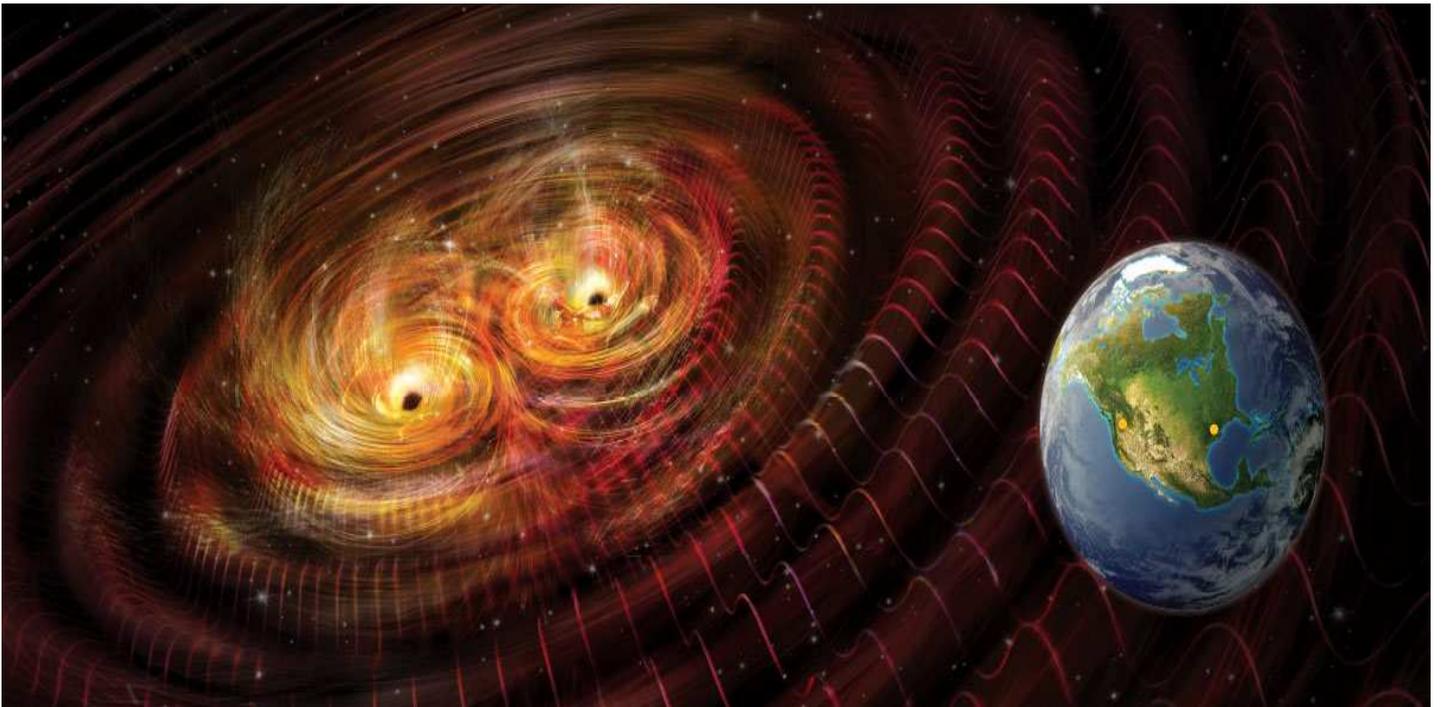


# LE ONDE GRAVITAZIONALI



Nicole Adelaide Medonica

Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Classe 5° D

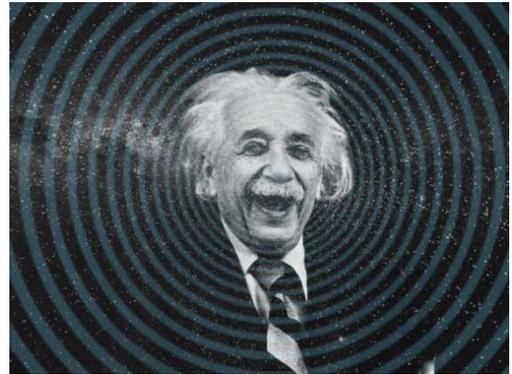
A.S. 2015-2016

*Durante quest'anno scolastico ho potuto approfondire una sezione della scienza che mi affascina molto: l'astrofisica. Ho avuto l'occasione di partecipare ad una **Master Class** sui raggi cosmici al dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia; in seguito a scuola ho frequentato un corso di laboratorio sui rivelatori di raggi cosmici "**Leo, il rivelatore del Liceo**". Il mio interesse per la natura dell'Universo si è incontrato con particolari argomenti di fisica di quest'anno, quali le teorie della relatività, e approfondimenti presentatimi in una **conferenza** sul fisico premio Nobel, Albert Einstein. Le scoperte annunciate nello scorso anno dal progetto americano **LIGO**, hanno completato il quadro di informazioni e curiosità che mi ha permesso di approfondire e sviluppare un argomento tanto misterioso quanto affascinante: le **onde gravitazionali**.*

# INDICE

LA TEORIA DI EISTEIN.....	4
• Come si generano le onde gravitazionali ?.....	5
• Quali sono le difficoltà nella loro ricerca?.....	5
PRIMI ESPERIMENTI.....	6
• Un italiano in prima linea .....	6
• Hulse e Taylor: il Nobel .....	6
GLI INTERFEROMETRI LIGO E VIRGO .....	8
• La registrazione di settembre .....	9
ALTRI INTERFEROMETRI IN COSTRUZIONE.....	10
• KAGRA e l'Einstein Telescope.....	10
• Gli interferometri nello spazio .....	11
THE SOURCES AND TYPES OF GRAVITATIONAL WAVES.....	12
• The Continuous GW .....	13
• The Compact Binary Inspiral GW .....	13
• The Stochastic GW .....	14
• The Burst GW .....	14
TRA FUNZIONALITA' E FANTASCIENZA.....	15
UNA SECONDA CONFERMA .....	16

## LA TEORIA DI EINSTEIN



Il 25 novembre 1915, **Albert Einstein** presentò all'Accademia prussiana delle scienze **un'equazione di campo** che legava tra loro, in modo apparentemente bizzarro, la velocità della luce, la forza gravitazionale e la geometria dello spazio-tempo (cioè la *struttura* a quattro dimensioni, tre spaziali:  $x, y, z$  e una temporale:  $t$ , di cui sembra essere composto il nostro Universo).

Secondo tale equazione, che è il fondamento della teoria della relatività generale, la forza gravitazionale altro non è se non la manifestazione della curvatura dello spazio-tempo, causata dalle masse che *visono appoggiate*, come su un telo. La Terra, quindi, orbita intorno al Sole non a causa di un'imprescisa forza attrattiva, ma perché si muove in uno spazio-tempo, distorto dalla presenza della stella.

Dal punto di vista matematico, le onde gravitazionali sono un'entità che discende direttamente dalle equazioni di Einstein. Fisicamente, esse vengono definite:

*una perturbazione che si propaga nello spazio-tempo, modificandone la struttura.*

Le onde sono perturbazioni che si allontanano dalla sorgente che le ha prodotte e sono di tipo trasverso, ossia producono cambiamenti nella direzione perpendicolare a quella in cui si propagano. Infatti, durante la loro propagazione, le onde gravitazionali generano *delle forze di marea* che fanno variare la posizione degli elementi che urtano, in particolare di quelli non soggetti a forze esterne.

Per nostra fortuna, *o sfortuna*, le onde gravitazionali che giungono sulla Terra non producono deformazioni apprezzabili.

## Come si generano le onde gravitazionali?

In base alla teoria di Einstein, ogni corpo dotato di massa (una stella o un buco nero, per esempio) emette una **radiazione gravitazionale**, che si propaga sotto forma di onde gravitazionali. Per essere ancora più precisi, le onde gravitazionali sono prodotte ogni volta che c'è una **massa in accelerazione**, che cambia la struttura locale dello spazio-tempo.

Esse vengono generate in continuazione, anche adesso, nell'atto di sfogliare queste pagine. Tuttavia, l'ampiezza di queste onde sulla Terra è generalmente infinitesimale.

Gli oggetti astrofisici in grado di produrre onde gravitazionali rivelabili devono essere estremamente massicci e, per potersi muovere ad alta velocità, devono essere anche molto compatti. Candidati ideali di questo tipo sono **stelle di neutroni** e **i buchi neri**, in prossimità dei quali la curvatura dello spazio tempo raggiunge i più alti valori possibili.

## Quali sono le difficoltà nella loro ricerca?

Poiché fenomeni violenti nella nostra galassia e nell'Universo sono frequenti, i fisici ipotizzano di poter essere sempre immersi in un mare di onde gravitazionali. A questo punto, si delineano **due problematiche** che delimitano le nostre ricerche.

Il primo problema consiste nell'aver a disposizione *strumenti molto precisi*. Analogamente alle increspature di un sasso che cade in un stagno, le onde gravitazionali perdono molta energia durante la loro propagazione nello spazio. Per rilevare la presenza di un'onda, infatti, lo strumento deve essere in grado di riconoscere modifiche di lunghezze dell'ordine di  $10^{-23}$  metri.

Il secondo limite che coinvolge lo studio delle onde, è caratteristico di tutte le osservazioni svolte sull'Universo: *il tempo*. Le ricerche sviluppate dagli scienziati prevedono lo studio di fenomeni accaduti milioni di anni fa, che solo oggi, attraverso opportuni strumenti, possono essere rilevati ed interpretati. Inoltre, i processi di affinamento delle tecniche impiegate, accrescono i tempi d'attesa delle indagini in corso.

## PRIMI ESPERIMENTI

Nel corso del secolo scorso, gli scienziati hanno tentato diversi approcci alla rivelazione delle onde gravitazionali.

### Un italiano in prima linea

Fin dal 1971 Edoardo Amaldi si propose di esplorare questa possibilità mediante una “antenna gravitazionale risonante” cioè un cilindro di grande massa che può essere messo in oscillazione dal passaggio di un’onda di gravità. Per questo diede vita, presso il Dipartimento di Fisica dell’Università di Roma, a un gruppo di ricerca che fu la base dell’attuale Centro Interuniversitario di Ricerche sulla gravitazione, detto, appunto, “*Edoardo Amaldi*”.

In questo caso, il segnale da raccogliere era disturbato da **rumori esterni**, sia dovuti alla stessa agitazione termica del materiale di cui l’antenna è fatta, sia provenienti da agenti estranei al fenomeno ( traffico, eventi microsismici, anche il semplice calpestio dei ricevitori). I primi esperimenti non diedero il risultato sperato.

Dalla scomparsa di Amaldi, in suo onore, le conferenze internazionali biennali che si occupano di onde gravitazionali si chiamano “Edoardo Amaldi International Symposia on Gravitational Waves”.

### Hulse e Taylor: il Nobel

Nel 1974, gli astronomi americani Hulse e Taylor osservarono il moto della stella pulsar **PSR1913+16\***, appartenente a un sistema stellare binario scoperto con un radiotelescopio a Portorico. (Una pulsar è una sorta di radiofaro stellare: una stella di neutroni capace di compiere ogni secondo fino a 1.000 giri su stessa, emettendo onde radio in direzioni ben definite.)

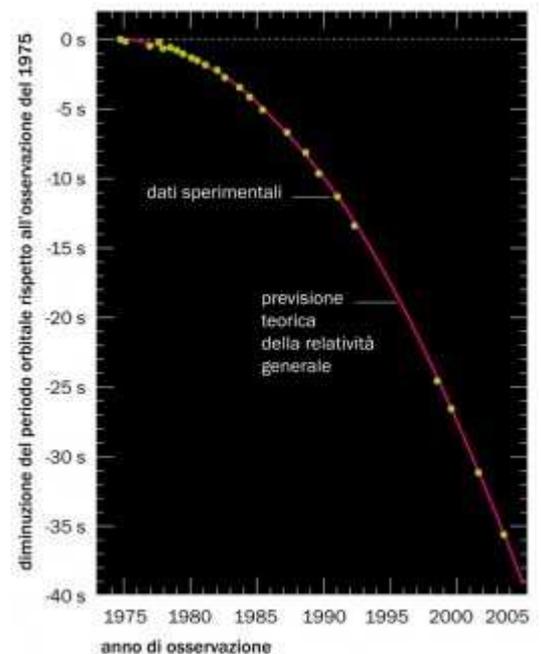
A periodi regolari, la PSR1913+16 emetteva segnali anche nella nostra direzione. Tra tutte le pulsar scoperte da Hulse e Taylor, la frequenza dell’emissione di onde radio da parte della PSR1913+16 mostrava **alcune anomalie** rispetto alle altre pulsar allora note.

Il singolare comportamento poteva essere spiegato solo ammettendo che la stella orbitasse *intorno a una compagna*, anch'essa probabilmente una stella di neutroni, perdendo energia e rallentando. Per un sistema binario come quello della PSR1913+16, la teoria della relatività generale prevede una considerevole emissione di onde gravitazionali, ancora troppo bassa per essere rivelata direttamente sulla Terra. I suoi effetti, tuttavia, diventano evidenti osservando l'orbita della pulsar. Sapendo che questa scoperta poteva essere usata per testare le previsioni audaci di Einstein, gli astronomi iniziarono a misurare come il periodo delle orbite stellari cambiasse nel tempo.

Dopo otto anni di osservazioni, essi notarono che l'emissione di onde gravitazionali, riduceva l'energia del moto orbitale: le due stelle *tendevano ad avvicinarsi* l'una all'altra di alcuni metri l'anno e la periodicità degli impulsi radio diminuiva di una quantità che, ancora oggi, possiamo misurare.

Fu questa la scoperta del primo sistema binario di stelle di neutroni, che valse a Hulse e Taylor il premio Nobel per la fisica nel 1993.

*Nel grafico della figura, la diminuzione è stata registrata lungo un intervallo di circa trent'anni. Per ogni anno di osservazione è riportata la diminuzione del tempo necessario per una rotazione orbitale della pulsar binaria: questo è calato nel corso degli anni di 40 secondi (i punti nel grafico). La curva continua rappresenta i risultati della previsione teorica, calcolati nell'ipotesi che la variazione nella rotazione sia dovuta all'emissione di onde gravitazionali. Come si può vedere, le misure sperimentali si adagiano perfettamente sulla curva teorica e, a buon diritto, l'osservazione della PSR1913+16 rappresenta **la prima prova sperimentale indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali.***



\*Il sistema binario PSR1913+16 si trova a 1.500 anni luce da noi (circa 15 milioni di miliardi di chilometri) nella costellazione dell'Aquila.

PSR significa pulsar.

Le cifre seguenti sono le coordinate celesti: 19 ore e 13 minuti di ascensione retta e 16 gradi di declinazione. La conoscenza della sigla consente agli astronomi di riconoscere il tipo di oggetto celeste e di sapere dove puntare i telescopi per osservarlo.

# GLI INTERFEROMETRI LIGO E VIRGO



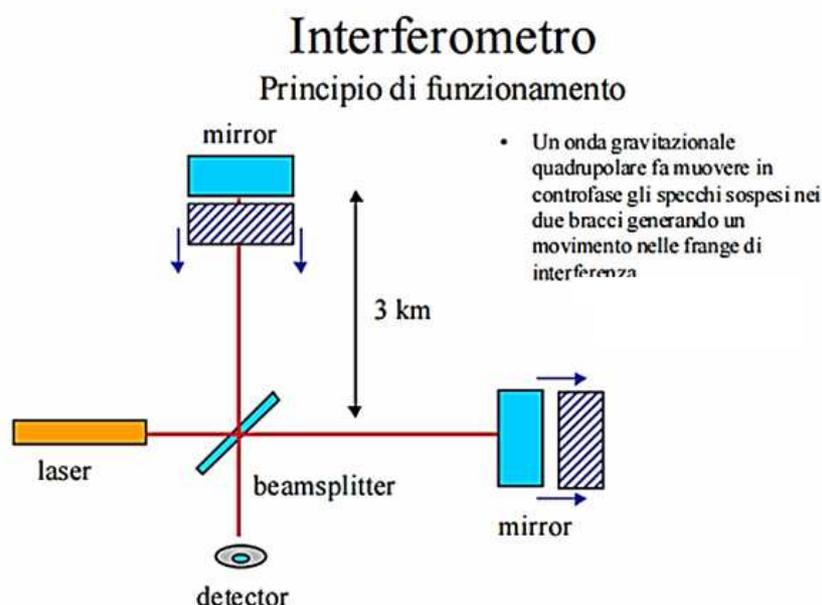
La ricerca sperimentale degli ultimi anni ha sviluppato due punti di forza:

- **LIGO** (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) la cui costruzione iniziò nel 2002, sponsorizzato con 620 milioni di dollari dalla National Science Foundation. Si trova a Livingston (USA).
- **VIRGO** che si trova nel comune di Cascina (Pisa) che è frutto della collaborazione italo-francese tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e il Centre National de la Recherche Scientifique.

I due interferometri sono simili, nella concezione, allo strumento ideato dagli scienziati *Michelson e Morley* all'inizio del novecento.

VIRGO è composto da *due bracci ortogonali* lunghi ciascuno 3 km, in cui è creato il vuoto. La luce emessa da apparecchi laser estremamente stabili percorre i bracci compiendo riflessioni multiple, per un cammino di 120 km complessivi. Al **passaggio** dell'**onda** gravitazionale, le variazioni di lunghezza d'onda sono diverse per i due bracci e, così, **la figura di interferenza** generata dai raggi laser **cambia**, segnalando l'evento e misurandone caratteristiche quali l'intensità e la durata.

LIGO è attivo negli Stati Uniti e utilizza due rivelatori simili a VIRGO (con bracci di 4 km) uno situato a Hanford Site (Washington) l'altro a Livingston (Louisiana)



*“Previste dalla Teoria della Relatività Generale di Albert Einstein, divulgata esattamente 100 anni fa, le onde gravitazionali sono finalmente state catturate. La probabilità che vi sia un errore è di una su 3 milioni e mezzo, ciò significa che i risultati hanno una certezza 5,1 sigma (sigma è un parametro utilizzato dai fisici per indicare la maggiore o minore certezza dei dati a disposizione), la stessa con la quale si annunciò l’esistenza del Bosone di Higgs. Questo vuol dire che la probabilità di essere certi della scoperta è superiore al 99,9 per cento.”*

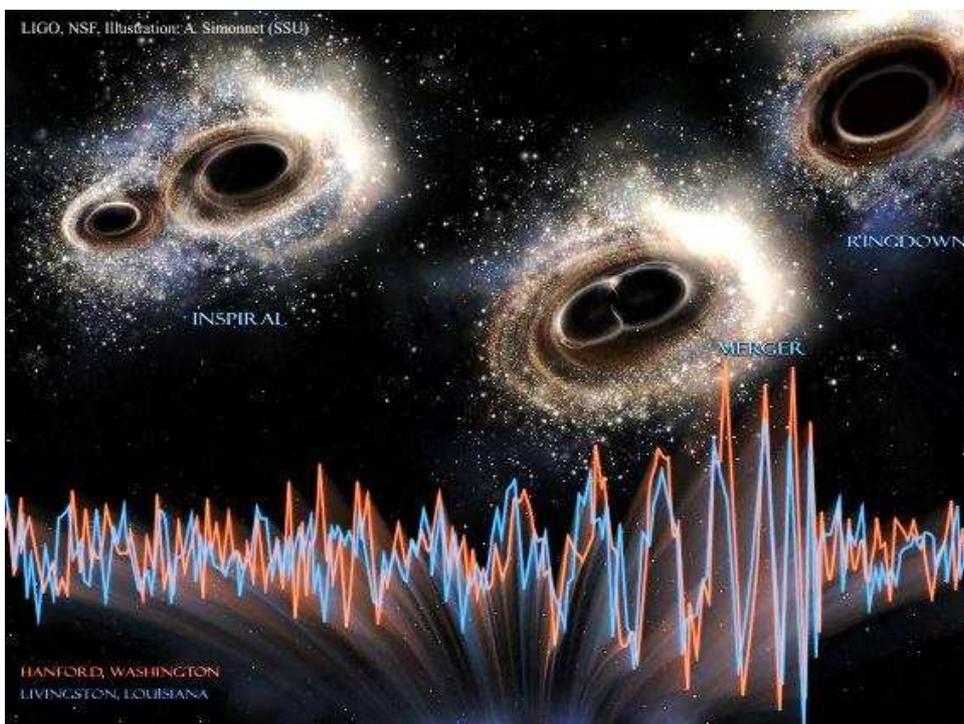
*[focus, 12 FEBBRAIO 2016 | LUIGI BIGNAMI ]*

## LA REGISTRAZIONE DI SETTEMBRE

Le onde gravitazionali sono state rivelate il *14 settembre 2015*, alle 10:50:45 ora italiana, da LIGO entro una finestra temporale di 10 millisecondi.

Le onde gravitazionali rivelate sono state prodotte nell’ultima frazione di secondo del processo di fusione di due buchi neri, di massa equivalente a circa **29 e 36 masse solari**, in un unico buco nero ruotante più massiccio di circa 62 masse solari: le 3 masse solari mancanti al totale della somma equivalgono all’energia emessa durante il processo di fusione dei due buchi neri, sotto forma di onde gravitazionali.

I due buchi neri, prima di fondersi, hanno spiraleggiato, per poi scontrarsi a una velocità di circa 150.000 km/s, la metà della velocità della luce.



*Un'illustrazione del balletto e poi della fusione dei due buchi neri.*

*Il processo di fusione dei due buchi neri responsabile delle onde gravitazionali rivelate è un evento accaduto a 410 megaparsec da noi, e risale quindi a 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. Simulazione dell'evento registrato da LIGO a cura del Simulating Xtreme Spacetimes (SXS) Project : [https://youtu.be/I\\_88S8DWbcU](https://youtu.be/I_88S8DWbcU)*

## ALTRI INTERFEROMETRI IN COSTRUZIONE

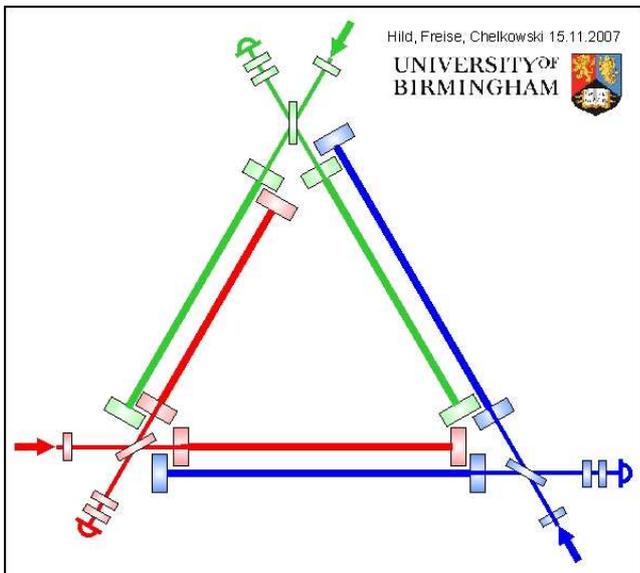
I ricercatori stanno progettando e costruendo *una nuova generazione* di rivelatori ancora più **grandi e isolati**, nelle **profondità** della Terra, dove centinaia di metri di roccia sovrastante fanno da schermo alla maggior parte dei rumori e alle sollecitazioni sismiche.

Nella miniera di Kamioka in Giappone, *il Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA)* sta prendendo forma: gli operai stanno realizzando i bracci gemelli da tre chilometri nelle gallerie appena scavate.



Una volta in funzione (secondo le previsioni nel 2018) KAGRA, grazie ai suoi **specchi di zaffiro** raffreddati criogenicamente, raggiungerà la sensibilità di LIGO.

**L'Einstein Telescope**, un interferometro laser sotterraneo ancora più ambizioso, progettato da un consorzio di partner europei, potrebbe entrare in funzione alla fine



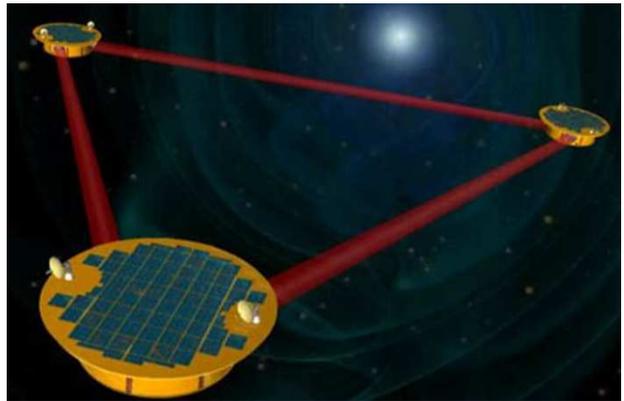
degli anni 2020, con un costo compreso tra uno e due miliardi di dollari. Anche se attualmente non c'è un sito di costruzione, il suo progetto concettuale prevede due linee di fascio criogeniche e una a temperatura ambiente che percorrono tre bracci di 10 chilometri disposti a forma di triangolo equilatero. Questa configurazione potrebbe permettere di individuare le sorgenti di onde gravitazionali nel cielo e di vedere increspature di una lunghezza d'onda più ampia da una maggiore varietà di

sorgenti. Tra cui *lenane bianche binarie, pulsar a lenta rotazione e buchi neri di massa intermedia*, cioè pari a centinaia o migliaia di masse solari.

## Gli interferometri nello spazio

Galleggiando liberamente nello spazio profondo, lontano dai rumori e dalla gravità della Terra, tali strutture potrebbero avere bracci di qualsiasi lunghezza. In pratica, i progettisti di possibili future missioni sono alle prese con la grande complessità ingegneristica di questi ambiziosi veicoli spaziali. Queste limitazioni hanno costretto i loro progetti a prevedere bracci con lunghezze di "soli" milioni di chilometri.

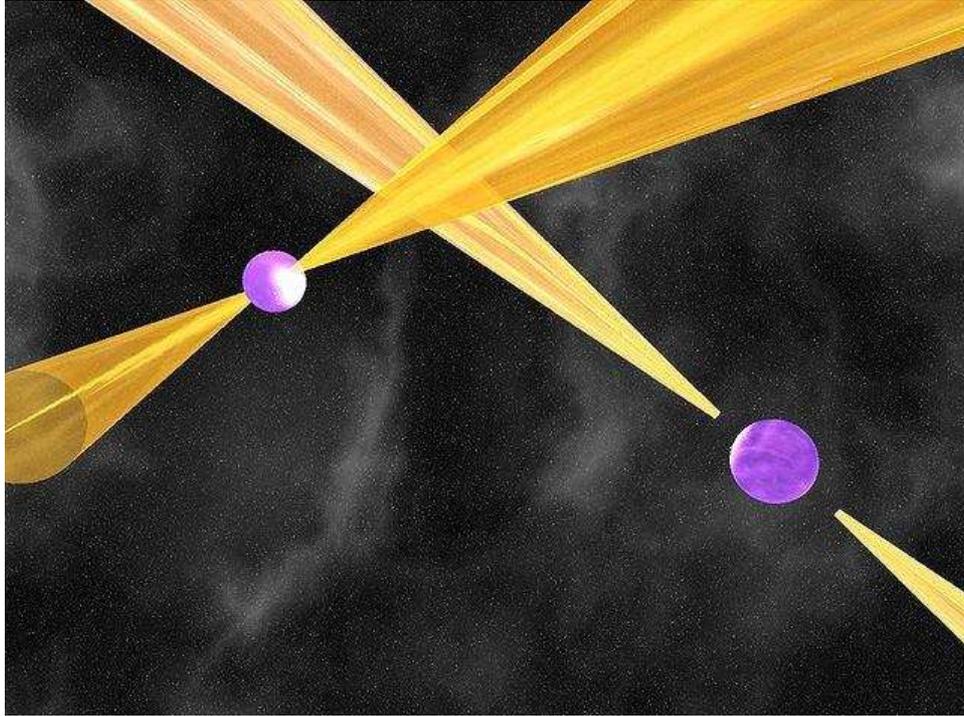
Nello scorso decennio, la NASA e l'Agenzia spaziale europea (ESA) hanno collaborato allo sviluppo del *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA), una costellazione di tre satelliti che formerebbero un interferometro triangolare con bracci di **5 milioni di chilometri**. Nel 2011, tuttavia, la NASA ha abbandonato il progetto a causa del suo costo elevato e della riduzione dei finanziamenti all'agenzia.



L'ESA ha ristrutturato e ridimensionato il progetto, che è diventato "**eLISA**", una "evoluzione" del progetto con **tre satelliti** disposti lungo bracci di un milione di chilometri che potrebbe partire a metà dei prossimi anni trenta. Il precursore di eLISA è stato lanciato dall'ESA nel dicembre scorso, nel quadro di una missione di sviluppo tecnologico denominata LISA Pathfinder.

Nel frattempo, altri ricercatori stanno cercando di sviluppare tecnologie di interferometria spaziale alternative.

*“Indipendentemente dalla tecnica interferometrica usata -dice Paul McNamara,scienziato del progetto LISA Pathfinder dell'ESA - il ricorso a un interferometro spaziale non è mai stato in dubbio[...] Esso ci permetterebbe di guardare gli eventi più grandi e più violenti dell'universo e mappare l'intera storia delle fusioni in una enorme fetta del tempo cosmico... Ciò che è **in dubbio** è se sia possibile costruire uno strumento che misuri con **un'accuratezza al picometro su milioni di chilometri**”.*

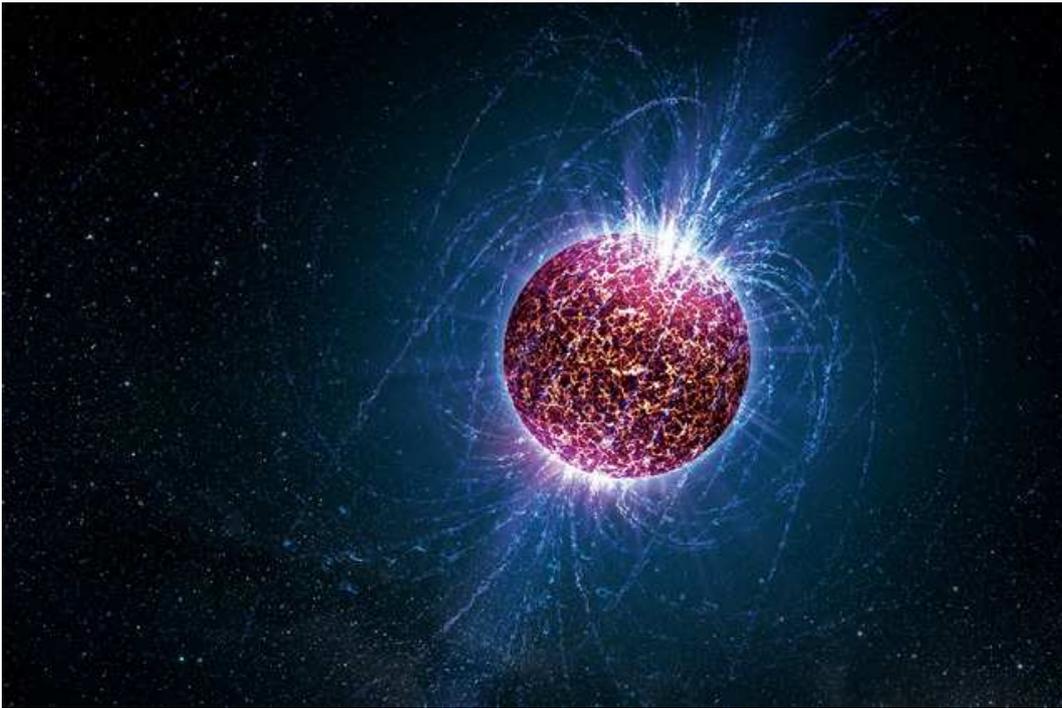


*Artist's impression of a binary pulsar system. (Michael Kramer, Jodrell Bank, University of Manchester)*

## SOURCES AND TYPES OF GRAVITATIONAL WAVES

Since we can't generate detectable gravitational waves on Earth, the only way to study them is to look to the places in the Universe where they are generated by nature. In order to understand the types of gravitational waves these objects may produce, LIGO scientists have defined **four categories** of gravitational waves, each with a unique “fingerprint” or characteristic vibrational signature that the **interferometers** can sense and researchers look for in LIGO's data.

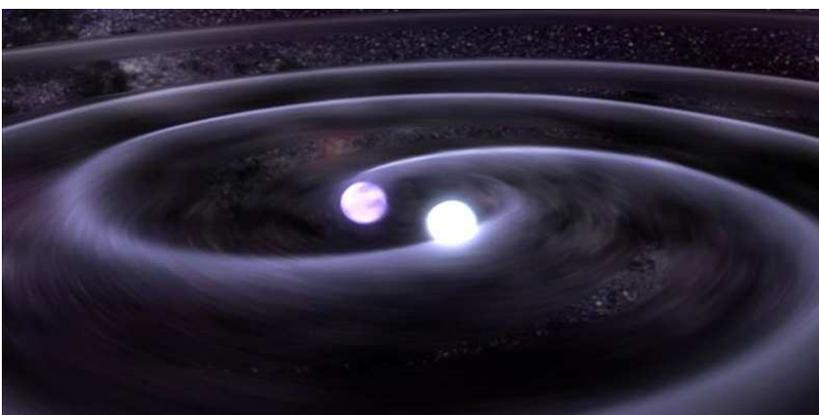
## The Continuous Gravitational Waves



*Artist's depiction of a super dense and compact neutron star (Casey Reed/Penn State University)*

Continuous gravitational waves are produced by a **single spinning massive object**, like an extremely dense star called a neutron star. Any bumps or imperfections in the spherical shape of this star will generate gravitational waves as the star spins. If the spin rate of the star stays constant, so too do the properties of the gravitational waves it emits. That is, the gravitational wave is *continuously* the same frequency and amplitude (like a singer holding a single note), hence, “Continuous Gravitational Wave”.

## The Compact Binary Inspiral Gravitational Waves



Compact binary inspiral gravitational waves are produced by **orbiting pairs of massive and dense** "compact" objects like white dwarf stars, black holes, and neutron stars.

There are three kinds of "compact binary" systems in this category of gravitational wave generators:

- Binary Neutron Star (neutron star-neutron star) or **BNS**
- Binary Black Hole (black hole-black hole) or **BBH**
- Neutron Star-Black Hole Binary or **NSBH**

Each binary pair generates a characteristic series of gravitational waves, but the mechanism of wave-generation is the same across all three; it's called, "inspiral".

Inspiral occurs over *millennia* as pairs of these dense compact objects revolve around each other. As they orbit, they send off gravitational waves, which *remove some of the system's orbital energy* (energy which keep them from colliding). Over eons, as the objects revolve and lose this energy, they inch closer and closer together. Unfortunately, moving closer causes them to orbit each other faster, which causes them to emit more and stronger gravitational waves.

This process sets off an unstoppable sequence of events at the end of which the two objects will **collide**, causing one of the Universe's most cataclysmic events. This is why the process is called "Inspiral". Compact Binary Inspiral Gravitational waves are characteristically short in duration and increase in frequency as the stars orbit ever-faster.

## The Stochastic Gravitational Waves

Astronomers predict that there are few significant sources of continuous or binary inspiral gravitational waves in the Universe that LIGO doesn't worry about.

However, we do know that many small gravitational waves are passing by from all over the Universe all the time, and that they are **mixed together at random**. These small waves from every direction make up what we call a "Stochastic Signal"; the word 'stochastic' means having a random pattern that may be analyzed statistically but may **not be predicted** precisely. These will be the smallest (quietest) and most difficult gravitational waves to detect but it is possible that at least part of this stochastic signal may originate **from the Big Bang**.

## The Burst Gravitational Waves

The search for "burst gravitational waves" is truly **a search for the unexpected**—both because we've never detected them directly before, and because there are still so many unknowns that we really don't know what to expect or what we might find. Sometimes we don't know enough about the physics of a system to predict how gravitational waves from that source will appear. We also expect to find gravitational waves from systems we never knew about before. To search for these kinds of

gravitational waves, we cannot assume that they will have well defined properties like the continuous and compact binary inspiral signals do. This means we cannot restrict our analyses to searching only for the signatures of gravitational waves that scientists have predicted. Searching for burst gravitational waves is an exercise in being utterly **open-minded**. For these kinds of gravitational waves, scientists must maintain an ability to recognize a noticeable pattern of signals, even when such a signal **has not been predicted or modeled** before. If you don't know what you're looking for, it's really hard to find it! While this makes searching for burst gravitational waves difficult, detecting them has the greatest potential to reveal revolutionary information *about the Universe* that we may never have learned any other way.

([www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu))

## TRA FUNZIONALITÀ E FANTASCIENZA

L'utilizzo delle onde gravitazionali apre una nuova finestra sull'Universo. Fino ad oggi lo abbiamo studiato all'infrarosso, nella luce visibile, nella luce ultravioletta e alle alte energie come raggi x e raggi gamma, anche attraverso le onde radio. Ora potrebbe iniziare l'era delle onde gravitazionali. Con esse si potrebbero studiare fenomeni non visibili con altri strumenti. La massima aspirazione potrebbe essere **lo studio del Big Bang**.

La luce e altre radiazioni, infatti, iniziarono ad emergere solo 300.000 anni dopo il Big Bang, ma con le onde gravitazionali si potrebbe andare a ridosso della "grande esplosione" scoprendo cose che oggi neppure ci immaginiamo.

Le onde gravitazionali interagiscono molto debolmente con la materia; per far un esempio, un'onda gravitazionale che attraversasse il sole perderebbe soltanto una parte su  $10^{16}$  della sua energia. Proprio questa debole interazione con la materia rende le onde gravitazionali strumenti di importanza straordinaria per la ricerca astronomica e cosmologica. Per esempio, un'onda gravitazionale che passasse attraverso il Sole e che fosse, in un giorno lontano, rilevata sulla Terra potrebbe fornire una specie di **"radiografia" dell'interno del Sole**.

**Far Star** (letteralmente *stella lontana*) è il nome di una astronave descritta nel libro *L'orlo della Fondazione* e poi nel suo seguito *Fondazione e Terra*, libri di fantascienza appartenenti al ciclo della Fondazione di **Isaac Asimov**.

Il nome *Far Star* le è assegnato per alcune caratteristiche peculiari, tra cui il **motore "gravitazionale"**, in grado cioè di muovere l'astronave sfruttando il campo gravitazionale galattico (e quindi eliminando la necessità di trasportare carburante).

## UNA SECONDA CONFERMA

Le onde gravitazionali arrivate sulla Terra il 14 settembre 2015 e rivelate dagli interferometri laser americani LIGO non erano un fenomeno isolato. Tre mesi dopo, il 26 dicembre, quelle stesse antenne hanno registrato un nuovo passaggio delle perturbazioni dello spazio-tempo.

La scoperta, annunciata lo scorso 16 giugno, afferma che le onde gravitazionali ricettate, sarebbero state emesse dalla fusione di due buchi neri, avvenuta *1,4 miliardi di anni fa*. Questi ultimi, rispettivamente di 14 e 8 masse solari, hanno spiraleggiato prima di precipitare uno nell'altro, formando un nuovo *black hole* pesante come 21 soli. La massa solare mancante è proprio l'energia liberata nel processo di fusione sotto forma di onde gravitazionali.

*“Mi piacerebbe vedere il volto di **Einstein** nel leggere l’articolo che abbiamo appena divulgato. Credo sarebbe strabiliato, come lo siamo noi adesso, perché esso è la prova che quest’incredibile scoperta, il campo gravitazionale, si trova nelle sue equazioni. Per me è accaduto un **miracolo**. Il pensiero dello scienziato e anche l’**eleganza**, non solo della sua teoria ma di tutti i suoi esperimenti, credo siano stati un tentativo umano di cui ognuno dovrebbe essere **fiero**.”*

Rainer Weiss, professore di Fisica al MIT di Boston e co-fondatore del progetto LIGO.

## **Bibliografia**

Ugo Amaldi, *L'Amaldi per I licei scientifici- induzione e onde elettromagnetiche, relatività e quanti con Physics in English*

## **Sitografia**

[www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)

[www.fisica.unipg.it](http://www.fisica.unipg.it)

[www.fmboschetto.it](http://www.fmboschetto.it)

[www.focus.it](http://www.focus.it)

[www.lescienze.it](http://www.lescienze.it)

[www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)

[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

[www.repubblica.it](http://www.repubblica.it)

[www.space.com](http://www.space.com)