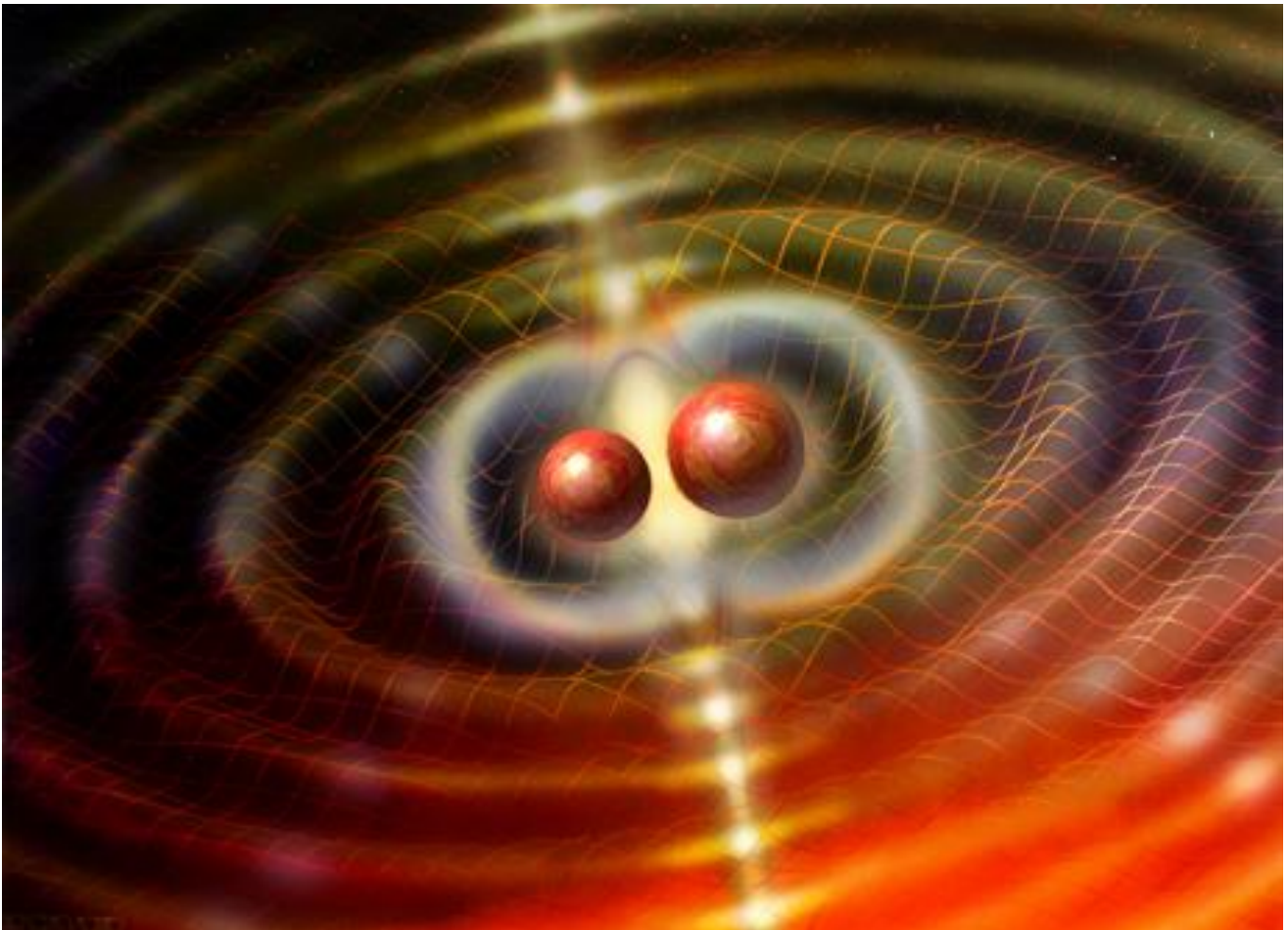


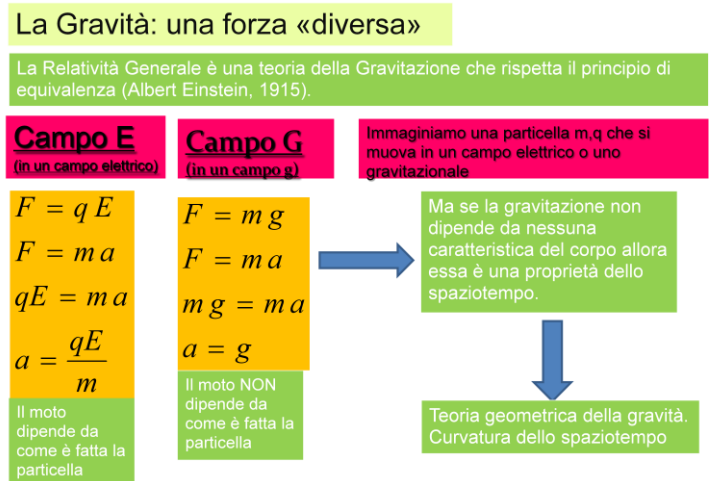
Elaborato di fisica e matematica

# **Illustra il fenomeno e la scoperta delle onde gravitazionali**



## LE ONDE GRAVITAZIONALI: IL FENOMENO

La forza gravitazionale riguarda l'uomo fin dalle origini ed essa si presenta a noi come forza peso, la quale ci vincola alla superficie terrestre. Nonostante sia la più antica essa è anche la meno nota poiché, a causa delle caratteristiche peculiari di questo tipo di interazione, non ultima la sua debolezza in confronto alle altre forze, i suoi effetti vengono mascherati da quelli dovuti alla forza elettrodebole e nucleare. Soltanto se si considerano corpi di grandi dimensioni, come i corpi celesti, in cui le cariche elettriche sia positive che negative della forza elettrodebole si annullano, e la forza nucleare avente un raggio d'azione molto limitato, risulta avere un valore trascurabile, allora la forza gravitazionale diventa predominante. Un grande passo in avanti nella comprensione della forza gravitazionale è stato compiuto nel 1916 con la presentazione della teoria della Relatività Generale formulata da Einstein. In essa la forza gravitazionale viene interpretata in termini di curvatura dello spazio-tempo quadridimensionale determinata dalla massa gravitazionale propria dei corpi, la quale, essendo legata all'attrazione esercitata da altre masse, risente del campo gravitazionale presente nella posizione in cui il corpo si trova. Poiché ogni corpo è attratto da una forza gravitazionale  $F$  di intensità pari al prodotto del campo gravitazionale  $g$  per la massa gravitazionale  $m_g$ , allora si può affermare, grazie il principio di identità fra la seconda legge della dinamica e tale formula, che quest'ultima espressione sia identica a quella della forza peso tranne che la massa considerata è quella gravitazionale e non inerziale. Esperimenti accurati mostrano dunque che la massa inerziale e quella gravitazionale di un corpo si equivalgono in termini di quantità e a tal ragione si può dedurre che tutti i corpi in caduta libera, indipendentemente dalla loro natura, sono sottoposti alla stessa accelerazione di gravità  $g$ . Equiparando la seconda legge della dinamica e la formula della forza elettrica  $F$ , la quale è ottenuta dal prodotto tra la carica  $q$  e il campo elettrico  $E$ , notiamo che il moto di una particella in un campo elettrico  $E$  dipende dalla carica e dalla massa della particella, mentre, considerando il moto di un corpo in un campo gravitazionale  $G$ , esso non dipenderà dalle caratteristiche del corpo, ma diverrà esso stesso una proprietà dello spazio-tempo. La teoria della relatività generale inoltre prevede che i campi gravitazionali si propaghino alla velocità della luce e le masse accelerate irraggino onde gravitazionali in analogia con le onde elettromagnetiche emesse da cariche elettriche accelerate. Le onde gravitazionali infatti sono molto simili alle onde elettromagnetiche, in quanto in entrambi i casi le onde sono prodotte da particelle dotate di carica o massa che si muovono di moto accelerato, e trasportano energia, quantità di moto e informazioni. Tali analogie non escludono l'esistenza di differenze tra questi due tipi di onde, tra esse, quella fondamentale riguarda la loro propagazione, la quale è dipolare nel caso dell'elettromagnetismo, mentre è quadrupolare nel caso di una campo gravitazionale (potenziale generato da una distribuzione di quattro cariche equidistanti, dotate a due a due di cariche opposte. Tale distribuzione è detta quadrupolo fondamentale ( il tensore di momento di quadrupolo  $Q$  ). Più precisamente le onde gravitazionali, spostandosi alla velocità della luce, modificano le proprietà metriche, cioè la distanza, dello spazio stesso, ed



eseguendo uno sviluppo in multipoli<sup>1</sup> considerando sistemi di masse, è ragionevole chiedersi se ogni termine dello sviluppo contribuisca alla generazione di un'onda gravitazionale. Il risultato che si trova è che il momento di monopolo non contribuisce alla formazione di onde gravitazionali, il momento di dipolo è nullo se calcolato nel centro di massa del sistema, mentre le onde vengono generate da distribuzioni di massa con momento di quadrupolo non nullo con derivata terza diversa da zero. Questa diversità di comportamento tra onde elettromagnetiche e gravitazionali è legata al fatto che, in un sistema di riferimento cartesiano, il campo elettromagnetico è descrivibile con un vettore, quindi attraverso una terna di componenti spaziali; diversamente, il campo gravitazionale va descritto con un tensore, un ente matematico che viene individuato in un riferimento cartesiano da tre vettori, quindi identificabile attraverso tre terne di componenti spaziali. A livello matematico, si può dire che le equazioni del campo elettromagnetico sono lineari, mentre quelle del campo gravitazionale sono non lineari, in quanto la materia gravitazionale curva lo spazio-tempo e quindi subisce essa stessa le conseguenze della curvatura. Un'ulteriore divergenza tra questi due modelli di onde si pone in termini quantistici per cui al campo elettromagnetico è associato il fotone, una particella di massa nulla e spin (momento angolare) unitario pari a 1 la quale implica un'interazione repulsiva tra due particelle di carica uguale, mentre al campo gravitazionale è associato il gravitone, particella di massa nulla, poiché la gravità è una forza con raggio d'azione infinito, e di spin intero, che per avere interazione attrattiva dovrebbe avere spin 0 o 2, ma l'opzione dello spin 0, non essendo in grado di descrivere correttamente la deflessione gravitazionale della luce prevista dalla Relatività Generale, viene scartata e perciò al gravitone viene associato lo spin 2. Ciò significa che la forza elettromagnetica può essere di tipo sia attrattivo che repulsivo, mentre la forza gravitazionale può essere solamente di tipo attrattivo. Queste due diverse particelle si differenziano anche nel modo di rapportarsi con l'ambiente circostante: i fotoni agiscono direttamente l'uno sull'altro interagendo solamente con cariche elettriche e correnti, e possiedono un potere di penetrazione molto basso, tanto da venire in genere assorbito dalla materia; il gravitone è invece in grado di interagire con tutte le forme di energia e materia poiché, secondo la Relatività di Einstein, la gravità è generata da qualsiasi forma di energia (essendo anche la massa una forma di energia), e dunque gli stessi campi gravitazionali, con loro energia, generano a loro volta altri campi gravitazionali. Il potere di penetrazione del gravitone è molto elevato, tanto che le onde gravitazionali riescono ad oltrepassare grandi nubi di polvere e oggetti molto massivi, come le stelle, senza perdere il loro quantitativo di informazioni riguardanti il cambiamento nel tempo della loro sorgente. Questo fatto porta ad una ulteriore differenza quantitativa sia nell'emissione che nell'assorbimento delle onde. La forza gravitazionale, a parità di quantità di massa e carica elettrica, dà luogo ad effetti molto più piccoli rispetto alla forza elettrica, poiché il valore della costante di gravitazione universale  $G$  ( $6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ Kg}^{-1}$ ) è minore di ben 20 ordini di grandezza rispetto alla costante di Coulomb  $K$  ( $9 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ C}^{-1}$ ) presente nel caso della forza elettrica. Per tali ragioni rilevare sperimentalmente un gravitone sarebbe estremamente problematico, ma alcune proposte per mettere insieme una teoria quantistica della gravitazione non lo richiedono nemmeno. Ad esempio, la Gravità Quantistica a Loop non prevede alcun gravitone e descrive fenomeni in cui la gravità è particolarmente intensa attraverso equazioni alle differenze finite (e non tramite le complesse equazioni differenziali della Relatività Generale) risolubili per mezzo di supercomputer. I risultati emersi suggeriscono che nelle condizioni di altissima densità ed energia che caratterizzano una singolarità, la gravità si trasforma in una

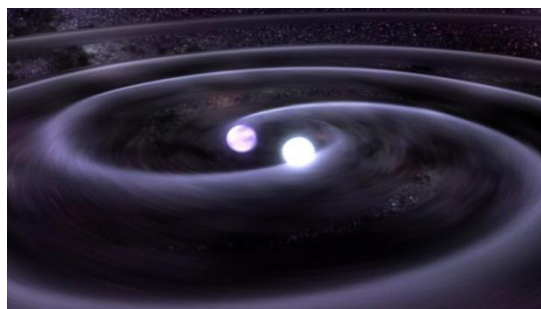
---

<sup>1</sup> lo **sviluppo in multipoli** è una serie che rappresenta una funzione che dipende da variabili angolari. La serie viene solitamente troncata ad un determinato ordine  $n$ : si considerano in tal caso soltanto i primi  $n$  termini dell'espansione, che approssimano la funzione sempre più fedelmente al crescere di  $n$ . La peculiarità di questo sviluppo è che i termini che compaiono sono formalmente identici a quelli di semplici configurazioni spaziali opportunamente scelte, e quindi esso si può pensare come scomposto nella somma dei potenziali dovuti, nell'ordine, a una singola carica (monopolo), un dipolo, un quadrupolo, e così via.

forza repulsiva. Considerando dunque la singolarità del Big Bang osserviamo che essa aveva una densità elevatissima ma pur sempre finita e perciò una volta raggiunta la soglia massima di energia dello spazio-tempo, la gravità, divenuta repulsiva, innescò il Big Bang accelerando l'espansione dell'universo, il quale secondo tale teoria potrebbe derivare da un universo precedente collassato dalla gravità attrattiva che si è trasformata in gravità repulsiva. Secondo queste innumerevoli contrazioni e repulsioni dell'universo, si preferisce dunque parlare di Big Bounce (grande rimbalzo) piuttosto che di Big Bang. Per quanto riguarda la formulazione della teoria quantistica della gravitazione, essa è ostacolata da numerose difficoltà nella realizzazione e riuscita degli esperimenti per la ricerca delle onde gravitazionali, per via della necessità di creare strumenti in grado di rilevare, al passaggio dell'onda, una variazione di lunghezza pari ad un milionesimo del diametro di un protone ( il cui raggio vale circa  $0,84 \cdot 10^{-15}$  m, ovvero 0,84 femtometri, in cui un femtometro rappresenta un trilionesimo di millimetro), e dunque circa  $1,68 \cdot 10^{-21}$  m , per ogni metro di lunghezza del rivelatore. Nonostante ciò gli studi non si sono mai arrestati, incitati dall'importanza di affermare l'esistenza di onde gravitazionali e rilevare onde di questo tipo che permetterebbe alla fisica di dare un'ulteriore conferma della validità della teoria della Relatività Generale. Inoltre, dato che le onde gravitazionali possiedono un alto potere di penetrazione della materia e il loro cammino interstellare non può essere intralciato, riuscire ad analizzare tali onde porterebbe alla nascita di una "astronomia gravitazionale" che renderà possibile osservare l'attività dei buchi neri che, non emettendo radiazione elettromagnetica, risultano per ora invisibili all'osservazione astronomica, e potrà, rilevando la quantità di massa oscura presente nell'universo, agevolare lo sviluppo delle teorie riguardanti l'origine del cosmo e la sua probabile evoluzione.

## SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI :

Fin dagli anni cinquanta sono stati effettuati vari esperimenti allo scopo di rilevare le onde gravitazionali provando a riprodurle in laboratorio, ma tale metodo non è utile in quanto l'emissione di questo tipo di onde, da parte di masse da laboratorio, è estremamente debole. Di conseguenza la strategia migliore è quella di cercare la radiazione emessa da masse grandissime, dell'ordine di quelle delle stelle o delle galassie. Si conoscono molte possibili sorgenti di onde gravitazionali, tra le quali sistemi binari di stelle, pulsar, esplosioni di supernove, buchi neri in vibrazione e galassie in formazione, e per ognuna di queste fonti il tipo di segnale emesso dovrebbe possedere caratteristiche che individuino univocamente il tipo di fonte e la



causa dell'emissione. Le sorgenti inoltre si suddividono in periodiche, nel caso emettano un segnale gravitazionale continuo (come un sistema di due stelle in rotazione) e impulsive, nel caso producano un impulso di durata relativamente breve (come l'esplosione di supernovæ, la caduta di materia nei buchi neri e la coalescenza di stelle).

- Una **stella di neutroni**<sup>2</sup> giunta alla maturità può essere una sorgente di onde gravitazionali se la sua massa non è disposta simmetricamente rispetto al suo asse di rotazione. In questo caso le onde sono continue e il loro periodo è uguale al periodo di rotazione della stella.

<sup>2</sup> una **stella di neutroni** è formata da materia degenerata la cui componente è costituita da neutroni mantenuti insieme dalla forza di gravità. Essa ruota su se stessa ad una velocità elevatissima poichè durante il collasso il raggio della stella è diminuito e perciò è un corpo celeste massiccio di piccole dimensioni ma avente altissima densità. Una stella di neutroni è il risultato del collasso gravitazionale del nucleo di una stella massiccia, che segue alla cessazione delle reazioni di fusione nucleare per l'esaurimento degli elementi leggeri al suo interno, e rappresenta pertanto l'ultimo stadio di vita di stelle con massa molto grande (superiore alle 10 masse solari)

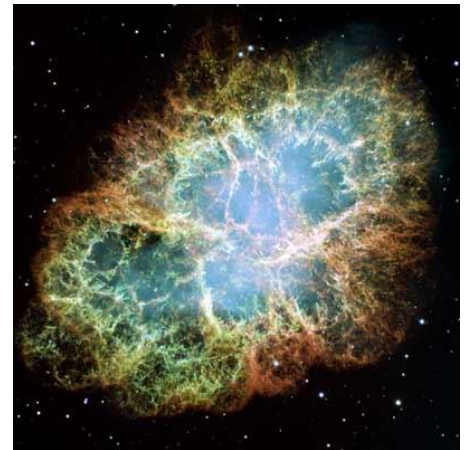
Lo studio dei segnali ricevuti darebbero informazioni sulla struttura interna di queste sorgenti, ancora non completamente conosciute;

- Un **sistema stellare binario**, formato cioè da due stelle che orbitano intorno ad un comune centro di massa, produce onde gravitazionali continue aventi un periodo pari a metà del periodo dell'orbita delle due stelle. Quando un sistema binario muore, le stelle che lo compongono cadono rapidamente verso il centro seguendo una traiettoria a spirale, fino a che collidono o si disintegrano, emettendo onde gravitazionali. Nel caso che il sistema sia formato da due stelle di neutroni, l'impulso di onde gravitazionali prodotto sarà molto più intenso a causa del maggiore quantitativo di massa presente nel sistema, mentre in un sistema binario di buchi neri<sup>3</sup>, il momento angolare orbitale (spin) di questi, viene associato ad un asse di rotazione (l'asse orbitale) e tali assi, spin e orbitale, possono puntare nella stessa direzione oppure non essere allineati. Quando i due buchi neri si fondono tra loro, le onde gravitazionali che emettono portano la "firma" dei loro spin originari;

- L'**esplosione di una supernova**<sup>4</sup>, dovrebbe essere annunciata dalla trasformazione di circa lo 0,1% della massa iniziale in onde gravitazionali di tipo pulsato. Un vantaggio nello studio del collasso stellare proviene dal fatto che le onde gravitazionali, che interagiscono così debolmente con la materia tanto da poter attraversare senza attenuazioni l'atmosfera di una stella, potrebbero svelare i dettagli più fini del collasso;

- il **Big Bang** ha lasciato una radiazione di fondo fatta di microonde, ma anche un rumore di fondo di onde gravitazionali emesse nei primi istanti di vita dell'Universo, ovvero onde gravitazionali primordiali, causate da perturbazioni del campo gravitazionale, che propagandosi nello spazio avrebbero interagito successivamente con la radiazione cosmica di fondo, lasciando una "firma";

- l'**Universo** stesso sarebbe una sorgente di onde gravitazionali secondo un fenomeno direttamente associabile all'accelerazione della geometria spaziale che avviene tramite un meccanismo chiamato "amplificazione parametrica delle fluttuazioni del vuoto" per cui, a livello microscopico della geometria spazio-tempo, tutti i tipi di campi possono "fluttuare", ossia avere delle piccole oscillazioni locali che li porta a discostarsi per un attimo dal valore assegnato classicamente al campo nel punto dato. Queste rapidissime variazioni della geometria possono essere pensate come piccolissime onde gravitazionali virtuali che non si propagano liberamente, ma che sono continuamente emesse e subito riassorbite. Analogamente anche i gravitoni vengono continuamente prodotti per poi essere immediatamente distrutti, e per non contraddire le leggi di conservazione, questi gravitoni devono però essere prodotti e distrutti in coppia. Se la geometria è statica la situazione per le coppie di gravitoni è dunque stazionaria, ma se la geometria varia in maniera sufficientemente veloce è invece possibile che i gravitoni di una coppia siano trascinati lontano l'uno dall'altro (a causa dell'espansione dell'Universo) rimanendo così "spaiati" e andando a contribuire



<sup>3</sup> un **buco nero** è un corpo celeste formatosi da implosioni di masse sufficientemente elevate con un campo gravitazionale così intenso che nulla dal suo interno può uscirne, nemmeno la luce essendo la velocità di fuga superiore a  $c$ . In esso la gravità provoca un collasso gravitazionale che tende a concentrare lo spaziotempo in un punto chiamato singolarità, e il limite del buco nero è definito orizzonte degli eventi, regione che ne delimita i confini osservabili. Un buco nero è caratterizzato da due parametri fondamentali: la massa e lo spin, cioè il momento angolare intrinseco, dovuto al moto di rotazione dell'oggetto su se stesso

<sup>4</sup> le **supernovae** sono stelle dalle grandi dimensioni molto luminose in grado di causare un' emissione di radiazione che può per brevi periodi superare quella di una intera galassia, e che verso la fine della loro vita, dopo aver consumato idrogeno ed elio, non sapendo più come mantenersi, poichè la forza di gravità tende a farla implodere, esplodono spargendo ad una velocità prossima a quella della luce i suoi materiali, divenendo poi stelle di neutroni



all'abbondante flusso di gravitoni che si distribuisce su tutto lo spazio riempiendo l'universo in maniera isotropa. Questo fondo di radiazione gravitazionale, prodotto direttamente dalla geometria in epoche primordiali, può sopravvivere indisturbato sino ad oggi grazie alla sua debolissima interazione con il resto delle particelle presenti, e il suo spettro, cioè la sua distribuzione in energia, ci trasmette una fotografia fedele della geometria dell'universo all'epoca in cui il fondo è stato prodotto.

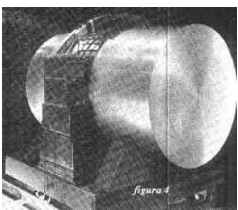
Le onde gravitazionali prodotte nelle situazioni descritte avrebbero comunque un impatto estremamente debole ed effimero quando investono la Terra. Nel migliore dei casi, le masse dei rivelatori verrebbero appena sollecitate, per questo motivo molti scienziati furono scettici riguardo la possibilità di rilevare onde gravitazionali. Esistono però diversi tipi di rivelatori di onde gravitazionali, e anche se in pochi casi è stato possibile interpretare i dati sperimentali in modo chiaro e univoco, i risultati ottenuti hanno fornito un'ennesima conferma della teoria della relatività generale e aperto nuove prospettive di studio in campo astrofisico.

## STORIA DELLA RICERCA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI: I RIVELATORI

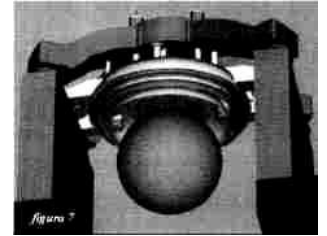
La rivelazione del passaggio di un'onda gravitazionale viene tentata con due approcci sperimentali differenti. Il primo consiste nell'osservare le vibrazioni di un corpo di grande massa, generalmente una barra di metallo di qualche tonnellata in cui l'onda cede una piccola frazione della sua energia, eccitandone il modo di oscillazione. L'altro approccio sfrutta l'interferenza ottica tra raggi di luce laser riflessi da un sistema di specchi; la deformazione dello spaziotempo provocata dall'onda gravitazionale causa uno sfasamento dei fotoni, che si manifesta con una variazione della figura d'interferenza.

**Primi approcci:** a partire dagli anni sessanta sono stati compiuti molti esperimenti, nella maggior parte dei quali era usata come rivelatore una massiccia barra di metallo. La più grande massa solida che avrebbero potuto usare come rivelatore sarebbe stata la Terra stessa, ma risulta difficile distinguere le eventuali vibrazioni dovute ad onde gravitazionali rispetto all'alto "rumore di fondo" del pianeta, provocato da perturbazioni sismiche e meteorologiche. Si pensò allora alla Luna che, a causa dell'assenza di fenomeni sismici e di atmosfera, era considerato un luogo dall'ottima protezione nei confronti delle perturbazioni esterne, ma i costi da sostenere per impiantare strumenti di misurazione sul satellite erano e sono tuttora ritenuti eccessivi.

- **Per mezzo di conduttori cilindrici** : rivelatori aventi una massa di poche tonnellate che possiedono una frequenza di emissione di una stella prossima al collasso gravitazionale. Il primo rivelatore di onde gravitazionali fu costruito nel 1957 dallo scienziato americano Joseph Weber, dell'università del Maryland; il ricercatore allestì una serie di rivelatori uguali collegati tra di loro e posti in luoghi molto distanti. Tali strumenti erano collegati ad un rivelatore che prendeva nota solamente dei segnali che tutti gli apparecchi inviavano simultaneamente, in modo che le perturbazioni, dovute all'ambiente, fossero distinguibili. Weber osservò che il massimo d'intensità delle onde era in direzione del centro della Galassia, confermando l'idea che l'intera Galassia fosse in rotazione intorno ad un enorme buco nero. In realtà i risultati di Weber, furono considerati come dovuti a cause esterne, in quanto la sensibilità degli strumenti non era ritenuta sufficiente per rilevare il passaggio di un'onda gravitazionale.



- **Per mezzo di conduttori sferici** : Lo statunitense Robert Forward ideò un rivelatore a massa sferica che può essere messa in vibrazione da onde con qualsiasi direzione di provenienza, permettendo sia di aumentare notevolmente la massa del rivelatore, sia di rendere la sensibilità indipendente dalla direzione di provenienza dei segnali.



- **Per mezzo di interferometri** : Fin dall'inizio degli anni settanta era stato anche proposto e sperimentato l'impiego di rivelatori interferometrici, e il primo rivelatore di onde gravitazionali che sfruttasse fasci di luce fu costruito nel 1971 da Robert Forward e colleghi agli Hughes Research

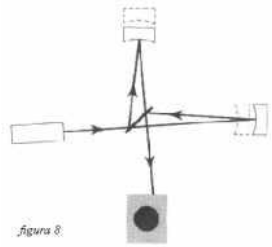


Figura 8

Laboratories. Tale apparecchio consiste in un laser, un divisore di fascio, due specchi ed un fotorivelatore, disposti a croce. Se l'interferometro viene attraversato da un'onda gravitazionale, le distanze tra i componenti subiscono un'esigua variazione per cui un po' di luce verrà capata dal rivelatore, che registra una variazione d'intensità luminosa proporzionale all'intensità dell'onda gravitazionale. Per stabilire la direzione di provenienza e la posizione in cielo della sorgente si dovrebbero

costruire almeno tre rivelatori in luoghi molto distanti tra loro. Un vantaggio dei rivelatori interferometrici è che il loro tempo di reazione è proporzionale alla velocità della luce, mentre i componenti di un rivelatore a barra, cilindrico o sferico, hanno un tempo di reazione proporzionale alla velocità del suono. Benché questi primi interferometri siano circa cento volte più sensibili delle barre di Weber, finora nessuno di essi ha fornito prove di un'onda gravitazionale.

- **LIGO (Laser Interferometer Gravitational-waves Observatory)**: rivelatore interferometrico di grandi dimensioni protagonista del progetto americano approvato nel 1990 che prevede la costruzione negli



Stati Uniti di due grandi rivelatori, ognuno dei quali produrrà intensi fasci laser che rimbalzeranno avanti e indietro su due percorsi lunghi quattro chilometri per poi interferire in un punto. Se l'apparecchio viene attraversato da un'onda gravitazionale di intensità sufficiente, la distanza che i fasci luminosi devono percorrere subirebbe una lieve variazione e cambierebbero le modalità d'interferenza nei fasci. Tali interferometri dovrebbero

avere una sensibilità in grado di far rivelare le onde gravitazionali emesse dalla collisione di due stelle di neutroni.

**Realizzazioni e progetti italiani:** l'attività nella quale l'Italia ha compiuto finora gli sforzi maggiori, col



Figura 11

contributo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), è quella che utilizza come rivelatori grandi cilindri di alluminio secondo l'idea proposta inizialmente da Joseph Weber. Si tratta però di antenne che per ridurre gli effetti dell'agitazione termica vengono raffreddate con elio liquido e sono inoltre dotate di un migliore sistema elettronico di amplificazione dei segnali. Il gruppo delle università di Roma ha costruito nel 1990 a Ginevra l'antenna

**EXPLORER** e l'antenna criogenica (cioè raffreddata a basse temperature), denominata **ALTAIR**, costruita presso l'Istituto di Astrofisica del CNR di Frascati. Il passo successivo verso una sensibilità ancora maggiore, è stato già avviato con la costruzione di due nuovi rivelatori: **NAUTILUS**, operante dal 1995

presso il Laboratorio nazionale di Frascati (INFN), ed **AURIGA** (Antenna Ultracriogenica Risonante per l'Indagine Gravitazionale Astronomica), presso il Laboratorio nazionale di Legnano (INFN). Queste antenne funzionano ad una temperatura di pochi centesimi di kelvin grazie ad uno speciale refrigeratore. La sensibilità che si può raggiungere con questi rivelatori è di  $10^{-21}$ , valore che permette di rivelare le esplosioni di supernovae. Adalberto Giazotto dell'Istituto nazionale di fisica nucleare di Pisa avviò una collaborazione, nell'ambito del consorzio EGO (European Gravitational Observatory), con un gruppo di Parigi per realizzare un grande interferometro italo-francese, il progetto **VIRGO**. Tale rivelatore, in funzione dal 2003, è stato realizzato a Cascina, e, dotato di due bracci della lunghezza di tre chilometri in cui un raggio laser viene riflesso da particolari specchi, così da allungarne il percorso, la sua sensibilità e la larghezza di banda permettono di rivelare sia i segnali emessi da stelle di neutroni, sia un'esplosione di supernova.



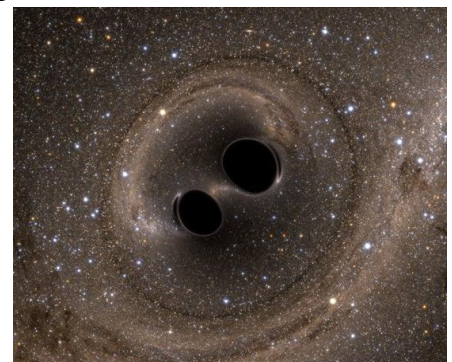
### LA SCOPERTA:

In collaborazione con LIGO, posti i loro bracci perpendicolari l'uno all'altro, al passaggio di un'onda gravitazionale, essa dilata lo spazio e quindi la luce laser impiega più tempo per attraversare uno dei due bracci di Virgo o di Ligo, mentre ne impiega di meno nel braccio ortogonale dove lo spazio si è ristretto. Analizzando con precisione estrema i tempi di anticipo e di ritardo, si riesce a captare l'onda gravitazionale. Ed è proprio dalla loro collaborazione che l'11 febbraio 2016 nel corso di una conferenza stampa è stata annunciata la prima osservazione



di onde gravitazionali, avvenuta alle 10.50 e 45 secondi (ora italiana) del 14 settembre 2015. Le onde gravitazionali rivelate sono state prodotte durante il processo di fusione di due buchi neri, evento astronomico denominato con la sigla alfanumerica GW150914, di massa equivalente a circa 29 e 36 masse solari, in un unico buco nero rotante più massiccio di circa 62 masse solari: le tre masse solari mancanti al totale della somma equivalgono all'energia emessa sotto forma di onde gravitazionali. I due buchi neri, prima di fondersi, hanno percorso una traiettoria a spirale per poi scontrarsi a una velocità pari circa alla metà della velocità della luce.

L'osservazione conferma anche l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di massa stellare (maggiore di 25 masse solari). Il processo di fusione dei due buchi neri responsabile delle onde gravitazionali rivelate è un evento accaduto quasi un miliardo e mezzo di anni fa, quando sulla Terra facevano la loro comparsa le prime cellule evolute in grado di utilizzare l'ossigeno. Il 14 agosto 2017, ore 12.30.43 (ora italiana), gli interferometri gemelli di LIGO (uno in Louisiana, e l'altro a Washington) e l'interferometro europeo VIRGO, hanno rilevato un'onda gravitazionale, generata dalla fusione di due buchi neri, dotati di massa pari a 31 e 25 masse solari, in un unico buco nero di massa complessiva pari a 53 masse solari, per cui tre masse solari sono state convertite in onde gravitazionali. L'annuncio di questa nuova rilevazione di onde gravitazionali, la prima per VIRGO, è stata fornita nell'ambito del G7 Scienza il 27 settembre 2017. Il successivo 17 agosto, alle 14.41 è stata rilevata, grazie alla collaborazione LIGO/VIRGO, anche la prima



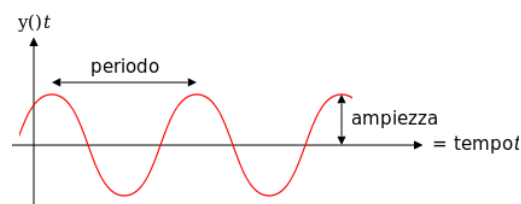
Il 14 agosto 2017, ore 12.30.43 (ora italiana), gli interferometri gemelli di LIGO (uno in Louisiana, e l'altro a Washington) e l'interferometro europeo VIRGO, hanno rilevato un'onda gravitazionale, generata dalla fusione di due buchi neri, dotati di massa pari a 31 e 25 masse solari, in un unico buco nero di massa complessiva pari a 53 masse solari, per cui tre masse solari sono state convertite in onde gravitazionali. L'annuncio di questa nuova rilevazione di onde gravitazionali, la prima per VIRGO, è stata fornita nell'ambito del G7 Scienza il 27 settembre 2017. Il successivo 17 agosto, alle 14.41 è stata rilevata, grazie alla collaborazione LIGO/VIRGO, anche la prima



emissione di onde gravitazionali prodotta dalla fusione di due stelle di neutroni, evento indicato con la sigla GW170817, che è stato accompagnato dall'emissione di un lampo di raggi gamma, osservato dai satelliti Fermi della NASA e INTEGRAL dell'ESA. I dati ottenuti rivelano inoltre che le onde gravitazionali e il lampo di raggi gamma sono arrivati sulla Terra a meno di due secondi di distanza l'uno dall'altro, dopo un viaggio durato 130 milioni di anni, confermando il fatto che onde gravitazionali e luce hanno la stessa velocità, secondo quanto previsto dalla Teoria della Relatività.

## INTENSITÀ DELLE ONDE GRAVITAZIONALI ALL'ORIGINE:

Quando le onde gravitazionali vengono rilevate dagli interferometri, esse hanno un ordine di  $10^{-21}$ m,



ovvero hanno un'ampiezza piccolissima, la quale dipende solo dalla distanza e dunque possono essere usati come riferimenti standard dipendenti solo da una variabile. Al momento della loro generazione l'ampiezza delle onde emesse, oltre che ad essere sempre uguale, è estremamente

alta e osservando di quanto si affievolisce si può dedurre quanto lontana è la loro sorgente.

Considerando i due buchi neri del segnale GW150914 (la prima osservazione mai effettuata)

l'energia emessa, in onde gravitazionali, corrispondeva all'esplosione di 3 Soli:

il sole ha una massa di  $2 \cdot 10^{30}$ kg, dunque tre soli di  $6 \cdot 10^{30}$  kg, moltiplicati per il quadrato della velocità della luce  $c^2$ , danno un valore pari a  $9 \cdot 10^{16}$ .

L'energia che giunge fino a noi diminuisce sempre con il quadrato della distanza  $\frac{1}{d^2}$ , mentre

l'ampiezza dei segnali con la distanza  $\frac{1}{d}$ .

Il numero adimensionale  $10^{-21}$ , definito "strain" ("deformazione"), è un valore di una variazione su una lunghezza  $\frac{\Delta L}{L}$ , che riportato in metri è pari a  $10^{-14}$ m e rappresenta la variazione di lunghezza osservata su tutta la Terra.

Per comprendere meglio il concetto di strain e la variazione dell'ampiezza, consideriamo due triangoli isosceli simili, in cui il rapporto base/altezza rappresenta lo strain:

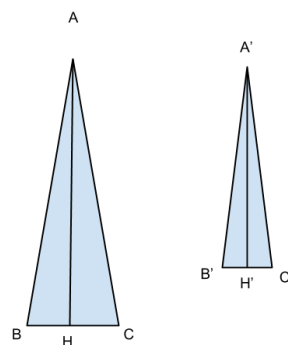
Se  $AH = L$  è la distanza e  $BH = \Delta L$  è l'ampiezza dell'onda, allora lo strain è costante ed è adimensionale (metri/metri si semplificano). Strain di  $10^{-21}$

significa che  $AH = 1$  m e  $BH = 10^{-21}$ m, poiché  $10^{-21} = \frac{\Delta L}{L} \rightarrow 10^{-21} = \frac{\Delta L}{1 \text{ m}} \rightarrow \Delta L = BH = 10^{-21}$ m

Un'ulteriore osservazione che possiamo fare è che se lo strain è lo stesso ad ogni distanza, e i due buchi neri si sono scontrati tra loro a 1,3 miliardi di anni luce da noi allora  $A'H' = 1,3 \cdot 10^9$  ly, e poiché  $1 \text{ ly} = 9464$  miliardi di km, ovvero circa  $9,4 \cdot 10^{15}$  m, allora  $A'H' = 1,2 \cdot 10^{25}$ m.

Perciò  $\Delta L = \text{strain} \cdot L = 10^{-21} \cdot 1,2 \cdot 10^{25} \text{m} = 1,2 \cdot 10^4 \text{m} = 12000 \text{m}$ .

In pratica, sulla Terra un'asta lunga 1 m viene deformata di soli  $10^{-21}$ m, ma a un metro dal cataclisma cosmico un'asta di 1 m diventa lunga 12 km, e la Terra, che ha un diametro di 12.756 km, verrebbe deformata fino ad avere un diametro  $12.756 \cdot 12.000 = 153.072.000$  km, più della distanza della Terra dal Sole.



## EQUAZIONI GRAVITAZIONALI DI EINSTEIN:

L'equazione di campo di Einstein è l'equazione fondamentale della teoria della Relatività Generale. Essa descrive la curvatura dello spazio-tempo in funzione della densità di materia, dell'energia e della pressione, rappresentate tramite il tensore energia-impulso, il quale descrive il flusso di energia e quantità di moto associate a un campo.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

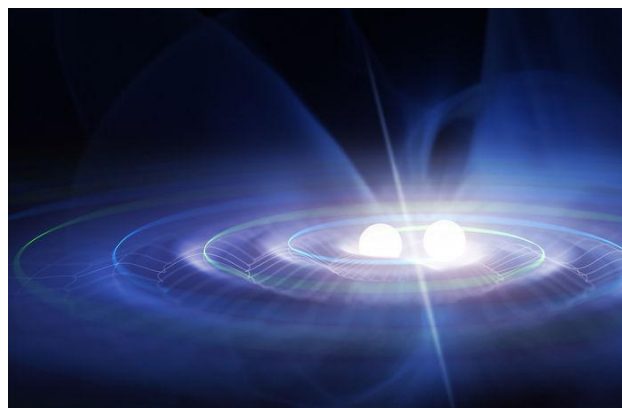
dove:  $R_{\mu\nu}$  è il tensore di curvatura di Ricci,  $R$  la curvatura scalare,  $g_{\mu\nu}$  il tensore metrico,  $\Lambda$  la costante cosmologica,  $T_{\mu\nu}$  il tensore stress – energia,  $c$  la velocità della luce nel vuoto, e  $G$  la costante di gravitazione universale. Le soluzioni di tale equazione sono tensori metrici, cioè prodotti scalari definiti sullo spazio tangente di ogni punto, per cui vengono definiti e studiati gli aspetti inerenti alla curvatura dello spazio. Questa legge fisica dunque ha un carattere tensoriale, per non dipendere dalla scelta del riferimento in cui è formulata, in un uno spazio quadridimensionale dove gli oggetti geometrici che entrano in essa non sono più quelli familiari della Fisica Classica.

I **tensori** sono la generalizzazione di un vettore e si possono esprimere per componenti che si trasformano in modo opportuno in qualunque riferimento purché come ente geometrico restino invariati. Essi sono utilizzati in molti ambiti della fisica, fra cui in particolare l'elettromagnetismo, la meccanica dei fluidi e la meccanica dei solidi per definire lo stato tensio-deformativo in ogni punto di una determinata struttura. Essi sono ampiamente utilizzati anche nella relatività generale, per descrivere rigorosamente lo spaziotempo come varietà quadridimensionale curva. In matematica invece, la nozione di tensore generalizza tutte le strutture definite usualmente in algebra lineare a partire da un singolo spazio vettoriale. Sono particolari tensori i vettori, gli endomorfismi, i funzionali lineari e i prodotti scalari. I tensori sono altresì usati in geometria differenziale per definire su una varietà differenziabile le nozioni geometriche di distanza, angolo e volume, come il tensore di Riemann (che misura la curvatura prendendo in considerazione l'effetto di trasportare parallelo tra due punti lungo due curve) e il tensore di Ricci (che misura la variazione locale del volume rispetto all'usuale volume di uno spazio euclideo, contraendo due indici del tensore di Riemann). Le equazioni di Einstein sono dunque, oltre tensoriali, anche differenziali, ovvero equazioni che legano una funzione incognita alle sue derivate e che possono essere risolte per una distribuzione fisicamente ragionevole di energia-momento, dando soluzioni esatte come le soluzione di Schwarzschild e la soluzione di Friedman-Lemaître-Robertson-Walker.

## L'ASTRONOMIA “MULTIMESSAGGERA” :

L'astronomia multimessaggera è una nuova via di esplorazione dell'universo, che si avvale in combinazione di onde gravitazionali, di fotoni (onde elettromagnetiche) e di neutrini. La sua nascita è stata annunciata il 16 ottobre 2017 a seguito della prima osservazione di un'onda gravitazionale generata dalla fusione di due stelle di neutroni, da parte dell'interferometro dell'INFN e del

CNRS francese, Virgo, nei pressi di Cascina (Pisa), e dei due interferometri statunitensi LIGO. Le stelle di neutroni a differenza dei buchi neri, possono emettere sia segnali elettromagnetici che gravitazionali, e infatti nello stesso istante in cui le onde gravitazionali hanno raggiunto gli interferometri terrestri, decine di



telescopi in tutto il mondo hanno raccolto le corrispondenti radiazioni elettromagnetiche emesse dallo stesso evento. Un momento che si può definire storico, perché ha segnato la nascita di tale astronomia, in cui uno stesso evento astrofisico può ora essere osservato attraverso più messaggeri, che portano informazioni di tipo diverso sul fenomeno, offrendo così un livello di comprensione degli eventi cosmici molto più profondo e dettagliato. Finora l'unica via a disposizione degli astronomi per indagare il cosmo era quella di rilevare e studiare segnali di natura elettromagnetica, come la luce visibile, le onde radio o i più potenti raggi X e raggi gamma emessi dagli oggetti celesti, mentre l'astronomia a onde gravitazionali rappresenta un modo completamente nuovo di osservare il nostro universo: grazie ad esse saremo in grado di indagare, oltre alla formazione ed evoluzione dei buchi neri, delle stelle e delle galassie, il comportamento della materia nelle condizioni estreme di temperatura e pressione come quelle presenti nelle stelle di neutroni e nelle supernove, e si potrebbe vedere, ammesso che esista, una sorta di difetto geometrico nello spazio tempo, le "stringhe cosmiche" previste dalla teoria delle stringhe, che, pur essendo estremamente sottili, sarebbero sorgenti di onde gravitazionali grazie alla loro elevata densità. Il futuro dell'astronomia va dunque inevitabilmente nella direzione di un aumento esponenziale delle nuove scoperte ed osservazioni considerando inoltre che lo studio delle onde gravitazionali potrebbe permetterci di analizzare le onde emesse un trilionesimo di secondo dopo il big bang, fornendoci i primi passi della creazione del nostro universo ed in particolare verificare la teoria dell'inflazione, una fase primordiale di espansione cosmica istantanea che avrebbe "gonfiato" esponenzialmente l'universo di un fattore enorme, raffreddandolo e generando deboli fluttuazioni di densità che daranno vita ai primi ammassi cosmici. LIGO e Virgo, i rivelatori già esistenti, sono al momento in una fase di potenziamento e in altre parti del mondo sono in progettazione rilevatori simili, ma con tecnologie ancora più innovative: tra questi KAGRA, in Giappone, e INDIGO, in India. Senza contare altri due progetti ancora in cantiere ma destinati a rivoluzionare il settore, l'Einstein Telescope, un osservatorio sotterraneo in grado di schermare i segnali dai movimenti sismici, e il progetto dell'Agenzia spaziale europea LISA(Laser Interferometer Space Antenna) formato da tre satelliti che costituiscono un interferometro triangolare con bracci di cinque milioni di Km, in grado, grazie alle sue dimensioni, di rilevare fenomeni gravitazionali causati da eventi cosmici giganteschi avvenuti circa 100 milioni di anni dopo il big-bang. Si punta dunque a realizzare un rivelatore di onde gravitazionali interamente nello spazio, come i due progetti di osservatori spaziali DECIGO (Giapponese) e TianQuin(Cina). Comprendiamo dunque l'importanza di dover studiare sempre più approfonditamente il fenomeno delle onde gravitazionali, le quali sarebbero l'unico messaggero in grado di farci risalire indietro nel tempo fino all'alba dell'universo per carpirne i momenti iniziali, ritrovando le nostre origini.

### **Sitografia e Bibliografia:**

- informazioni reperite dal libro di testo " I problemi della fisica" Vol.3, a cura di Claudio Romeni
- informazioni apprese durante il quinto anno scolastico
- [https://drive.google.com/file/d/13D\\_983H8uOJhII3aSDIRuVafMt8fZ1Zb/view?usp=sharing\\_eil&ts=5eab055a](https://drive.google.com/file/d/13D_983H8uOJhII3aSDIRuVafMt8fZ1Zb/view?usp=sharing_eil&ts=5eab055a)
- <http://www.fmboschetto.it/tde4/frame.htm>
- [https://www.lescienze.it/topics/news/onde\\_gravitazionali-2056122/](https://www.lescienze.it/topics/news/onde_gravitazionali-2056122/)
- [http://www.auriga.lnl.infn.it/auriga/papers\\_src/tesi\\_canton.pdf](http://www.auriga.lnl.infn.it/auriga/papers_src/tesi_canton.pdf)
- <https://home.infn.it/it/comunicazione/comunicati-stampa/3250-la-nuova-astronomia-e-multimessaggera>