



energia ed ampiezza invece si riducono con la distanza, l'ampiezza in particolare si riduce proprio con la distanza, esattamente come avviene per le onde sferiche. Per questo motivo, la misura della ampiezza di alcune classi di segnali, quali proprio quelli visti, ci consente di determinarne con buona precisione la distanza. E le sorgenti di questo tipo (coppie di oggetti compatti che coalescono) possono essere considerati "candele standard", ossia ci aiutano a fissare scale di distanza nell'Universo.

- **Ma la grandezza ad oscillare è la curvatura?**

La grandezza che oscilla è proprio lo spazio-tempo. Se lo vediamo come un tessuto elastico la curvatura viene dalla presenza di masse e le onde gravitazionali sono increspature dello stesso spazio-tempo che si muovono allontanandosi dalla sorgente che le ha prodotte (uno scontro fra masse, una stella di neutroni che ruota velocemente) alla velocità della luce (per quanto sappiamo oggi).

- **Ma se all'arrivo l'onda modifica lo spazio in tutto l'esperimento come è possibile fare una misura. Nel senso se tutto è distorto allo stesso modo come ci si accorge di una differenza di curvatura in due punti. Anche perchè immagino che la lunghezza d'onda sia parecchio lunga (questa è una mia assunzione non informata).**

L'osservazione è assolutamente pertinente: come faccio a fare la misura se anche il mio metro cambia? Il punto è che noi non usiamo il metro per fare la misura, ma misuriamo qualcosa che è dipendente solo dal tempo che la luce impiega a percorrere ciascun braccio e tornare indietro. La figura di interferenza che si produce dipende solo dalla differenza di fase fra i due raggi luminosi (con un effetto del tutto trascurabile sulla variazione della lunghezza d'onda del laser) e siccome la velocità del raggio del laser è sempre quella della luce, questa differenza dipenderà solo dalla differenza di lunghezza dei 2 bracci.

La lunghezza d'onda del laser che usiamo adesso è  $10^{-6}$  m, molto maggiore dell'effetto di deformazione aspettato per il passaggio di un'onda gravitazionale. La scelta dipende soprattutto dal fatto che il laser deve avere una stabilità molto alta, la sua frequenza non deve cambiare (entro certi valori di requisito che a noi servono e che sono molto spinti) e i laser Nd:Yag che emettono appunto nell'infrarosso lo sono.

-

- **Quali sono i metodi per schermare i "RUMORI"?**

I metodi dipendono dal tipo di rumore da schermare. Ciascun rumore si manifesta con caratteristiche diverse e in regioni di frequenza diversa. Le dico subito che il problema è molto complesso in quanto ci si trova a volte in situazioni in cui il rimedio ad un tipo di rumore peggiora l'effetto di un altro. Infatti quando vi ho mostrato ET ho velocemente detto " si tratta di diversi rivelatori " in quanto ciascuno sarà ottimizzato per ridurre rumori in una certa regione di frequenze e l'insieme porterà ad una ottimizzazione complessiva. Detto questo, rispondo più precisamente (sempre restando sul generale): il rumore sismico (frequenze basse) si scherma con l'uso del super-attenuatore (vi ho mostrato foto e potreste facilmente costruirvi un modellino di pendolo invertito per verificare); il rumore termico (frequenze intermedie) ha effetti che si riducono usando materiali a bassa dissipazione (ad esempio particolari fibre monolitiche per sorreggere gli specchi), particolari lavorazioni sulla superficie degli specchi ed aumentandone la massa. Il rumore shot (frequenze alte) si riduce aumentando la potenza del laser, cosa che però aumenta il problema di pressione di radiazione sugli specchi.

Il sistema da vuoto nelle cavità serve per eliminare il rumore dovuto a diffusione della luce.

Il rivelatore è comunque dotato di tantissimi canali ausiliari che monitorano tutto quanto serve per poter poi con studi ed anticoincidenze individuare sorgenti di rumore ed eliminarle o almeno ridurle. Se poi passiamo alla fase di analisi del segnale, le tecniche di estrazione del segnale dal rumore riescono a fare il resto.

-

- **Cosa succede quando due onde gravitazionali si incontrano? Interferiscono allo stesso modo delle altre onde oppure ci sono altri effetti?**

Le onde gravitazionali non interferiscono fra loro. Ma i loro effetti si sommano. Dunque, si avrebbe un'onda che contiene in sé due segnature o più. Questo è quello che vi ho fatto vedere in una delle ultime slides quando vi ho detto che esiste un rumore astrofisico di onde gravitazionali: la somma di tanti piccoli effetti che singolarmente non riusciamo a misurare porta ad un contributo che potrebbe essere rivelato nel suo insieme.

Correlazioni fra diversi rivelatori sono a questo punto assolutamente necessari, per distinguere quello che potrebbe essere prodotto da rumori locali da un più interessante effetto astrofisico.

-

-

-

- **Può spiegare meglio come è possibile che un oggetto entri in risonanza con questo tipo di onde?**

I rivelatori di vecchia generazione erano grossi cilindri di Al (opportunamente raffreddato), caratterizzati da un comportamento molto diverso da quello degli attuali rivelatori. Il passaggio dell'onda rilascia energia nel cilindro che inizia ad oscillare. Lo immagini come fatto da 2 masse collegate da una molla: il sistema è un oscillatore armonico e l'onda va principalmente a rilasciare energia eccitandone il modo fondamentale. Sappiamo che l'energia rilasciata è bassissima e pertanto anche l'ampiezza dell'oscillazione. E sappiamo anche che questo tipo di sistema non sarebbe stato abbastanza sensibile da studiare evoluzioni tempo/frequenza di un segnale. Sono rivelatori che comunque hanno raggiunto buone sensibilità, misurando spostamenti dell'ordine di  $10^{-18}$  m, non sufficienti però a vedere segnali gravitazionali (anche data la regione di frequenze molto limitata).

-

- **Ho sentito che la velocità delle onde è pari a c; sbaglio o non era scontato, visto che lo spazio non ha massa?**

Sì, corretto. La soluzione delle equazioni di Einstein predice onde che viaggiano esattamente alla velocità della luce e pertanto, ipotizzando l'esistenza di un gravitone questo deve avere massa nulla. In realtà ci sono teorie alternative alla gravità che predicono velocità leggermente diverse. Al momento le nostre misure confermano, sempre entro certi limiti, le previsioni. Cercare deviazioni, anche piccole, da quanto previsto dal Einstein, è una sfida oggi importante, perché questo ci potrebbe portare alla comprensione di cose che ad oggi ancora ci sfuggono.

- **Nel settembre del 2015 quando fu effettuata la prima misura i due laboratori LIGO di Hanford Site e Livingston e VIRGO misurarono lo stesso valore di variazione?**

I due rivelatori LIGO misurano uno stesso segnale, con l'opportuna differenza temporale e inversione nel segno dell'ampiezza dovuta alla differente posizione ed orientamento sulla superficie della Terra. Sono a 3000 km di distanza l'uno dall'altro. Invece il rivelatore Virgo non aveva ancora ripreso la presa dati. Ha misurato, insieme

a LIGO, il primo segnale il 14 agosto 2017 e poi il 17 agosto 2017, con contributo fondamentale per individuare la posizione della sorgente.

- **Tramite le onde gravitazionali, è possibile risalire alle condizioni in cui l'universo si trovava subito dopo il Big Bang?**

Sì, la misura di fondo stocastico primordiale di onde gravitazionali porta dentro di sé informazioni sul Big-Bang. Al momento, sia per sensibilità che per regione di frequenze coperta, non è una misura che pensiamo di riuscire a fare, alla luce delle attuali conoscenze.

- **Ciao si sa quanto era grandi all'origine quelle misurate ?**

- Sì, questo è in qualche modo anche in una risposta precedente. L'ampiezza dell'onda diminuisce con la distanza. La stessa ampiezza però anche alla sorgente è molto molto diversa a seconda del tipo di fenomeno. Se prendiamo ad esempio sempre il famoso segnale GW150914 di ampiezza adimensionale (strain)  $10^{-21}$  a Terra e partito 1.3 miliardi di anni fa (ossia a distanza  $1.2 \cdot 10^{25}$  m da noi), la sua ampiezza adimensionale ad 1 m dalla sorgente era di circa 12000 ( $10^{-21} \cdot 1.2 \cdot 10^{25}/1$ )...un vero terremoto.

-

- **La deformazione dello spazio dipende quindi dalla distanza?**

- Sì, dalla distanza dalla sorgente, ma anche dal tipo di fenomeno. Se la sorgente fossi io l'ampiezza sarebbe niente...zero a tutti gli effetti... ☺

-

- **Qual è la lunghezza d'onda di queste onde?**

- La lunghezza d'onda copre parecchi ordini di grandezza e dipende dal tipo di fenomeno. Abbiamo emissione a circa ( $10^{-18}$  Hz –  $10^4$  Hz) per le onde gravitazionali, mentre circa  $10^4$  Hz –  $10^{20}$  Hz per quelle elettromagnetiche. Ricordo che lunghezza d'onda =  $c/\text{frequenza}$ .

I rivelatori terrestri ad oggi possono fare misure in un campo di frequenze che va da circa 10 Hz (lunghezza d'onda di circa  $3 \cdot 10^4$  km) a circa 2500 Hz (lunghezza d'onda di circa 120 km). Il limite nella misura alle basse frequenze viene dal rumore sismico. Il rivelatore spaziale LISA potrà misurare fenomeni di frequenze molto più basse, arrivando anche a  $10^{-4}$  Hz (ossia lunghezza d'onda di circa  $3 \cdot 10^9$  km). Ma altri tipi di rivelatori potranno coprire altre regioni di frequenze.

Le onde che sono state misurate hanno avuto come più alta frequenza di emissione  $\sim 1000$  Hz (per le stelle di neutroni) e  $\sim 300$ -500 Hz (per i buchi neri).

-

- **Che velocità si propagano le onde gravitazionali?**

Risposta data in una domanda precedente.

-

- **Non centra molto, ma due buchi neri che si uniscono possono bucare lo spazio tempo ?**

Io qui le posso dire che stiamo cercando di acquisire sempre più informazioni sulla popolazione e sulle caratteristiche dei buchi neri. Al momento abbiamo visto che 2 buchi neri che si scontrano ne producono un terzo, di massa pari alla somma delle masse di partenza, ridotta della energia persa per emissione di onde gravitazionali. L'esistenza di canali spazio-temporali, quali ad esempio worm-holes, fa ad oggi parte di teorie affascinanti che andranno confermate.

- **Avevo letto che le onde gravitazionali hanno la stessa velocità della luce, ma in generale questa è costante? (Più nel dettaglio avevo letto che in generale non lo è perché non sempre  $g_{00}=1$ : è vero?)**

La teoria di Einstein prevede che viaggino alla velocità della luce. Ma in effetti ci sono teorie alternative che hanno previsioni diverse (non drammaticamente diverse ma diverse). La metrica che descrive lo spazio-tempo viene perturbata dalla presenza di materia e questo porta a fenomeni quali la deflessione della luce, ma la velocità delle onde gravitazionali non cambia.

- **Ma gli effetti gravitazionali di un evento arrivano a noi con la stessa velocità della luce? se il sole scomparisse ce ne accorgeremmo a livello luminoso dopo 8 minuti, ma gli effetti gravitazionali?**

- Sì, la teoria di Einstein prevede questo e nei limiti delle misure fatte ad oggi lo abbiamo confermato. Dunque sì, ce ne accorgeremmo 8 minuti dopo, ossia solo allora gli effetti gravitazionali del Sole sulla Terra sparirebbero.

- **Quindi se l'ampiezza delle onde è maggiore all'origine la deformazione è maggiore di  $10^{-11}$  vicino ai buchi neri?**

Molto maggiore, risponda in una domanda precedente (immagino intenda di  $10^{-21}$ )

- **Può dirci in che modo è stata effettuata la prima foto a un buco nero nell'aprile scorso?**

L'immagine è stata il frutto del lavoro di una collaborazione chiamata EHT (Event Horizon Telescope), che ha messo insieme immagini ottenute da una rete di radiotelescopi. Il lavoro è infatti stato possibile mettendo insieme le informazioni di otto radiotelescopi dislocati su tutta la Terra, il che ha portato ad una risoluzione comparabile a quella che si avrebbe avuta con gigantesco telescopio. Il buco nero, al centro di una Galassia piuttosto luminosa, crea curvatura della luce e l'ombra risultante mostra il profilo dello stesso buco nero.

- **Due stelle di neutroni creano un buco nero se non ricordo male**

No, è possibile ma non scontato. Lo scontro e fusione di due stelle di neutroni potrebbe produrre un buco nero ma anche una stella di neutroni. Si potrebbe anche creare dapprima un oggetto instabile, una stella di neutroni ad esempio di massa troppo grande per restare in equilibrio, che poi decade in un oggetto stabile. Il tutto dipende dalle masse di partenza e da quanta energia viene rilasciata complessivamente nel processo.

- **Le onde gravitazionali risentono dell'effetto doppler dovuto al movimento della terra?**

- Il moto relativo della sorgente e della Terra porta al fatto che la frequenza dell'onda osservata a Terra sia diversa da quella alla sorgente. Questo ad esempio per segnali persistenti, un tipo di segnale che viene emesso da pulsar e che continuamente arriva a Terra (ossia non ha durata limitata come i segnali osservati fino ad oggi, che al più hanno durate di ~minuto), porta ad avere un effetto Doppler visibile sia con modulazione giornaliera che annuale. La modulazione Doppler porta informazioni importanti sulla provenienza del segnale.

- **Per quale motivo non sono prodotte onde gravitazionali nel caso di un sistema perfettamente simmetrico?**

Come nel caso elettromagnetico, la soluzione dell'equazione delle onde può essere espansa in multipoli. Le leggi di conservazione della massa e della quantità di moto

portano ad avere nulli i primi termini, quelli di monopolio e di dipolo. Il primo termine non nullo è proprio quello di quadrupolo di massa (che indica la distribuzione delle masse). L'emissione di radiazione la si ha solamente in presenza di variazioni del momento di quadrupolo di massa. Il che vuol dire che si devono osservare deviazioni da una simmetria perfettamente asimmetria sferica. Ragionando intuitivamente si può pensare di far girare sulla superficie dell'acqua una palla da calcio ed una da rugby, la differenza dovrebbe essere abbastanza evidente.

- - **Sarà possibile, in futuro, inviare messaggi interstellari tramite l'uso di onde gravitazionali?**
  - Per inviare messaggi bisognerebbe riuscire a generarle, cosa che sembra attualmente impossibile. In realtà, quelli che noi stiamo ricevendo sono dei veri e propri messaggi..inviati da corpi celesti, ma sempre messaggi sono. E molto precisi e dettagliati, contengono esattamente l'informazione del fenomeno che le ha generate. Questo è l'aspetto fantastico delle onde gravitazionali.
  - 
  - **Gentilissima Dott.ssa Astone spieghi agli studenti la metodologia di iniezione di segnali falsi da parte di una squadra di fisici, per individuare i falsi positivi.**
  - Si tratta di una procedura molto importante che viene fatta sicuramente in tutte le fasi iniziali di un esperimento, quando si devono calibrare gli strumenti e le procedure, ma anche in seguito, al fine di controllare continuamente il livello di conoscenza e calibrazione dell'apparato e delle procedure di analisi. Si iniettano segnali che riproducono il comportamento dei segnali da rivelare, divisi per classi. Questo può essere fatto in hardware, con strumentazione che porta gli specchi a spostarsi come se lo spazio-tempo fosse stato deformato dal passaggio di un'onda gravitazionale, ma anche in software, una volta che i dati sono stati registrati è sempre possibile aggiungere segnali "fake" il cui studio porta informazioni dettagliate sulle procedure di analisi, sui falsi positivi ma anche sulla possibilità di perdere segnali. Sapendo le caratteristiche dei segnali iniettati e confrontandole con i risultati delle analisi si possono trovare eventuali limitazioni, scoprire punti deboli della catena al fine di migliorare e anche di saper poi valutare correttamente, nelle analisi reali, l'errore associato a ciascuna analisi o stima. Nella nostra collaborazione questo è stato fatto moltissimo in passato, a volte anche senza dare la certezza agli analisti dati sulla presenza o meno di segnali iniettati, al fine di verificare fino in fondo tutti gli aspetti della catena di analisi. Se chiedete cosa fu il "Big Dog" a membri non giovanissimi della collaborazione resterete sorpresi. Anche nelle analisi reali, vengono comunque fatte, in parallelo, delle procedure di iniezione in software, di segnali fake, al fine di determinare correttamente le sensibilità ed infine (in caso di assenza di segnali rivelati) limiti superiori delle analisi.
  - 
  - **Qualcuno ha idea di come si chiami l'app per quel catalogo "listening to the cosmos"?**
  - La app si chiama Chirp LaserLab:
  - <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.laserlabs.chirp&hl=it>  
<https://www.laserlabs.org/chirp.php>
- Oppure guardate il sito indicato prima, GracedB.
- **Può capitare che ci giungano onde gravitazionali dall'esterno dell'universo osservabile?**

- Al momento, nonostante i nostri rivelatori siano diventati davvero molto sensibili, non riusciamo ad avere osservazioni da zone davvero remote, siamo arrivati al più a distanze da noi di ~1.5 miliardi di anni e data una età dell'Universo di circa 13.5 miliardi di anni vuol dire che stiamo osservando il nostro vicinato..
- In futuro si spera di spostarsi sempre più lontano e magari arrivare a misurare le onde gravitazionali primordiali, residuo del Big-Bang. O anche segnali da strutture quali stringhe cosmiche, che appunto portano con sé l'impronta dell'Universo primordiale.

- **Esiste davvero il Mass Gap?**

Si, un problema aperto che si sta piano piano di capire con nuove misure. Accumulare informazioni da altri eventi, sia pure sempre dello stesso tipo, aiuterà a capire sempre meglio la distribuzione delle masse sia dei buchi neri stellari (quelli appunto che noi possiamo ad oggi vedere) che delle stelle di neutroni. Consideri che la prima rivelazione, GW150914, ci ha per la prima volta mostrato l'esistenza di buchi neri nel range di masse osservato. È stata una sorpresa, confermata poi dai tanti altri segnali osservati da allora ad oggi. Informazioni anche sul rate e sui possibili canali di formazione di questi oggetti aiuteranno a capire se davvero esiste una "mass gap" o se non sia un nostro effetto di selezione (in sintesi: vediamo solo quello che riusciamo a vedere).

- **I fenomeni che avete osservato risalgono a milioni di anni fa, c'è la possibilità che adesso le onde gravitazionali siano mutate?**

Mutare nel tempo no, ossia le caratteristiche non cambiano spontaneamente. Quello che può modificare la forma dell'onda che riceviamo potrebbe essere l'incontro di ad esempio un grosso buco nero o di altri oggetti massivi che possano produrre effetti di lensing gravitazionale. Ma non cambia la natura delle onde.

Le onde gravitazionali non sono qualcosa che viaggia in un mezzo, sono deformazioni dello spazio- tempo stesso che si propagano, pertanto per cambiare natura dovrebbe essere lo spazio tempo a cambiare natura.