

Onde Gravitazionali: LIGO ha Fatto Due Volte Centro!

Stefano Spagocci

GACB

(stefans@tin.it)



GW150914

- Il 14 settembre 2015, l'interferometro statunitense LIGO rivelava GW150914, il primo segnale di onde gravitazionali nella storia dell'umanità (fusione di due buchi neri).
- La notizia è stata divulgata dopo alcuni mesi, terminate le laboriose verifiche.
- La notizia ha scosso il mondo scientifico. Si ha l'impressione, però, che la portata della scoperta sia sfuggita al grande pubblico.





GW150914

- Come vedremo, le onde gravitazionali sono paragonabili a increspature dello spazio-tempo (visto come un telo elastico o come la superficie di uno specchio d'acqua).
- Per comprendere la portata della scoperta è quindi necessario richiamare per sommi capi la storia delle concezioni della gravità.



Aristotele

- Per Aristotele (IV sec a.C.) ogni corpo si dirige spontaneamente verso il suo luogo naturale.
- Gli astri, incorruttibili, compiono moti circolari (quindi seguendo la figura perfetta del cerchio). La gravità, quindi, non li riguarda.
- I gravi (corpi pesanti) cadono invece verso terra, perchè tale è il loro luogo naturale.



Newton

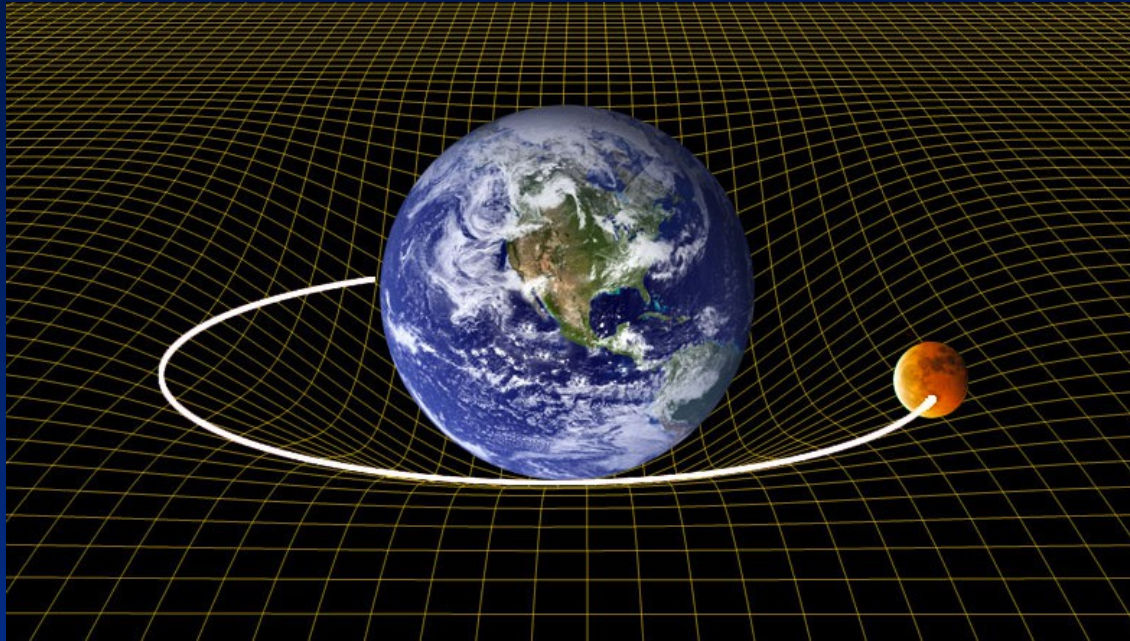
- Secondo Newton (Principia Mathematica, 1687), un corpo di massa M esercita, su di un altro corpo di massa m , una forza proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due corpi.
- In altre parole, se due corpi distano d , avrò tra di loro una certa forza. Se raddoppio la distanza tra i corpi, la forza diminuirà non di 2 ma di 4 volte (perchè 4 si ottiene elevando 2 al quadrato).



Newton vs Einstein

- Oggi sappiamo che la massa M (ad esempio il Sole) dà origine a un campo gravitazionale. La massa m (ad esempio la Terra) sente tale campo gravitazionale e, di conseguenza, la forza di cui sopra.
- Sorge però un problema. Se il Sole dovesse scomparire, secondo Newton la Terra dovrebbe accorgersene istantaneamente e partire per la tangente
- Secondo la relatività speciale di Einstein (1905), però, nessuna influenza può muoversi a velocità superiore a quella della luce e la Terra dovrebbe dunque accorgersene dopo 8 minuti!



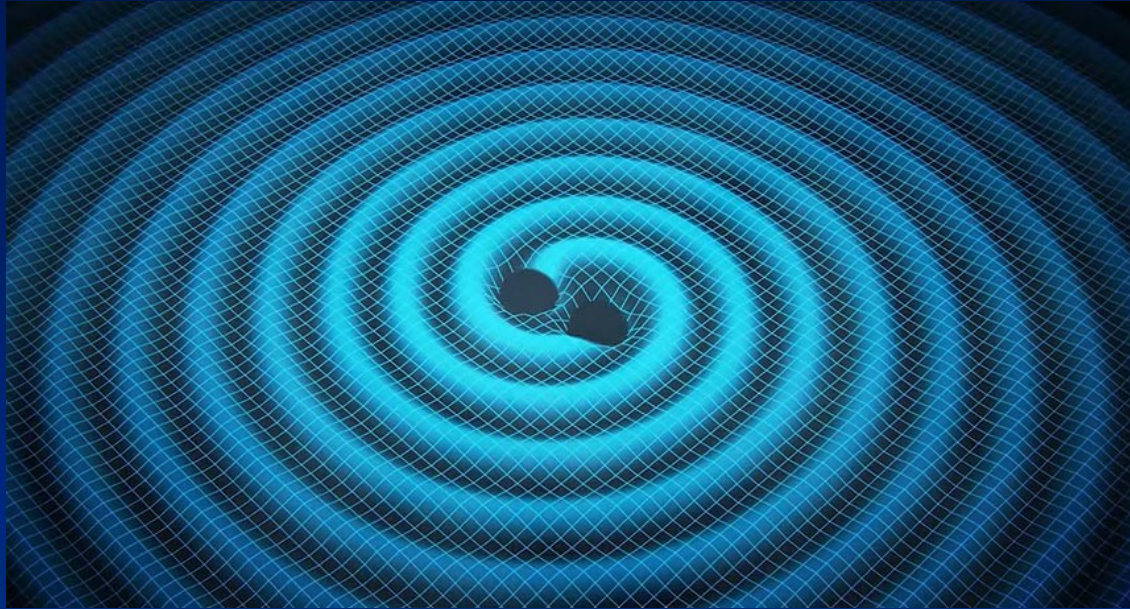


- Secondo la teoria della relatività generale (Einstein, 1916), lo spazio-tempo è paragonabile a un telo elastico.
- Il Sole, con la sua massa, deforma il telo. La Terra “cade” nella depressione e ciò genera la sua orbita.

Einstein

- Se quindi il Sole scomparisse repentinamente, dal Sole partirebbe un'onda gravitazionale che porterebbe il “telo elastico” a spianarsi.
- Dopo 8 minuti tale onda raggiungerebbe la Terra che, all'improvviso, si troverebbe non più in una depressione ma su di un “telo piatto” e partirebbe per la tangente.
- Abbiamo quindi implicitamente introdotto il concetto di “onda gravitazionale”.





- Le onde gravitazionali, previste da Einstein già nel 1916, sono appunto “increspature” dello spazio-tempo, originate da masse in movimento. Possiamo paragonarle a onde, originate da masse rotanti in uno specchio d'acqua.

Onde Gravitazionali

- La teoria mostra che tali onde hanno ampiezza molto ridotta. Le onde gravitazionali possono originarsi solo da rotazioni (o esplosioni) asimmetriche (radiazione di quadrupolo). Ciò, assieme alla piccolezza della costante gravitazionale G , contribuisce alla loro piccola ampiezza.
- Un corpo sferico come il Sole si comporta come se tutta la sua massa si trovasse al suo centro. Se il Sole oscillasse, rimanendo sferico, non ci sarebbe differenza riguardo alla sua attrazione gravitazionale. Le onde gravitazionali possono quindi originarsi solo in contesti non simmetrici.



Stelle Doppie

- Buona parte delle stelle, nella nostra galassia e fuori, hanno una o più compagne. Si parla di stelle doppie.
- Le due stelle orbitano attorno al centro di massa. Il loro moto può essere paragonato a quello di una barra rotante (quindi asimmetrica).
- Ciò genera onde gravitazionali, per quanto debolissime, tipicamente con periodi di oscillazione da alcuni minuti ad alcune ore (binarie compatte, le altre emettono segnali troppo deboli). La somma dei singoli segnali sarà rivelabile dagli interferometri spaziali come LISA.



Supernove

- Stelle di grande massa (circa 10 masse solari o più), terminato il combustibile nucleare, vedono il loro nucleo collassare e gli strati esterni essere espulsi in un'esplosione che può avere la potenza di tutte le stelle della galassia. Si ha allora una supernova.
- Il nucleo collassante si schiaccia fortemente per la forza centrifuga e può anche dividersi. Si ha una configurazione asimmetrica e si generano onde gravitazionali.
- Periodo di oscillazione delle onde: circa un millisecondo. Supernove galattiche (una ogni decine di anni!) rivelabili anche da rivelatori a barra. Supernove extragalattiche rivelabili solo da interferometri terrestri quali VIRGO e LIGO (il rumore di fondo dato dalla somma di tutte le supernove, forse 1000 al secondo in tutto l'Universo!)



Pulsar

- Uno dei possibili prodotti di una supernova sono le stelle di neutroni, stelle nelle quali protoni ed elettroni, compressi, si trasformano in neutroni. Dimensioni tipiche: 30 km per una massa solare.
- Come una pattinatrice, chiudendo le braccia, comincia a girare (conservazione del momento angolare), una stella di neutroni, comprimendosi, acquista un moto rotatorio.
- La compressione genera anche un potente campo magnetico, in cui gli elettroni residui spiraleggiano e producono un potente fascio radio che può essere intercettato a terra. Si ha allora una pulsar.
- Le pulsar, che possono avere periodi di rotazione da millisecondi a ore, sono orologi tanto precisi quanto quelli atomici!



Buchi Neri

- Stelle ancora più pesanti, esplodendo come supernove, danno origine a buchi neri. Esistono anche buchi neri galattici.
- Un buco nero è un oggetto così compresso che la velocità di fuga da esso raggiunge la velocità della luce (la massima velocità raggiungibile nell'Universo).
- Niente allora può sfuggire dall'interno di un buco nero, nemmeno la luce!
- I buchi neri stellari hanno una tipica dimensione di 3 km per una massa solare. I buchi neri al centro di galassie hanno massa di alcuni milioni/miliardi di masse solari.



Fusioni Stellari

- Esistono sistemi doppi in cui i due componenti sono pulsar o buchi neri.
- Analogamente alle stelle doppie, essi emettono onde gravitazionali.
- Di conseguenza perdono energia e si avvicinano. Avvicinandosi, aumenta la loro velocità e aumenta il tasso di emissione di onde gravitazionali. Il processo, dunque, progressivamente accelera.



Fusioni Stellari

- Negli ultimi istanti prima della fusione il segnale aumenta rapidamente di frequenza e intensità (rotazione sempre più rapida). Il periodo dell'onda è dell'ordine dei millisecondi.
- Gli eventi osservati da LIGO sono proprio fusioni di buchi neri. In generale, tali eventi possono essere osservati da interferometri terrestri quali LIGO e VIRGO.
- Pulsar o buchi neri doppi, a migliaia di anni dalla fusione, emettono invece onde con periodi da qualche minuto a qualche ora. Tali eventi potranno essere rivelati da interferometri spaziali quali LISA.



Einstein's theory

In his theory of general relativity, Einstein argued that the motion of an object would cause ripples to emanate through the curvature of space-time. These fluctuations are known as gravitational waves, shown here radiating from a binary star system – two ultra-dense neutron stars that are spiraling closer and closer to each other.

Binary star system

Gravitational waves

The technology now exists to measure gravitational waves and the results are expected to prove that Einstein's theory is correct.

Fusioni Galattiche

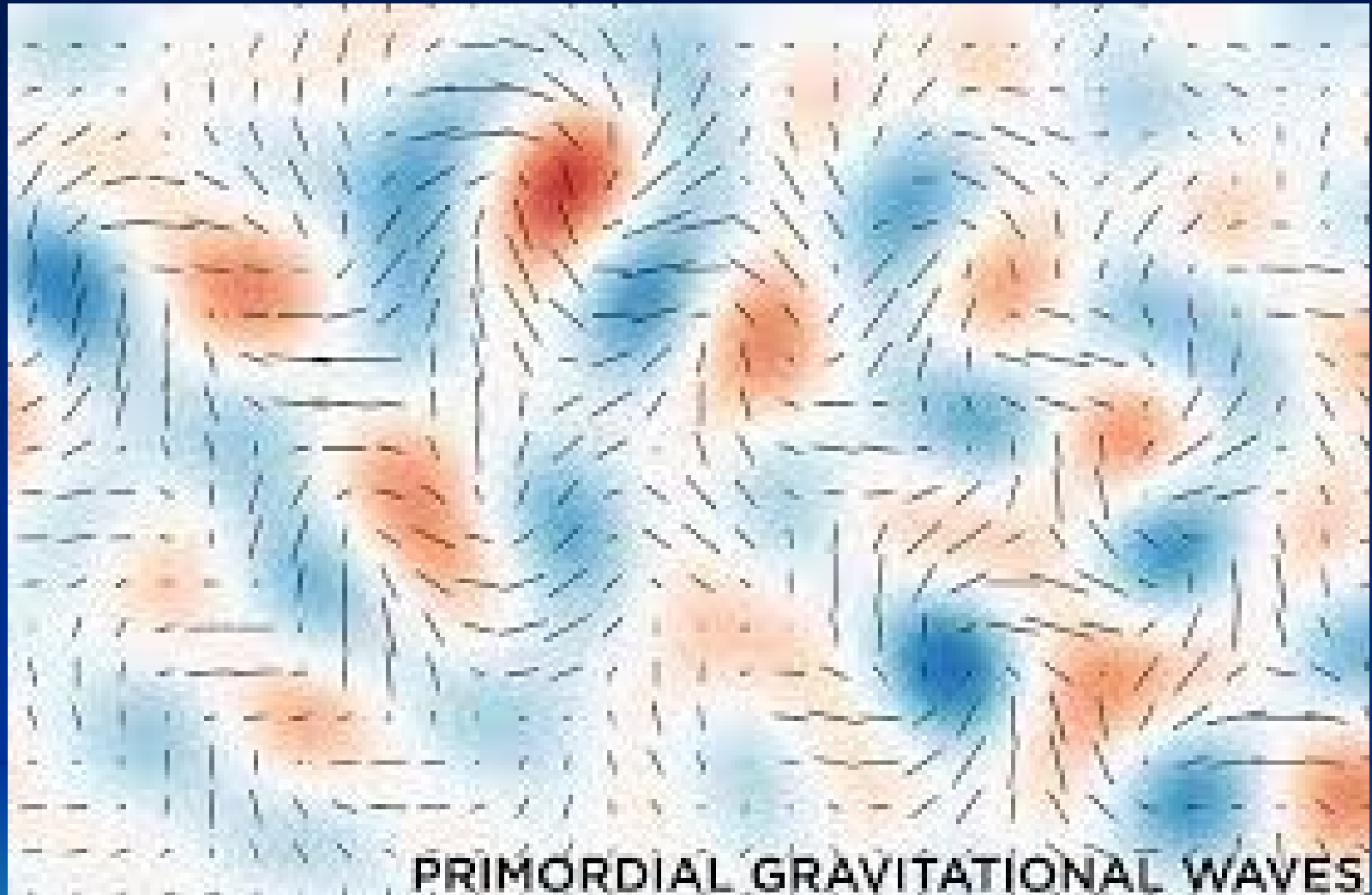
- Le stesse dinamiche si ripetono, molto più in grande, per buchi neri galattici, con masse dai milioni ai miliardi di masse solari.
- Molte galassie, infatti, sono in rotta di collisione con altre galassie (compresa la Via Lattea con la Nebulosa di Andromeda).
- I segnali risultanti, rilevabili con interferometri spaziali quali LISA, hanno un periodo variabile da qualche minuto a qualche ora.



Residui del Big Bang

- Secondo la teoria dell'inflazione, l'Universo primordiale doveva essere percorso da onde gravitazionali di tutte le frequenze, amplificate dalla rapida espansione, data dall'inflazione stessa.
- Tali onde dovrebbero lasciare un segno nella radiazione cosmica di fondo (la radiazione nelle microonde, residuo del Big Bang, che permea l'Universo), in particolare nella polarizzazione (direzione del campo elettrico e magnetico). Gli interferometri potrebbero rilevare quelle di più bassa frequenza.
- Il satellite Planck sembrava aver rilevato (indirettamente) tali onde gravitazionali primordiali ma si è trattato di un falso allarme. Evidentemente la precisione di misura non era sufficiente.





Rivelatori a Barre

- Sviluppati per la prima volta da Joseph Weber che, nel 1969, credette di aver scoperto il primo segnale di onde gravitazionali. Il segnale era però migliaia di volte più intenso di quanto prevedibile dalla teoria.
- Gruppi in USA, URSS, Italia, Germania, Francia e Regno Unito non riuscirono a ottenere risultati analoghi e la scoperta si ritiene sia stata dovuta ad errori nell'analisi. Weber però, fino alla sua scomparsa, continuò a sostenere che la sua fosse stata una vera scoperta.
- Il gruppo di Guido Pizzella (Università di Roma) ritenne di aver scoperto onde gravitazionali in parallelo alla supernova 1987A. Tale scoperta fu poi smentita.





Rivelatori a Barre

- In tali rivelatori, una barra di alluminio viene messa in vibrazione dal passaggio di un'onda gravitazionale. Raffreddati a pochi Kelvin (o milliKelvin) sopra lo zero assoluto, per prevenire vibrazioni.
- L'ampiezza di vibrazione rivelabile è tipicamente della dimensione di un nucleo atomico. Il nucleo atomico ha diametro centomila volte inferiore a quello di un atomo. Un atomo, d'altra parte, ha dimensioni tipiche di un decimiliardesimo di metro!
- La rivelazione delle vibrazioni avveniva con sensori piezoelettrici o superconduttori (SQUID). Un rivelatore piezoelettrico, ad esempio, genera un segnale elettrico se compresso. Una compressione delle dimensioni di un atomo fornisce un segnale di circa un millivolt, perfettamente rivelabile!



Gravitational waves observed directly for the first time

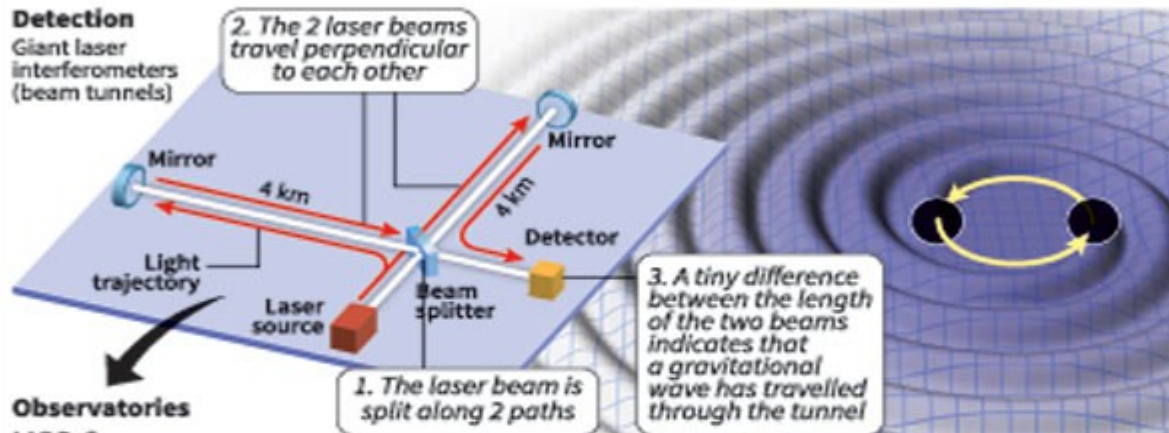
A major advancement that opens a window on the universe

► Waves were detected
Sept 14 at 16:51GMT

► Origin: fusion of 2 black holes
1.3 billion of years ago

Detection

Giant laser interferometers (beam tunnels)



Observatories

LIGOs*

2 detectors equipped with interferometers



Virgo



Albert Einstein

predicted gravitational waves in 1916 in his General Theory of Relativity



Detection of gravitational waves makes it possible to **work backwards** to the first millisecond of the Big Bang

Sources: Nature, CNRS

*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatories

AFP

Interferometri Terrestri

- Il principio di tali interferometri è stato spiegato nella slide precedente. In sintesi, quando i due bracci dell'interferometro sono in posizione di riposo, i due fasci laser arrivano in controfase (quando un'onda è al massimo l'altra è al minimo e viceversa). Una minima variazione della lunghezza dei bracci fa sì che le due onde non si annullino più. Si rileva quindi un impulso di luce.
- Lo studio dettagliato su come ottenere la sensibilità voluta fu compiuto da Reiner Weiss, negli anni '70. Molte delle tecnologie connesse furono messe a punto da Ron Drever. Principale protagonista del lavoro teorico connesso fu Kip Thorne. Nobel candidates!



Interferometri Terrestri

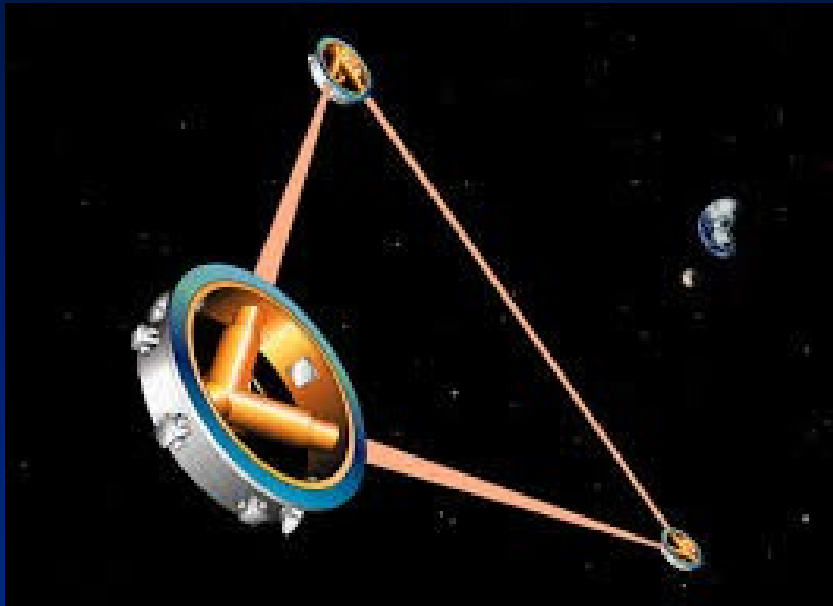
- Principali interferometri terrestri: LIGO (2 rivelatori in Washington State e Louisiana) e VIRGO (Europa/Italia, Cecina, Pisa). Lunghezza dei bracci: 4 km, così da essere migliaia di volte più sensibili dei rivelatori a barre.
- Altri interferometri si trovano in Germania e Giappone. E' prevista una terza stazione LIGO in India.
- Per evitare il rumore casuale (tipicamente vibrazioni del terreno), si validano solo osservazioni in coincidenza tra vari rivelatori (i due di LIGO, nel caso in questione).



Interferometri Spaziali

- La missione LISA (prima NASA, ora ESA/NASA) metterà in orbita tre satelliti con laser e specchi riflettori che realizzeranno un interferometro con bracci di 5 milioni di chilometri, milioni di volte più sensibili degli attuali!
- La missione LISA Pathfinder (ESA) ha collaudato il sistema di stabilizzazione delle vibrazioni degli specchi. Con correzioni di rotta, ottenute mediante micro-spinte propulsive, LISA otterrà che i satelliti seguano la traiettoria voluta a meno di un diametro atomico e che la loro distanza sia tenuta costante a meno di un millesimo di diametro atomico!





Limitazioni di Frequenza

- Gli interferometri terrestri possono rivelare onde gravitazionali di frequenza superiore a 0.1 Hertz. Infatti se una nuvola dovesse oscurare le costruzioni del sito si avrebbe una temporanea contrazione delle stesse e una (piccolissima) variazione dell'attrazione gravitazionale sugli specchi, da parte degli edifici, sufficiente a dare un segnale scambiabile con quello di un'onda gravitazionale! Tali variazioni avvengono in dieci secondi o più, quindi le basse frequenze sono disturbate.



Limitazioni di Frequenza

- Gli interferometri spaziali possono rivelare onde gravitazionali di frequenza inferiore a 0.1 Hertz. Infatti i raggi laser impiegano circa 10 secondi a percorrere un braccio dell'interferometro. I segnali devono avere un periodo di variazione di più di 10 secondi, per poter essere rivelati senza difficoltà. Le alte frequenze non sono quindi rivelabili.
- Interferometri terrestri e spaziali sono quindi quasi perfettamente complementari!



PSR1913+16

- E' un sistema doppio di pulsar, con un periodo di variazione di $7 \frac{3}{4}$ ore. Perde energia per emissione di onde gravitazionali. I due astri si avvicinano progressivamente e la loro velocità aumenta.
- Ne risulta una diminuzione del periodo di rivoluzione di 70 milionesimi di secondo per anno.
- L'emissione di onde gravitazionali (frequenza dell'ordine del kiloHertz) avviene a raffiche di durata di $\frac{1}{2}$ ora circa.



PSR1913+16

- Scoperte (e seguite per quasi due decenni) nel 1974 da Russell Hulse e Joe Taylor (premi Nobel per la fisica nel 1993).
- Il tasso di diminuzione del periodo concorda esattamente con le previsioni della relatività generale per l'emissione di onde gravitazionali.
- Si ebbe così la prima rivelazione (sebbene indiretta) di onde gravitazionali!



PSR1913+16

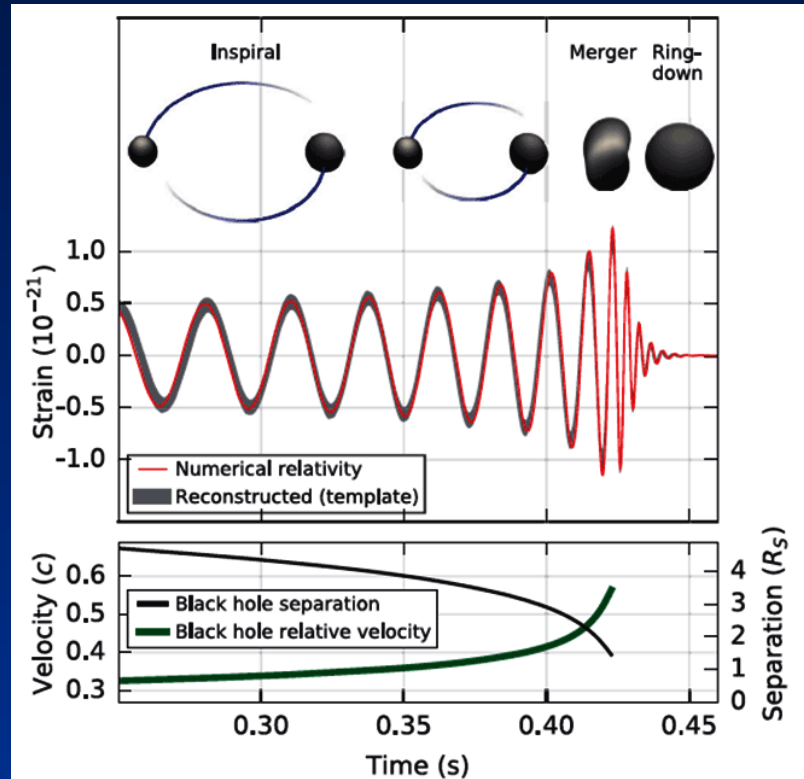
- Nel momento in cui la pulsar si allontana da noi, la sua frequenza diminuisce (effetto Doppler) e viceversa quando si avvicina.
- A causa di effetti relativistici, però, l'ellisse orbitale ruota di circa 4 gradi per anno. Dopo circa 20 anni, quindi, l'ellisse sarà ruotata di 90 gradi. Se il sistema di avvicinava e allontanava da noi, ora oscillerà perpendicolarmente alla linea di vista e non si avrà più effetto Doppler.



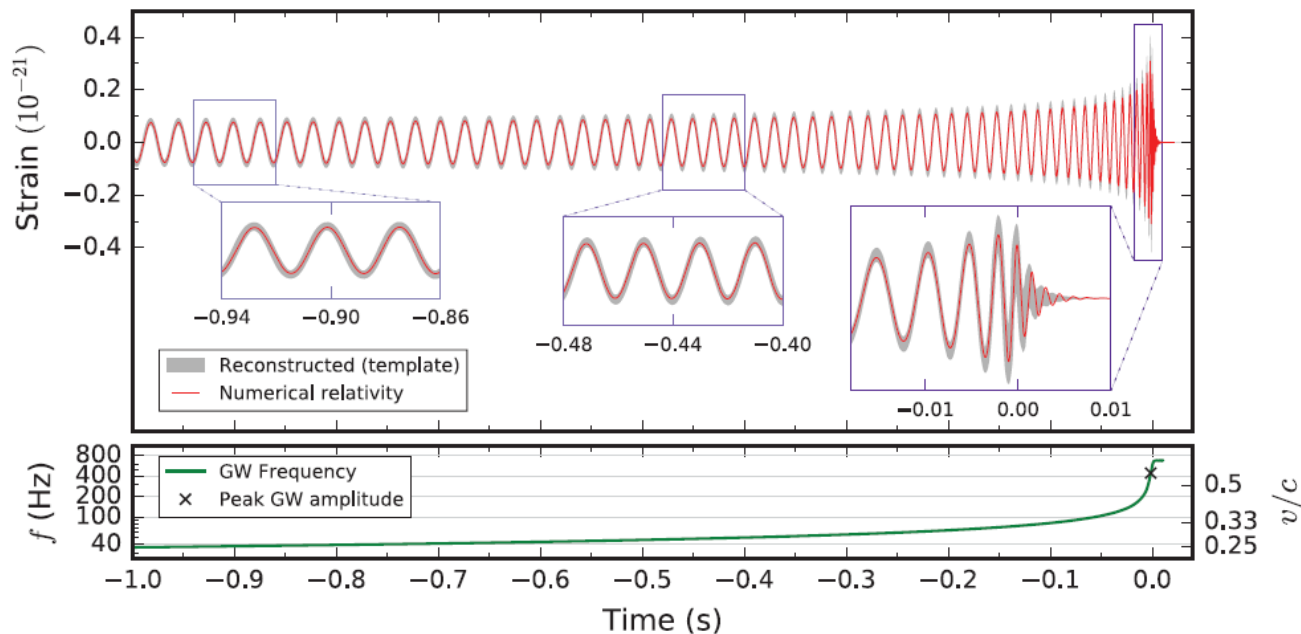
PSR1913+16

- Queste e altre previsioni, quantificate applicando la teoria della relatività generale, sono state verificate analizzando PSR1913+16.
- La pulsar doppia in questione si è rivelato uno straordinario laboratorio relativistico, prezioso in quanto è difficile eseguire esperimenti in grado di testare la teoria a un tale livello di precisione!





- L'evento registrato da LIGO è stato dovuto alla fusione di due buchi neri, di massa circa 30 masse solari e orbitanti a velocità $\frac{1}{2}$ di quella della luce. La potenza liberata equivale a circa 50 volte quella di tutte le stelle e galassie dell'Universo!



- Il 26 dicembre 2015 LIGO ha registrato un secondo evento, dovuto alla fusione di due buchi neri, di massa circa 10 masse solari e orbitanti a velocità pari al 70% circa di quella della luce. La potenza liberata supera quella di tutte le stelle e galassie dell'Universo!

Un'Impresa Tecnologica

- Oltre che aprire un nuovo campo di studio astronomico, la rilevazione di onde gravitazionali è stata una grandiosa impresa tecnologica (lo sviluppo di LIGO e VIRGO è iniziato nei primi anni '90, la ricerca sulle onde gravitazionali ha ormai un cinquantennio di vita).
- Il problema maggiore è quello del rumore. La vibrazione rilevata da LIGO è pari a $1/1000$ del diametro di un nucleo atomico (si noti che dimensioni del nucleo = $1/100000$ dimensioni dell'atomo, dimensioni dell'atomo = 1 decimiliardesimo di metro)!
- La sola vibrazione del suolo (comprese le onde del mare a centinaia di chilometri!) a 1000 Hertz (frequenza del segnale rivelato) è pari a 100 volte più del segnale rilevato da LIGO!



Un'Impresa Tecnologica

- Tuttavia, mettendo uno sopra l'altro circa 20 sistemi di sospensione simili a quelli di un'automobile (e con altri accorgimenti addizionali), si riesce ad ammortizzare tali infinitesime vibrazioni.
- Un sistema simile era impiegato nei rivelatori a barre. Gli specchi di LIGO sono invece ammortizzati da un sistema a pendolo invertito (4 pendoli in serie).
- Il raggio laser deve avere una potenza di 0.1 megawatt, senza far scaldare e deformare gli specchi, che non possono deviare dalla forma ideale per più di un atomo!



Conclusioni

- Sta nascendo una nuova astronomia, l'astronomia delle onde gravitazionali. Sarà quindi possibile investigare nuovi aspetti del comportamento di astri “estremi”.
- Oltre all'interesse astrofisico intrinseco, ciò permetterà ulteriori verifiche della relatività generale, mediante la quale si descrivono molti aspetti di tali oggetti.



Conclusioni

- Le onde gravitazionali cosmologiche permetteranno di aprire una finestra su eventi verificatisi prima di 380000 anni dopo il Big Bang (la radiazione cosmica di fondo, originatasi in tale epoca, è la cosa più lontana nel tempo che possiamo osservare impiegando onde elettromagnetiche).
- Sarà forse possibile osservare onde gravitazionali provenienti dall'epoca (tempo di Planck) in cui regnavano la teoria delle stringhe o la gravità quantistica (che ancora non conosciamo nei dettagli)?

