

Sulla recente rilevazione di onde gravitazionali

- di Alessandro Mariani¹

Nel 2016 i due rilevatori americani LIGO hanno annunciato la prima osservazione di onde gravitazionali nella storia, dovuta alla collisione tra due buchi neri. Nel 2017 LIGO, insieme al rilevatore italiano Virgo, ha rilevato la prima fusione tra due stelle a neutroni captando le onde gravitazionali prodotte dall'evento. Queste scoperte sono tra le più importanti nella fisica sperimentale degli ultimi decenni e rappresentano un notevole successo ingegneristico. Per capire cosa succede durante il passaggio di un'onda gravitazionale, consideriamo una serie di piccoli oggetti disposti in cerchio (figura 1):



Figura 1. Un'onda gravitazionale attraversa un cerchio di particelle

L'onda viaggia nella direzione che "esce dal foglio", cioè dal foglio verso gli occhi del lettore. Quando sono attraversati da un'onda gravitazionale, per effetto dell'onda alcuni oggetti sentono un'attrazione gravitazionale e si avvicinano, altri si allontanano: il cerchio si deforma prima in un'ellisse lungo il senso verticale e poi torna alla forma iniziale. Mentre l'onda passa, il cerchio si allunga di nuovo a formare un'ellisse, stavolta nel senso orizzontale, e infine gli oggetti si dispongono di nuovo a formare il cerchio iniziale. (figura 1) Tutto ciò è dovuto all'attrazione e alla repulsione gravitazionale reciproca degli oggetti, causata dal passaggio dell'onda. I rilevatori LIGO e Virgo misurano ognuno questa deformazione, che pure è minuscola: se il diametro del cerchio fosse la distanza tra la Terra e Proxima Centauri (la stella più vicina, a 4,3 anni luce), allora la deformazione sarebbe circa pari alla larghezza di un capello!

Le onde gravitazionali sono previste dalla teoria della Relatività Generale di Einstein. Secondo questa teoria ogni corpo deforma lo spazio circostante, causando così una curvatura nel moto dei corpi vicini che noi chiamiamo forza di gravità. Possiamo immaginarlo come un tappeto elastico: mettendoci una sfera grande che deforma il tappeto (ad esempio il Sole) allora il moto di sferette più piccole (i pianeti) attorno ad essa viene deviato. Ogni massa emette onde gravitazionali: tanto l'autore di questa pagina quanto il lettore emettono onde gravitazionali, sebbene in questi casi siano troppo piccole per essere osservate. Secondo la teoria di Einstein

¹ Ex-alunno del Liceo "Galileo Galilei" diplomato nel 2014, laureato in Matematica.

le onde viaggiano alla velocità della luce e sono prodotte in gran quantità da sistemi asimmetrici. Il Sole è una sfera quasi perfetta e quindi produce relativamente poche onde gravitazionali. Per questo cerchiamo le onde prodotte da sistemi binari: due stelle o due buchi neri che orbitano uno attorno all'altro.

Il primo evento osservato da LIGO nel 2016 rilevò una collisione tra due buchi neri, ognuno con una massa di circa trenta volte la massa del Sole. Quando due buchi neri si trovano in orbita l'uno attorno all'altro emettono onde gravitazionali, che si portano via pian piano un po' di energia. Avendo meno energia i buchi neri si avvicinano, e avvicinandosi interagiscono con più forza. In questo modo emettono ancora più onde gravitazionali, avvicinandosi ancora di più, fino a che la loro distanza diventa tanto piccola che i due si scontrano e quindi si fondono. La stessa cosa avviene con le stelle di neutroni, la cui fusione è stata osservata da LIGO e Virgo nell'altro evento, del 2017.

Un'altra previsione della teoria di Einstein riguarda la frequenza delle onde gravitazionali. La legge che la regola è la seguente: la frequenza di un'onda gravitazionale è uguale alla frequenza del processo che l'ha prodotta. Nel caso precedente i buchi neri si orbitano a vicenda con un certo periodo, e quindi con una certa frequenza. Man mano che emettono onde gravitazionali la distanza tra i due diminuisce, e come sappiamo sin dai tempi di Keplero ad una distanza minore corrisponde una maggiore frequenza dell'orbita: i buchi neri orbitano più velocemente. Pertanto più i buchi neri si avvicinano più la frequenza delle onde emesse è alta. Tutto ciò si vede nel segnale ottenuto, mostrato nella figura 2. La frequenza emessa dall'onda va da circa 30 a 250 Hz, che è un intervallo udibile. Le onde gravitazionali sfruttano un meccanismo diverso da quelle sonore e quindi non possiamo sentirle. Però usando un computer possiamo produrre il suono che farebbero se fossero onde sonore: lo trovate ad esempio su YouTube. Pare che assomigli al richiamo di un uccello australiano.

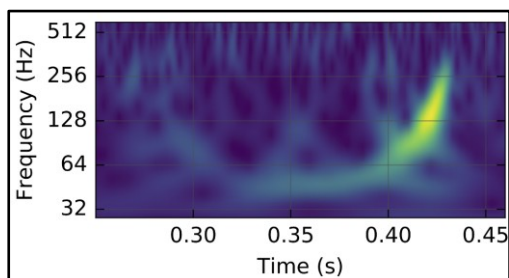


Figura 2. La frequenza delle onde gravitazionali emesse aumenta man mano che i buchi neri si avvicinano

Ma come funzionano i rilevatori? È un grandissimo successo dell'ingegneria: bisogna individuare un segnale minuscolo isolandolo da tutti gli

altri tipi di onde, in particolare da quelle sismiche. Ognuno dei rilevatori è un cosiddetto *interferometro* (figura 3). Guardiamo la parte A, dove è rappresentato l'interferometro nel caso in cui non passa nessuna onda.

L'interferometro è composto da due bracci perpendicolari con due specchi in fondo; un laser (la scatolina) e una lente (la linea obliqua). La lente lascia passare metà del raggio laser verso l'alto, e ne riflette metà verso sinistra. I due raggi così separati raggiungono ognuno uno specchio, e sono riflessi indietro. La stessa lente li ricongiunge e li fa arrivare insieme su un punto (il pallino). Senza onda gravitazionale i due bracci hanno lunghezza identica: all'arrivo i due raggi laser sono in fase, quindi si rafforzano a vicenda e il pallino s'illumina.

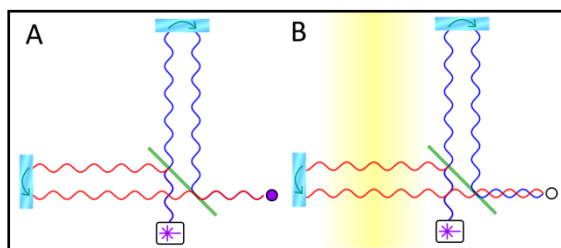


Figura 3. Interferometro senza (A) e con (B) onda gravitazionale

Se invece passa un'onda gravitazionale (parte B) un braccio si allunga e l'altro si accorcia, come abbiamo visto in figura 1. Quando i

due raggi laser si ricongiungono non sono più in fase, perché hanno percorso lunghezze diverse. Non essendo più in fase, si indeboliscono a vicenda e la luce sul pallino si affievolisce: in base a quanta luce arriva sul sensore possiamo ricostruire l'onda gravitazionale (figura 4).

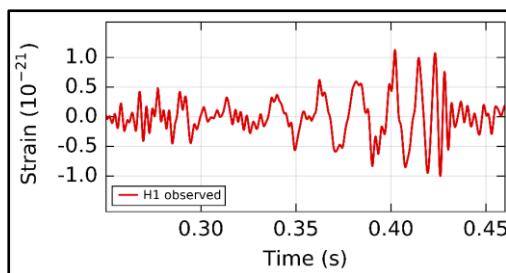


Figura 4. Profilo di un'onda gravitazionale emessa da buchi neri binari

Per evitare l'influenza dell'aria i laser viaggiano in una camera a vuoto (quella di Virgo, a Pisa, è la più grande d'Europa). Per riuscire a misurare la piccola deformazione dovuta alle onde

gravitazionali, i due bracci sono molto lunghi: 4 chilometri ognuno. Nonostante questo, la deformazione è dieci milioni di volte più piccola di un atomo. Controllando accuratamente gli errori, è possibile misurare anche una variazione così piccola.

Perché ci interessano le onde gravitazionali? Il primo motivo è che confermano la teoria della Relatività Generale di Einstein. Se non le avessimo osservate, una delle predizioni della teoria sarebbe stata scorretta e avremmo dovuto cercare una teoria migliore. Il secondo motivo è quello di maggior interesse futuro, cioè che le onde gravitazionali ci permettono di calcolare le distanze astronomiche, un problema estremamente difficile. Come facciamo a sapere quant'è lontana una stella? Per alcune stelle, le più vicine, possiamo esaminare come varia la loro posizione nel cielo col movimento della Terra attorno al Sole, e da qui

dedurre la distanza. Questo metodo è noto come “parallasse”, ma funziona solo con le stelle abbastanza vicine: quelle troppo lontane variano troppo poco durante l’anno per poterne misurare la distanza con precisione.

Per le stelle lontane utilizziamo le cosiddette “candele standard”. La luminosità di una stella diminuisce man mano che ci si allontana, e sappiamo anche come cambia esattamente: con l’inverso del quadrato della distanza tra la stella e chi la osserva. La luminosità originale emessa dalla stella è detta “luminosità intrinseca”. In linea di massima non possiamo conoscere la luminosità intrinseca: una stella fioca potrebbe essere molto luminosa ma molto lontana, e viceversa una stella molto brillante potrebbe sembrarlo solo perché è abbastanza vicina. Studiando le stelle vicine, di cui conosciamo la distanza con la parallasse e quindi la luminosità intrinseca, abbiamo scoperto delle stelle speciali di cui possiamo dedurre la luminosità intrinseca semplicemente guardandole (ad esempio le Cefeidi, la cui pulsazione è sufficiente per determinarne la luminosità). Queste stelle le abbiamo chiamate “candele standard”. Oggi se volessimo conoscere la distanza di un oggetto astronomico cerchiamo una candela standard vicina all’oggetto e osservandola ne ricaviamo la luminosità intrinseca e quindi la distanza.

Le onde gravitazionali forniscono un modo diretto per misurare la distanza astronomica dell’oggetto che le ha prodotte. Abbiamo già costruito tre osservatori (due LIGO nel Nord e nel Sud degli Stati Uniti, più Virgo in Italia). Quando passa un’onda gravitazionale, come quella in figura 4, la forma dell’onda sarà circa la stessa in tutti e tre i rilevatori. Poiché i rilevatori sono in posti diversi l’onda sarà ricevuta in momenti diversi. Misurando i ritardi nella rilevazione dell’onda possiamo triangolare la posizione della sorgente, e quindi sapere dov’è nel cielo e quanto è distante. Se la sorgente riusciamo anche a vederla (i buchi neri sono neri, mentre le stelle a neutroni emettono luce) allora riusciamo ad ottenere un valore molto preciso della distanza. Abbiamo detto che la frequenza delle onde gravitazionali è nell’intervallo udibile: pertanto le binarie che emettono onde gravitazionali le chiamiamo in analogia “sirene standard”.

Ai meno astronomi forse interesserà di più una curiosità: dalla collisione delle stelle di neutroni si stima sia stato prodotto oro in una quantità maggiore della massa del Sole! Più seriamente, raccogliendo un gran numero di eventi di onde gravitazionali saremo in grado di misurare con maggior precisione le distanze astronomiche, e forse alla fine riusciremo a risolvere un mistero che tuttora non capiamo: perché l’espansione dell’universo sta accelerando.

Alessandro Mariani