

Alla ricerca delle onde gravitazionali

Che cosa sono le onde gravitazionali?

Immaginiamo di osservare una stella che ruota attorno a un buco nero supermassiccio (con massa milioni di volte quella del Sole). Essa non resterà in orbita per sempre; infatti, anche escludendo gli effetti dell'attrito dovuti all'interazione con il gas, il suo moto orbitale rallenterà fino a cadere, seguendo un'orbita a spirale, dentro il buco nero. La causa è l'emissione di onde gravitazionali che fanno perdere energia alla stella. Ovviamente la domanda sorge spontanea: che cosa sono le onde gravitazionali?

Nella Teoria della Relatività Generale, Einstein ha previsto, oltre al concetto di spazio-tempo e la sua deformazione come misura della forza di gravità, anche l'esistenza di onde gravitazionali. Immaginare che cosa siano non è semplice. La definizione rigorosa le descrive come 'perturbazioni del campo gravitazionale che si propagano alla velocità della luce'.

Secondo Einstein la forma dello spazio-tempo dipende dalla distribuzione della massa in esso presente: la materia deforma il tessuto dello spazio-tempo come se questo fosse un telo invisibile su cui si poggia una pallina.

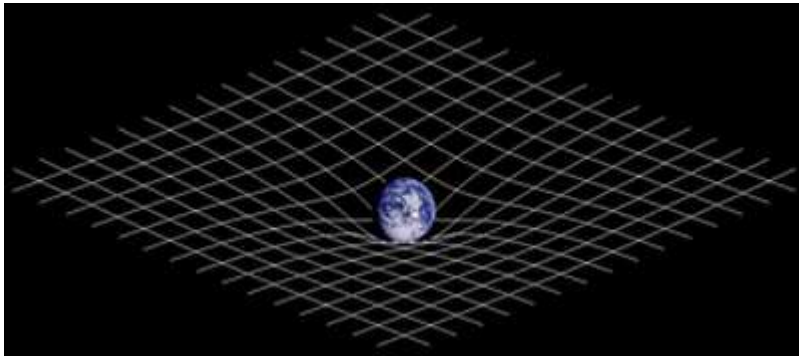


Figura 1 Rappresentazione della deformazione dello spazio-tempo dovuta alla presenza della massa della Terra.
Fonte: wikipedia

Se la distribuzione della materia viene modificata, ad esempio durante lo scontro tra due buchi neri, la forma dello spazio-tempo di conseguenza si modifica. Questa variazione non si riflette istantaneamente in tutto l'Universo ma si propaga dal luogo in cui si origina, alla velocità della luce. Un po' quello che accade quando buttiamo un sasso in uno stagno, le onde si generano dal punto in cui il sasso incontra l'acqua e progressivamente si propagano verso l'esterno.

Questa perturbazione, che viaggia alla velocità della luce, prende il nome di onda gravitazionale. Facciamo un esempio pratico per comprendere come generare delle onde gravitazionali *fai da te*. Supponiamo di prendere due sfere pesanti, di collegarle con un tubo e di metterle in rotazione intorno a un asse perpendicolare al tubo stesso. Consideriamo di eliminare completamente gli effetti dell'attrito: secondo la Teoria delle Relatività, l'energia rotazionale diminuirà e la quantità sottratta verrà emessa sotto forma di onde gravitazionali.

Fino a qui sembra facile, peccato però che le onde gravitazionali siano estremamente deboli e che gli eventi in grado di generarle siano molto rari. Si stima, infatti, che avvengano una volta ogni 10.000 anni per galassia, anche se studi recenti sostengono che tali eventi siano molto più frequenti e che forse saremo in grado di osservare le prime onde gravitazionali verso il 2016.

Inoltre, le onde gravitazionali interagiscono pochissimo con la materia, quindi viaggiano indisturbate nello spazio senza essere assorbite dalle stelle o dalla materia interstellare. Per dare un'idea, se un'onda gravitazionale attraversasse il Sole, perderebbe soltanto un decimilionesimo di miliardo della sua energia. La rivelazione di tali onde crea, quindi, problemi fisici e tecnologici enormi. Di fatto, dopo oltre 40 anni di ricerca, abbiamo solo una prova indiretta della loro esistenza.

Il caso della pulsar binaria

Un'evidenza indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali si ha osservando un sistema che perde energia a causa dell'emissione di onde gravitazionali. È ciò che è accaduto nel 1974, quando gli astrofisici Russel Hulse e Joseph Taylor

scoprirono la pulsar binaria PSR B1913+16. Per i loro studi i due astrofisici furono insigniti del premio Nobel per la fisica nel 1993.

Una pulsar è una stella di neutroni rotante che emette impulsi, soprattutto nelle bande radio e X, con frequenza regolare. Molto spesso viene paragonata a un faro perché l'emissione avviene solo in due direzioni. Pulsar binaria vuol dire che si trova in un sistema binario costituito da due oggetti, la pulsar stessa e una compagna, un'altra pulsar, ruotanti intorno al loro comune centro di massa.

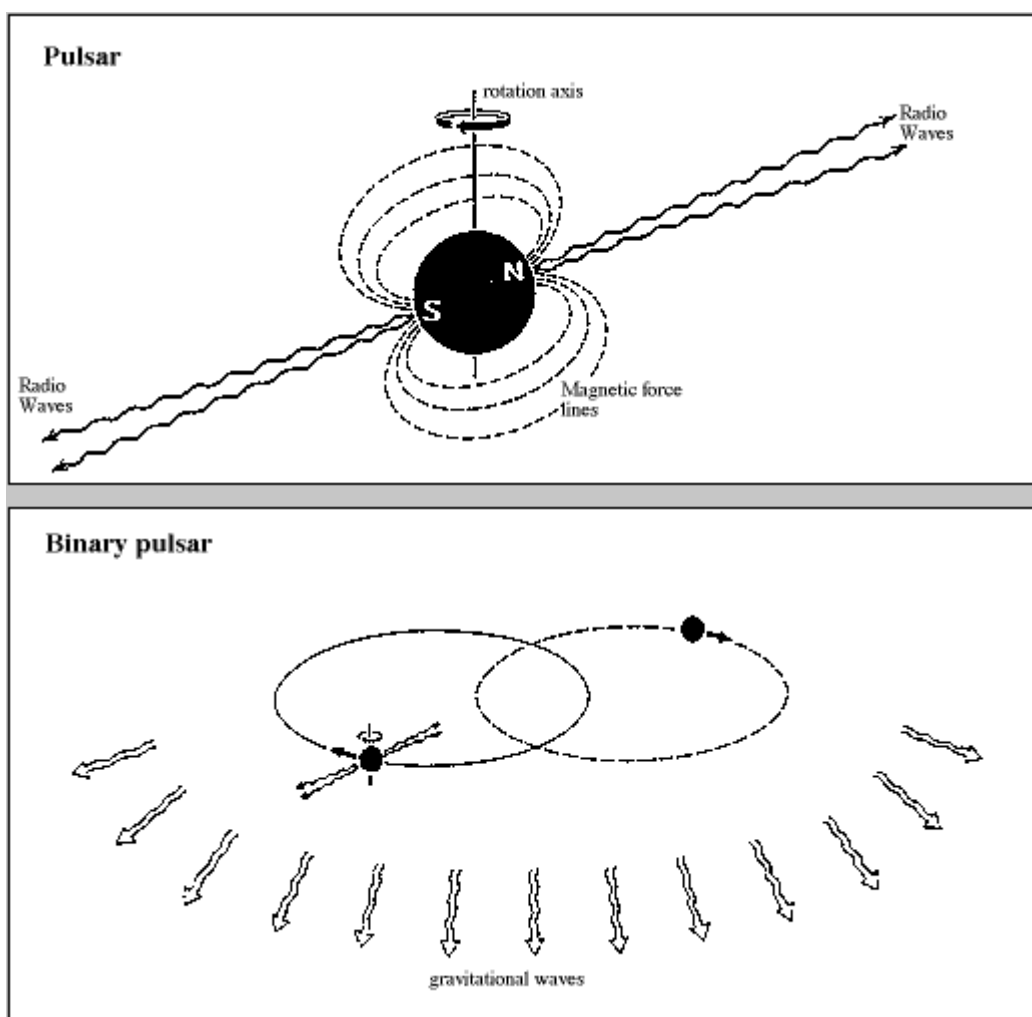


Figura 2 Le onde radio di una pulsar sono emesse in due fasci distinti che spazzano lo spazio proprio come un faro cosmico (figura in alto).

In una pulsar binaria vengono emesse inoltre onde gravitazionali (figura in basso).

Crediti: Nobel Media AB 2013

Il tempo impiegato dalla pulsar PSR B1913+16 a completare un giro (definito periodo orbitale) venne calcolato intorno a otto ore. Successivamente si osservò una diminuzione di tale periodo, che veniva spiegata con una contrazione dell'orbita e quindi un aumento del moto orbitale. Le due pulsar, quindi, stanno percorrendo traiettorie a spirale che le porteranno a scontrarsi inesorabilmente l'una con l'altra. L'accorciamento dell'orbita implica una diminuzione costante di energia gravitazionale che è stata spiegata con l'emissione di onde gravitazionali. I dati raccolti da Russel Hulse e Joseph Taylor erano in estremo accordo con quanto previsto dalla Teoria della Relatività Generale.

Tuttavia, anche se tale scoperta rappresentava un successo enorme e un'ulteriore verifica della validità della Teoria della

Relatività, per dimostrare che le onde gravitazionali sono un fenomeno fisico reale, è necessario scovare una prova diretta della loro esistenza.

Metodi di rivelazione

I metodi di rivelazione delle onde gravitazionali oggi sfruttano sostanzialmente due tipi di strumentazione. In entrambi gli strumenti, le variazioni indotte dall'onda sono di gran lunga minori delle dimensioni di un atomo.

Antenna gravitazionale

Le antenne gravitazionali consistono in un cilindro pieno, lungo qualche metro e pesante alcune tonnellate, sospeso a un filo. La prima antenna gravitazionale venne progettata dal fisico americano Joseph Weber nel 1965. Il funzionamento è semplice ed elegante: quando un'onda gravitazionale incide sul cilindro perpendicolarmente rispetto all'asse del cilindro, esso si mette in oscillazione, come fosse un diapason. In Italia l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) ha realizzato due antenne gravitazionali, Nautilus ed Auriga, nei laboratori di Frascati e Legnaro .



Figura 3 L'antenna criogenica Auriga presso i laboratori INFN di Legnaro.
Crediti: INFN

Per ridurre il rumore di fondo dovuto all'agitazione termica e aumentare così la sensibilità dello strumento, le antenne vengono raffreddate fino a temperature di pochi gradi kelvin. Vengono poi utilizzati ammortizzatori e sospensioni di grande efficacia al fine di eliminare i disturbi dovuti al traffico, a eventi microsismici o anche al semplice calpestio.

Nautilus è tra gli oggetti più sensibili finora mai costruiti, in grado di misurare variazioni di lunghezza dell'antenna pari a 10^{-18} m, le dimensioni del nucleo di un atomo.

Interferometro

Il principio di funzionamento degli interferometri gravitazionali si basa sostanzialmente sul modello dell'interferometro di Michelson e Morley, sviluppato nel 1887 per dimostrare la non esistenza dell'etere. L'interferometro consiste di due bracci o percorsi, identici e perpendicolari posti sotto vuoto.

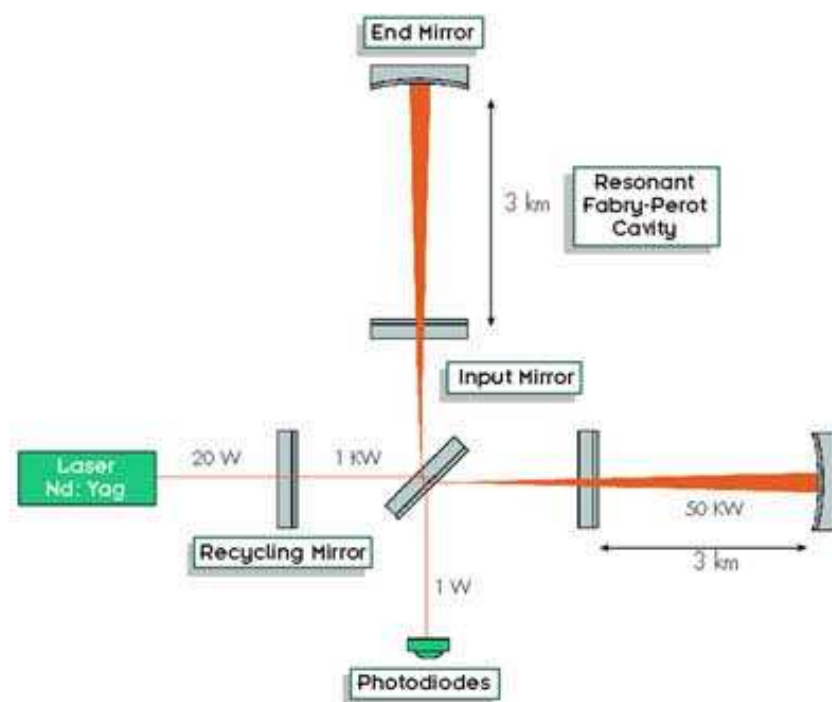


Figura 4 Schema ottico dell'interferometro VIRGO. Crediti: EGO/VIRGO

Un fascio laser, altamente stabilizzato, viene diviso lungo i due percorsi. All'estremità dei bracci si trovano due specchi che riflettono i fasci laser verso l'incrocio dei bracci dove si sovrappongono dando luogo a interferenza. Visto che i due percorsi sono identici e che i fasci si sono separati nello stesso momento, se ponessimo un rivelatore all'incrocio dei bracci osserveremmo semplicemente il puntino luminoso originale del laser. In realtà, i bracci vengono costruiti volutamente di lunghezze leggermente diverse in modo da creare delle frange di interferenza. Il sensore viene collocato in una frangia scura.



Figura 5 Figura di interferenza prodotta da un laser rosso con l'apparo sperimentale di Michelson-Morley. Le linee chiare sono le frange di interferenza costruttiva, mentre quelle scure sono quelle di interferenza distruttiva. Fonte: Wikipedia

Il motivo è molto semplice: misurare un cambiamento da buio a luce è molto più facile rispetto a valutare variazioni di luminosità.

Secondo la Teoria della Relatività, le onde gravitazionali possiedono una polarizzazione, ossia presentano una precisa

direzione di oscillazione durante il loro moto di propagazione. Quando un'onda investe l'interferometro, un braccio si contrae mentre l'altro si allunga. I due fasci luminosi di conseguenza percorrono tratti diversi da quelli originali. La figura di interferenza quindi cambierà e il sensore registrerà un segnale.

Se le onde gravitazionali non fossero polarizzate, i due bracci si deformerebbero nello stesso modo, di conseguenza il sensore continuerebbe a non rilevare alcun segnale.

In Italia esiste dal 2003 un interferometro in provincia di Pisa, a Cascina, il suo nome è VIRGO.



Figura 6 Vista aerea dell'osservatorio VIRGO oggi ribattezzato EGO.
Crediti: INFN

Lo strumento nasce grazie ai finanziamenti dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Nato come progetto italo-francese, oggi è stato ribattezzato EGO (*European Gravitational Observatory*) avendo acquisito una connotazione europea.

VIRGO è costituito da due bracci perpendicolari lunghi 3 km. Utilizzando opportuni strumenti si riescono a ottenere riflessioni ripetute dei fasci, così da aumentare il cammino ottico del fascio fino a 120 km. L'interferometro è isolato da ogni disturbo esterno, in modo da risultare sensibile solo alle onde gravitazionali. VIRGO è in grado di rilevare il segnale di sorgenti proveniente anche da galassie esterne fino a una distanza di 60 milioni di anni luce, che coincide con la distanza dell'ammasso della Vergine da cui trae il nome.

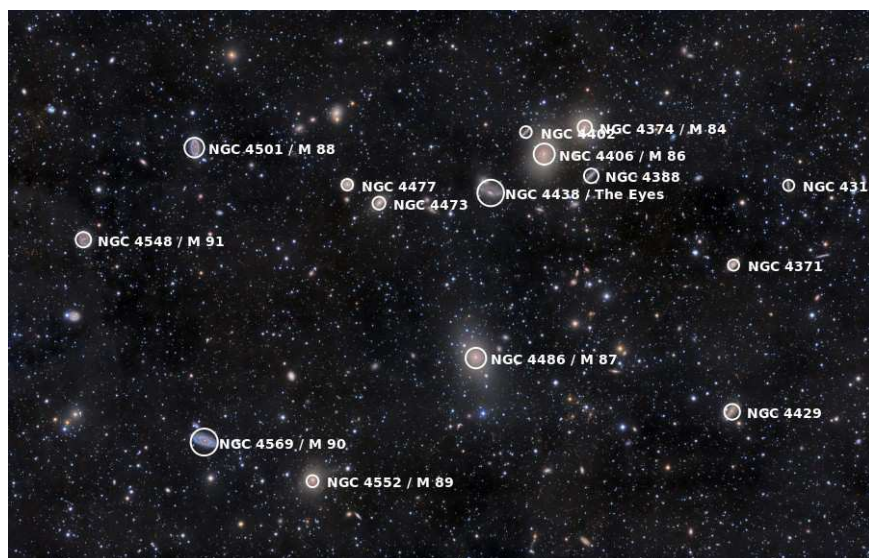


Figura 7 Immagine dell'ammasso della Vergine, costituito da oltre un migliaio di galassie.
Crediti: NASA, Rogelio Bernal Andreo

È in funzione 24 ore su 24 in modo da massimizzare la probabilità di catturare qualche segnale proveniente da ogni tipo di sorgente di onde gravitazionali (supernove, buchi neri supermassivi, pulsar, pulsar binarie...). È collegato con altri due interferometri nel mondo, così da costituire una rete in grado di ottenere conferme incrociate del rilevamento delle onde gravitazionali. I due interferometri appartengono alla collaborazione LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), un osservatorio americano costituito da LIGO-Hanford, situato a Richland, nello Stato di Washington e LIGO-Louisiana a Livingston, ma è già in fase di realizzazione una versione aggiornata denominata Advanced-LIGO. In futuro si aggiungeranno a questa rete anche LIGO-India e il giapponese Kagra (*Kamioka Gravitational wave detector*) o anche detto LCGT (*Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope*).

Purtroppo, anche se la rete di interferometri dovesse riuscire a scovare le onde gravitazionali, nulla ci potrà dire sul luogo in cui si sono originate. Questo perché con questi strumenti riusciamo a capire di essere stati investiti da un'onda ma non siamo in grado di vedere quale sorgente l'ha generata. Per ottenere questa informazione sarà necessario scandagliare il cielo con i telescopi con maggiore attenzione, operazione che richiederà una sinergia tra gli astronomi.

A cura di Simona Romaniello

Astrofisica e divulgatrice scientifica, per il Planetario di Torino si occupa di formazione e di sviluppo e allestimenti museali.