticismo all'annuncio

Quando Ligo è stato realizzato e finanziato nei primi anni Novanta del Novecento i suoi maggiori oppositori erano proprio gli astronomi. Clifford Will, un teorico della relatività generale della University of Florida di Gainesville e primo supporter di Ligo, ha scritto in un articolo su *Nature*: "L'opinione generale era che Ligo non avesse molto a che fare con l'astronomia. Ma le cose sono cambiate".

A testimoniare il cambiamento sono sicuramente le parole di David Reitze, il direttore esecutivo di Ligo, che ha annunciato in diretta mondiale la scoperta attesa ormai da 100 anni con una semplice frase, ma carica di emozione: “Signore e signori, abbiamo scoperto le onde gravitazionali”.

Un annuncio che rappresenta solo l’inizio di un nuovo modo di indagare l’universo e trasporta la storia della fisica e dell’astrofisica verso la scrittura di un capitolo totalmente nuovo e con strumenti mai utilizzati in precedenza. Darà a scienziati e ricercatori la possibilità non solo di vedere i fenomeni fisici e astronomici attraverso l’uso di telescopi ottici ed elettromagnetici, anche di ascoltarli con sempre maggiore chiarezza usando gli interferometri come Ligo e Virgo (ma anche come **Kagra** in Giappone e **Lisa Pathfinder**, la sonda spaziale dell’ESA lanciata nel 2011 proprio per dare la caccia alle onde gravitazionali).

Lo studio dei buchi neri, della teoria delle stringhe, della gravità e dell’esistenza della materia oscura. Ora abbiamo un nuovo motivo per andare a caccia di tutti i più profondi segreti dell’universo che attendono ancora di essere svelati. Gli scettici hanno dovuto ricredersi grazie a un cinguettio, tanto delicato quanto potente, perché con questa scoperta ora possiamo ascoltare quello che prima potevamo solo vedere.

Articolo di Cristina Da Rold, pubblicato su OggiScienza

I radiotelescopi per rilevare le onde gravitazionali

Segui il link per leggere l’articolo direttamente sul sito di OggiScienza

<http://oggiscienza.it/2016/03/11/radiotelescopio-onde-gravitazionali-pulsar/>

RICERCA – La recente rivelazione delle **onde gravitazionali** durante la fusione di due buchi neri, ognuno con massa circa 30 volte quella del nostro Sole, è avvenuta grazie a uno strumento potentissimo come l’interferometro LIGO ([Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#)), che da oltre dieci anni ha il compito di osservare le onde gravitazionali previste dalla **teoria della relatività**.

Un nuovo studio della [North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves](#) (NANO-Grav) ha mostrato però che le onde gravitazionali a bassa frequenza potrebbero presto essere rilevabili anche con i **radiotelescopi** esistenti. NANOGrav vede la collaborazione di oltre 60 scienziati e più di dieci di istituti fra Stati Uniti e Canada. Il gruppo utilizza dati acquisiti dal *NRAO Green Bank Telescope* in West Virginia e dal *Arecibo Radio Observatory* a Puerto Rico. Nel 2015 la *National Science Foundation* ha assegnato a NANOGrav 14,5 milioni di dollari per creare e gestire un centro sulla ricerca di frontiera in fisica.

“Rilevare questo segnale è possibile se siamo in grado di monitorare un numero sufficientemente ampio di pulsar sparse in tutto il cielo, e il punto sarà osservare lo stesso tipo di deviazione in tutte loro”, ha affermato Stephen Taylor, autore principale dello studio pubblicato sulla rivista

sta [Astrophysical Journal Letters](#). Il gruppo di ricerca studia da tempo il modo migliore per utilizzare le pulsar, stelle di neutroni ad alta densità che emettono **radiazione magnetica**, per rilevare i segnali provenienti da onde gravitazionali a bassa frequenza.

“Le onde gravitazionali attraversano costantemente la Terra – ha aggiunto Taylor – e dato il gran numero di pulsar che osserviamo con NANOGrav e grazie alla collaborazione di altre squadre internazionali, ci aspettiamo di ottenere prove chiare dei segnali provenienti da onde gravitazionali a bassa frequenza entro il prossimo decennio.”

Articolo di Veronica Nicosia, pubblicato su OggiScienza

Onde gravitazionali, dall’alert di Ligo verso una nuova fisica

Segui il link per leggere l’articolo direttamente sul sito di OggiScienza
<http://oggiscienza.it/2016/03/15/onde-gravitazionali-ligo-relativita/>

APPROFONDIMENTO – Sono le 10.50 del mattino del 14 settembre in Italia, quando una mail inviata da **Ligo**, Advanced Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, cambia la storia della fisica. Una semplice mail che lancia un “alert”: Ligo come ogni giorno raccoglie segnali a caccia di **onde gravitazionali** tra tanto rumore di fondo e qualche segnale “blind” di controllo. Ma questo alert appare da subito diverso dagli altri e **Marco Drago**, fisico dell’Università di Padova e postdoc al Max Planck Institute for Gravitational Physic di Hannover in Germania, lo capisce subito.

Come funziona l’esperimento?

“Ligo riceve i segnali e i 4 algoritmi, tra cui quello elaborato da me e dai miei colleghi delle università della Florida, di Padova e di Trento, analizzano i dati in tempo reale. Estraggono gli eventi interessanti inviando degli alert, che nel giro di qualche minuto o al massimo qualche ora vengono passati ai telescopi ottici perché possano puntare la sorgente e verificare cosa abbiamo osservato. Gli alert sono abbastanza comuni e ne riceviamo almeno uno al giorno, perché la nostra soglia di attenzione è abbastanza bassa”.

Ma quell’evento aveva qualcosa di diverso?

“Quell’evento era molto diverso dagli altri per almeno due motivi. Il primo è l’**energia**, oltre il doppio rispetto agli altri eventi osservati. Il secondo è la forma, perché il nostro algoritmo è in grado di ricostruirla: era chiaro che si trattava di due corpi che si fondevano e ne formavano uno solo. Questo tipo di segnali ha una frequenza che tipicamente aumenta con l’andare del tempo e si riconosce facilmente a prima vista. Non che potessimo sapere che erano proprio due **buchi neri** senza tutti i calcoli del caso, ma quel tipo di sistema binario era più che riconoscibile”.

Nessuno prima di voi aveva osservato le onde gravitazionali. Come si crea un algoritmo in grado di riconoscerle?

“Il nostro **algoritmo** fa parte di quella ricerca in cui non si dispone di modelli specifici, quindi bisogna essere aperti a tutto il possibile e immaginabile. Questo, in effetti, dà delle complicazioni in più, perché devi cercare di essere il più possibile sensibile a tutto quello che potrebbe essere un’onda gravitazionale. Ovviamente non mancano i problemi: i rumori dei rivelatori sono tanti e la natura ti sorprende sempre, riesce sempre a restituire un segnale che non è onda gravitazionale ma l’algoritmo lo pesca come tale, quindi poi è necessaria una analisi statistica molto raffinata”.

Quali sono i problemi in questo tipo di rivelazioni?

“Il nostro problema principale è cercare di non essere accecati da tutte quelle possibili sorgenti di rumore che, sostanzialmente, sembrano essere onde gravitazionali ma non lo sono. Soprattutto negli ultimi anni c’è stato un netto miglioramento della parte algoritmica, e noi abbiamo sempre lavorato per cercare di diminuire questa sorgente di rumore. Ogni giorno si cercano nuovi metodi e si fanno nuovi studi per risolvere questa questione.

Poi una volta ottenuta la rivelazione, il problema diventa la caratterizzazione dell’evento al meglio possibile. Il nostro algoritmo è molto completo e dà anche una stima della forma d’onda nel tempo, che a seconda di quanto è energetico è più o meno sporcata dal rumore intrinseco”.

L’esperimento Ligo dispone di un sistema di controllo. Solo pochi scienziati tra i centinaia della collaborazione Ligo-Virgo erano a conoscenza degli eventi “blind”, cioè l’immissione nell’interferometro di “finte” onde gravitazionali. Non hai sospettato che l’evento del 14 settembre potesse essere uno di questi?

“In effetti quando ho visto l’evento e la sua forma ho pensato potesse trattarsi di una blind, la forma era troppo perfetta e si fatica sempre a credere di avere per le mani una scoperta di questa entità. Poi una volta realizzato che non si trattava di quel caso e riguardando l’evento, che è stato molto potente, abbiamo capito di cosa si trattava. Ma lo scetticismo in questi casi è d’obbligo e ora appare chiaro perché abbiamo atteso febbraio per pubblicare i nostri risultati”.

Qual è stato il ruolo dei ricercatori italiani?

“Tutta l’Italia è nella collaborazione di Ligo-Virgo e anche se l’interferometro di Cascina era spento al momento della rivelazione del segnale, gli scienziati italiani della collaborazione hanno avuto pieno accesso ai dati. Per quanto riguarda l’evento in sé stesso, tutti i ricercatori di Virgo che si occupano di **data analysis** hanno contribuito a dare significanza all’evento, in particolare il gruppo di Padova-Trento con cui lavoro. D’altronde tra i due risultati sulla significanza dell’evento che compaiono nel paper, uno è il nostro.

Poi ci sono anche gruppi che lavorando in un ambito diverso hanno contribuito dando una stima più raffinata dei parametri dell’evento stesso, anche se noi siamo più focalizzati sulla rivelazione, cioè il passo successivo al nostro, e sono molti i gruppi italiani che se ne occupano”.

Ora Ligo “riposa” dopo lo sforzo, ma la scoperta è solo la punta dell’iceberg. Quali sono i prossimi passi che vi attendono? E quali le prospettive per il futuro della fisica gravitazionale?

“Al momento abbiamo analizzato i dati raccolti dal 14 settembre al 20 ottobre e ora stiamo analizzando i dati raccolti fino a metà gennaio. Nel giro di qualche mese riusciremo a pubblicare anche altri risultati e potremo dire se sono state trovate altre onde gravitazionali, anche più piccole dato che eventi potenti come questo sono rari.

Poi nell’estate verranno riaccesi i rivelatori di Ligo, e forse anche di Virgo, per almeno sei mesi in modo da avere una caratterizzazione del cielo nettamente migliore a quella avuta finora e speriamo, ovviamente, di riuscire a vedere altri eventi.

Quello che ora speriamo è di poter osservare altri eventi e con una frequenza maggiore, in modo da capire ancora meglio il fenomeno che stiamo appena conoscendo e di determinare i parametri che lo caratterizzano. Poi, quando avremo un buon numero di eventi e una buona statistica, finalmente si comincerà a fare anche fisica gravitazionale”.

Glossario

Buchi neri: regioni dello spazio-tempo che esercitano un campo gravitazionale talmente forte da non permettere a nulla che si trovi al loro interno, nessun tipo di particella o radiazione elettromagnetica, di raggiungere l'esterno. Tutti questi eventi si verificano al di là di una superficie limite che prende il nome di "orizzonte degli eventi", oltre la quale ogni cosa diventa inaccessibile a un osservatore esterno. La luce subisce quello che si chiama redshift gravitazionale (lo spostamento verso il rosso, ovvero verso una frequenza minore) infinito: non c'è alcuna emissione di luce ed è proprio per questo che si usa l'aggettivo "neri".

Onde gravitazionali: Secondo la teoria della relatività generale formulata da Albert Einstein (vedi sotto) si tratta di vibrazioni che hanno origine da un violento evento cosmico, come l'esplosione di una supernova, il Big Bang o la collisione di due buchi neri. Quest'ultima circostanza, oltre ad aver provato l'esistenza dei buchi neri, è anche quella che ha permesso agli scienziati di confermarne l'esistenza delle stesse onde gravitazionali, nel 2015 (la scoperta è stata resa pubblica l'11 febbraio 2016).

Radiotelescopio: Un telescopio utilizzato per individuare le onde emesse da radiosorgenti nell'Universo, come le stelle di neutroni ad alta densità, sfruttando una o più antenne. La branca dell'astronomia che sfrutta questi strumenti è detta radioastronomia.

Relatività generale: Nel 2015 ricorreva il centenario di questa famosa teoria di Albert Einstein, il fisico di Berna che al tempo rivoluzionò il concetto di gravità. In base a un'equazione di campo, fulcro della teoria della relatività generale, la forza di gravità è la manifestazione di una curvatura dello spazio-tempo. Ovvero della struttura quadrimensionale dell'Universo nel quale viviamo. Nello sviluppo di questa teoria -che nel tempo venne confermata da studi scientifici andando ben oltre l'essere un'ipotesi- Einstein si servì anche delle conoscenze matematiche e delle scoperte degli scienziati italiani del tempo, come Tullio Levi-Civita, Gregorio Ricci-Curbastro e Luigi Bianchi.

Competenze

Le onde gravitazionali a conferma della teoria di Einstein

Lo scorso febbraio un gruppo di ricercatori degli esperimenti Ligo e Virgo hanno annunciato l'osservazione di onde gravitazionali, una scoperta epocale che conferma la teoria della relatività generale formulata da Einstein poco più di cento anni fa.

1. Nell'articolo "Onde gravitazionali, istruzioni per l'uso: ascolteremo l'universo", la giornalista utilizza un esempio tratto dall'esperienza comune per spiegare che cosa sono le onde gravitazionali. Rintraccia nel testo questo esempio e spiega in che modo la descrizione può fornire una spiegazione delle onde gravitazionali.

2. La prima notifica della rilevazione di onde gravitazionali è arrivata in modo insolito: è stata infatti una mail inviata in modo automatico da Ligo a indicare il segnale. Nell'articolo "Onde gravitazionali, dall>alert di Ligo verso una nuova fisica", il ricercatore Marco Drago racconta in un'intervista come ha riconosciuto nella mail inviata da Ligo qualcosa di speciale. Lavorando con un piccolo gruppo di compagni, immaginate di realizzare un breve podcast per la radio sul modo in cui è avvenuta la scoperta. Scrivete i testi e registrate gli audio della puntata.

3. Alcune critiche ai finanziamenti pubblici alla ricerca sostengono che molti studi siano troppo astratti e inutili, e che molte scoperte non servano a niente. Immagina di dover tenere una presentazione pubblica sull'importanza dell'osservazione delle onde gravitazionali e sulla necessità di continuare i finanziamenti in questo settore della ricerca. Prepara una traccia della presentazione, individuando negli articoli che hai letto le argomentazioni principali.

4. L'articolo "I radiotelescopi per rilevare le onde gravitazionali" presenta la possibilità di rilevare onde gravitazionali anche con i radiotelescopi, oltre che con potenti interferometri come Ligo. Con un gruppo di compagni, fate una ricerca su Internet sulle caratteristiche di questi diversi strumenti e preparate un'infografica per illustrare i risultati.

Collegamenti interdisciplinari

Matematica

Comprendere lo stretto legame tra matematica e scienza

Il concetto di onda si trova in molti ambiti della scienza e non solo: onde gravitazionali, elettromagnetiche, onde del mare, onda sonora. Un'onda indica una perturbazione che nasce da una specifica sorgente e si propaga nel tempo e nello spazio con un trasporto di energia oppure di quantità di moto. Tutte le onde hanno la stessa descrizione matematica? Ci sono altri casi di uno strumento matematico che può essere applicato a diversi concetti fisici o scientifici in generale?

Storia

Comprendere il ruolo degli scienziati all'interno della società moderna

Einstein, oltre a essere un importante scienziato, si è spesso occupato del ruolo della scienza nella società. Un esempio è stato il suo pacifismo e la sua contrarietà all'utilizzo della bomba atomica durante la seconda guerra mondiale. Interessante, in questo senso, è il carteggio esistente tra Freud e Einstein sui temi della pace e sul ruolo dell'intellettuale e della scienza nella società. Quali erano le posizioni dei due scienziati? Quali le idee alla base del pacifismo di Einstein? Gli scienziati devono avere un ruolo pubblico nelle controversie e nel dibattito sui temi di attualità?

Letteratura

Comprendere il legame tra le teorie fisiche e filosofiche

Anche se la teoria della relatività si concentra sulla costruzione di grandezze invarianti ha avuto un grande impatto al di là della fisica e della scienza, diventando un concetto dell'immaginario comune: la descrizione del mondo dipende dalla condizione in cui si trova l'osservatore. In questo senso è stata utilizzata, o legata a posteriori, a molti testi letterari e filosofici come il relativismo pirandelliano o la relatività della conoscenza di Kant. Che legami ci sono tra queste rappresentazioni della realtà e modi di pensare?

Ulteriori risorse online

La fusione di due buchi neri

https://www.youtube.com/watch?v=l_88S8DWbcU

Link4Universe, cosa succede alla materia in un buco nero

<https://www.youtube.com/watch?v=kanV5vziarw>