

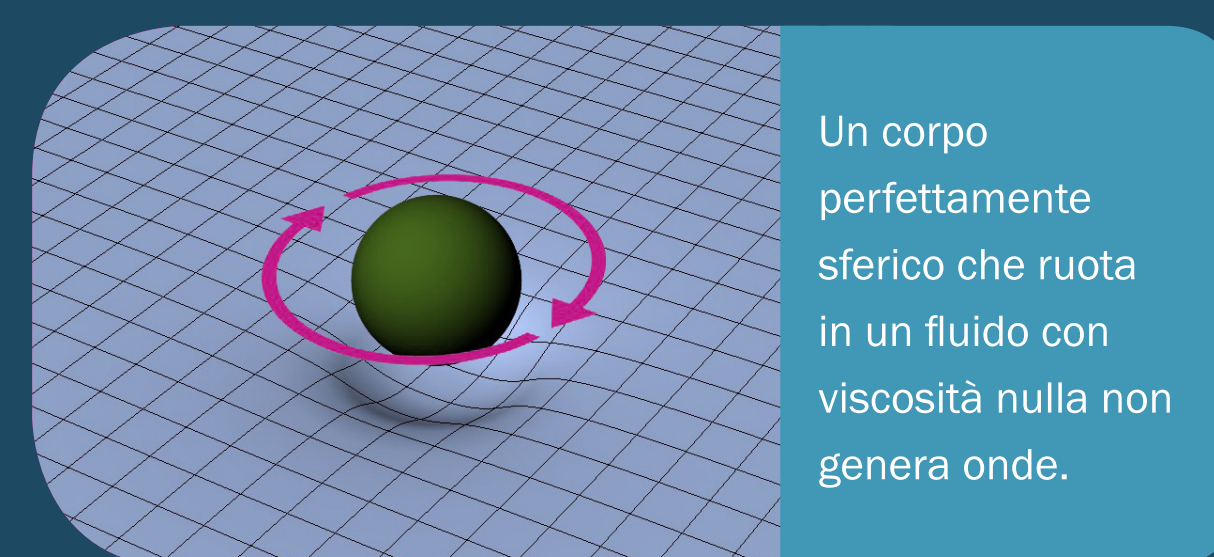
La scienza delle onde gravitazionali

Relatività generale e onde gravitazionali

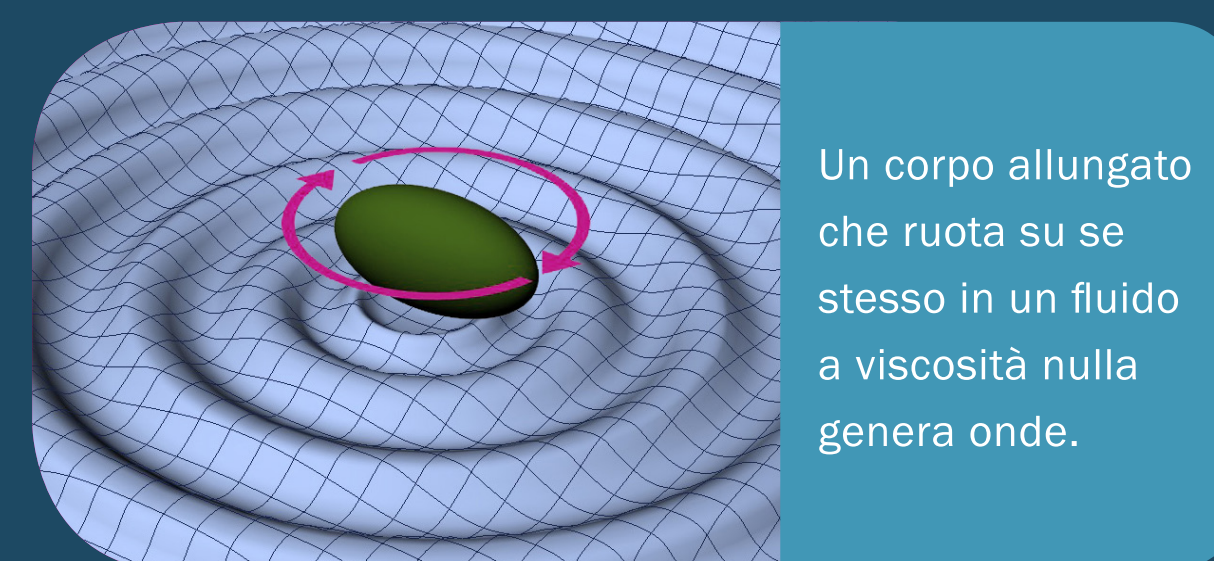
Nel 1915 Albert Einstein ridefinisce la teoria della gravità attraverso la teoria della relatività generale: spazio e tempo sono un'unica entità capace di interagire con i corpi, chiamata spaziotempo.

Corpi celesti estremamente densi e massivi sono in grado di curvare lo spaziotempo in maniera considerevole. Einstein capì che questa curvatura genera gli effetti che noi attribuiamo ad una forza gravitazionale.

Le onde gravitazionali sono le onde del "tessuto spaziotemporale", generate da corpi o eventi non dotati di perfetta simmetria sferica o deformati lungo un asse. Tutti noi generiamo onde gravitazionali, ma solo quelle originate da fenomeni astrofisici si propagano fino a noi con un'intensità sufficiente per essere rivelate dagli esperimenti.

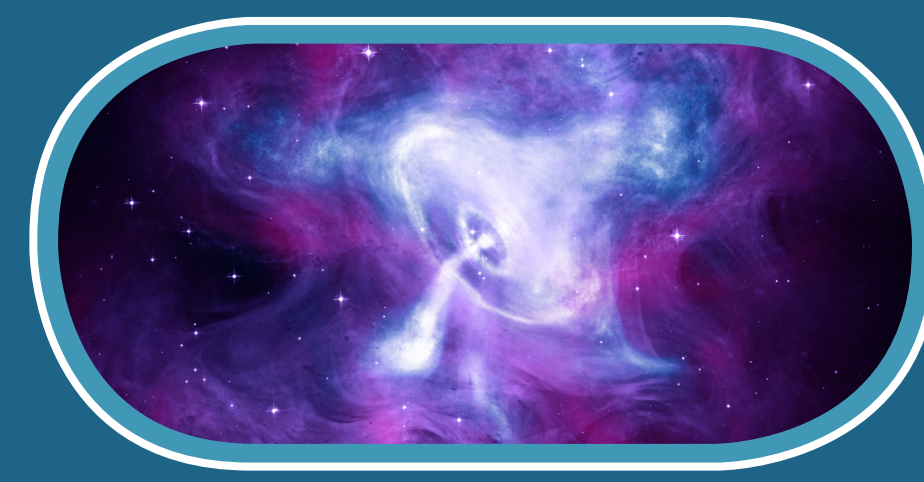


Un corpo perfettamente sferico che ruota in un fluido con viscosità nulla non genera onde.



Un corpo allungato che ruota su se stesso in un fluido a viscosità nulla genera onde.

Le sorgenti di onde gravitazionali



© NASA

Stelle di neutroni:

Le stelle di neutroni sono uno fra i possibili resti lasciati dalle esplosioni di supernovae e hanno masse di circa 1,4 volte la massa del Sole e raggio di approssimativamente 10 km. Una stella di neutroni è centomila miliardi di volte più densa dell'acqua e compie in media 10 rotazioni al secondo. Se la stella presenta asimmetrie, anche piccole montagne di pochi centimetri, può produrre onde gravitazionali di frequenza doppia rispetto a quella di rotazione. Alcune stelle di neutroni ruotando possono emettere raggi luminosi dai poli, che divengono visibili dalla Terra a intervalli regolari: in questo caso le chiamiamo "pulsar" e ci aspettiamo che emettano onde (elettromagnetiche e gravitazionali) su tempi lunghissimi, anche per milioni di anni.



© ESA

Supernovae:

Quando una stella con massa superiore a 8 masse solari ha raggiunto la fine del suo ciclo vitale ed esaurito il suo combustibile nucleare, inizia ad attraversare una complessa fase di instabilità che termina con un velocissimo collasso gravitazionale, che in poche frazioni di secondo libera molta della sua energia sotto forma di intensissimi fiotti di neutrini. In seguito al collasso, si generano delle onde d'urto, e gli strati esterni della stella sono espulsi verso lo spazio esterno a velocità altissime. È un fenomeno estremamente energetico, 5 miliardi di volte più luminoso del nostro Sole.

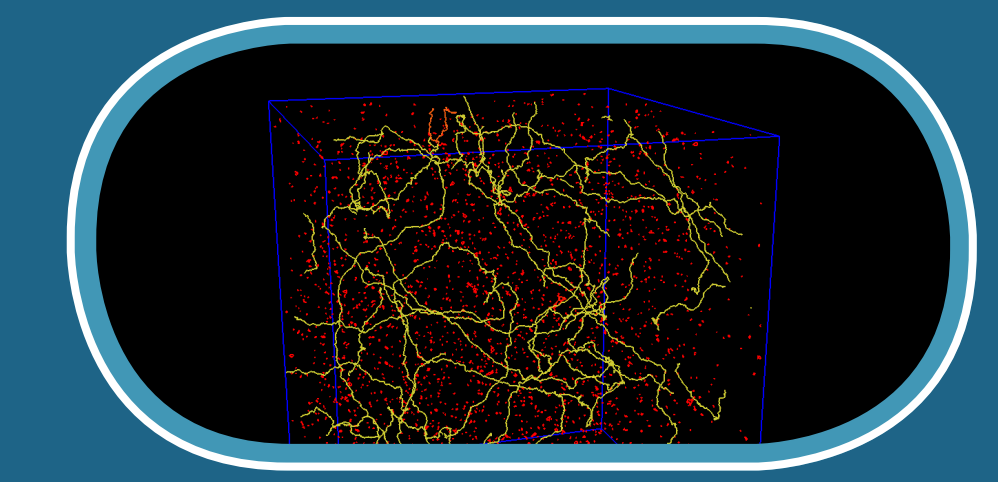
Se l'esplosione dovesse avvenire con una certa asimmetria rispetto ad una sfera perfetta, potrebbe generare onde gravitazionali.



© Event Horizon Telescope

Buchi neri:

I buchi neri sono corpi celesti estremi, con un campo gravitazionale così intenso che nemmeno la luce riesce a sfuggire. Per questo motivo questi corpi non emettono luce e risultano quindi "neri". Tra le varie tipologie di buchi neri vi sono quelli con massa simile a quella dei corpi celesti stellari, che sono prodotti al termine dell'evoluzione di astri di grande massa come stadio ulteriore a quello delle stelle di neutroni. Esistono poi buchi neri supermassicci, che si nascondono nel nucleo delle galassie e che hanno masse milioni o addirittura miliardi di volte superiori a quella del Sole. Le onde gravitazionali rivelate da LIGO e Virgo hanno permesso di scoprire anche l'esistenza di buchi neri pesanti alcune decine di volte il Sole, la cui esistenza era finora solamente teorizzata.

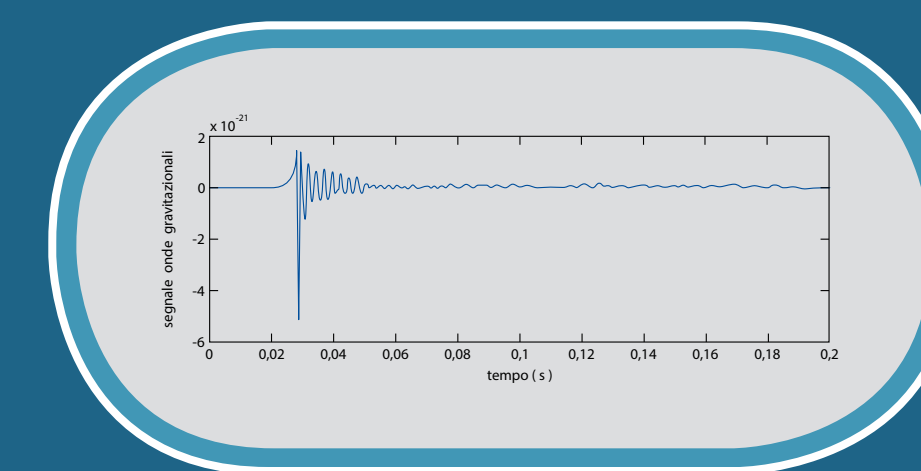


© Cambridge Cosmology, C.Martins & E. P. Shellar

Sorgenti esotiche:

Con l'astronomia gravitazionale si ha anche la possibilità di scoprire l'esistenza di sorgenti esotiche. Fra queste, stelle esotiche (come ad esempio da una zuppa di quark non raggruppati a tre, come nei neutroni o nei protoni), stringhe cosmiche (anelli o sottili filamenti che vibrano, dovuti a fratture nel tessuto spaziotemporale), e nuvole di bosoni ultraleggeri (assioni) intorno ai buchi neri (possibili candidati per la materia oscura).

Tipologia di segnali rivelabili



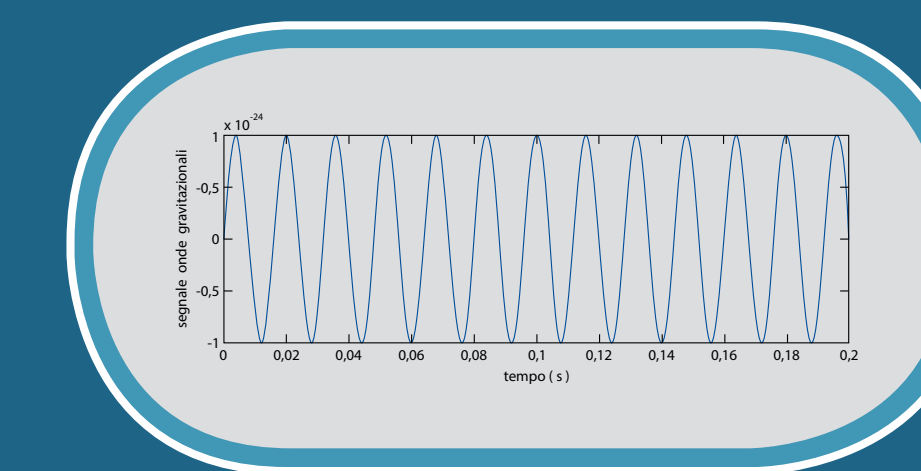
Transienti:

Segnali da sorgenti astrofisiche che causano un'onda gravitazionale misurabile con una durata dell'ordine dei secondi. Sono di due tipi:

- Coalescenza di buchi neri e/o stelle di neutroni: si tratta del momento conclusivo dello spiraleggiare di due corpi compatti e molto massivi e consiste nella fusione in un unico oggetto, che può essere una stella di neutroni o un buco nero. A seconda del tipo di corpo finale rimanente, sono possibili emissioni di sole onde gravitazionali o anche in contemporanea di onde elettromagnetiche.

È proprio tramite questo meccanismo che è stata rivelata la prima onda gravitazionale chiamata GW150914, generata dalla coalescenza di due buchi neri di 30 masse solari, e la prima generata dalla fusione di due stelle di neutroni, chiamata GW170817.

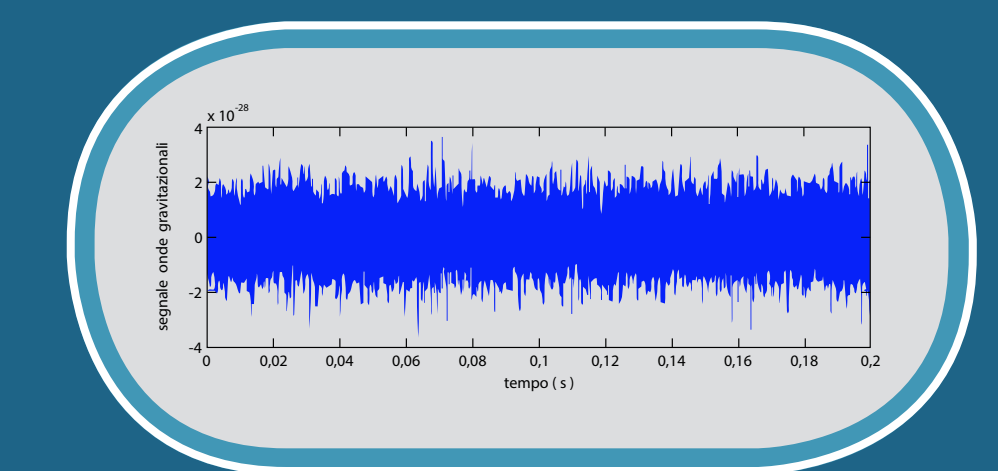
- Segnali generati dall'esplosione di una supernova, emessi nella fase terminale della vita di stelle massive. Ad oggi ne esistono diversi possibili modelli e la misura di onde gravitazionali sarà determinante per distinguerli e pertanto chiarire importanti aspetti del meccanismo di emissione.



Periodici:

Segnali da sorgenti astrofisiche che emettono onde gravitazionali in modo continuo nel tempo, come le stelle di neutroni isolate o in coppia con una stella anche di altro tipo. Una stella di neutroni isolata può emettere onde gravitazionali solo se dotata di una struttura asimmetrica rispetto ad una sfera perfetta. Questi segnali hanno tipicamente durate molto maggiori di una presa dati dei rivelatori e questo consente di ricavare preziose informazioni sulla natura e dinamica della sorgente.

Nel caso delle pulsar, il segnale elettromagnetico può indicarci con molta precisione a che frequenza cercare il segnale nei nostri dati.



Stocastici:

Fondo stocastico astrofisico: l'insieme dei segnali generati da innumerevoli sorgenti, di natura e posizione anche molto diverse fra loro, che emettono onde gravitazionali in un vastissimo spettro di intensità e frequenza. La sua forma è simile a quella di un grafico con un segnale molto confuso (come una cacofonia di segnali sovrapposti tra loro in modo casuale).

Fondo stocastico cosmologico: un fondo stocastico di onde gravitazionali, dovuto alla sovrapposizione di un gran numero di sorgenti indipendenti. È prodotto anche dai processi fisici che si sono verificati nei primissimi istanti di vita dell'universo. Questo fondo, analogo alla radiazione cosmica di fondo a microonde, permea ancora oggi l'Universo attuale.