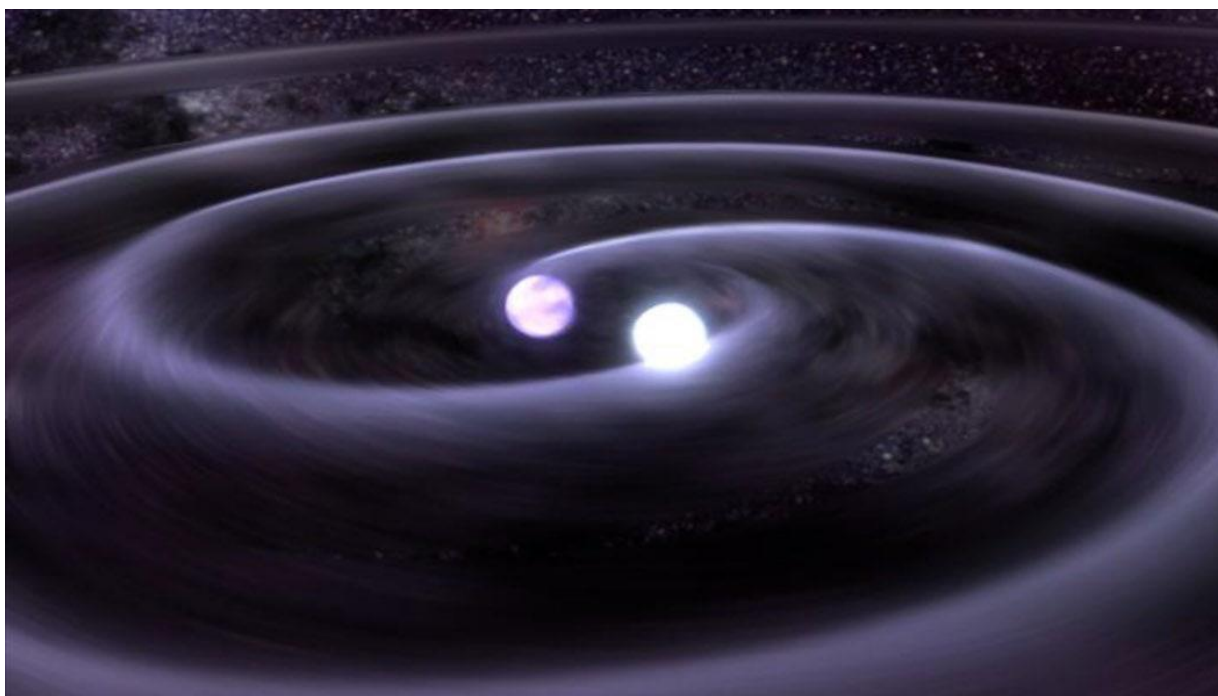


# ONDE GRAVITAZIONALI

## la musica dell'universo



### ***Introduzione***

Alla base di ogni disciplina scientifica vi è l'osservazione. La necessità di osservare l'universo, per entrare in possesso di nozioni sempre più complesse e articolate e per conoscere sempre di più il cosmo in cui ci troviamo, ha accompagnato l'uomo sin dall'origine dei tempi. Questo bisogno di risposte lo ha spinto alla ricerca di nuovi fenomeni da cui trarre insegnamento, costruendo strumenti che gli permettano di scrutare sempre più cose, sempre più lontano. In questo contesto fondamentali sono i grandi progressi compiuti dall'astronomia, che procede di pari passo all'evolversi della tecnologia. Infatti, prima degli anni '50 si poteva investigare solamente lo spettro visibile, e oggetti come quasar, pulsar o buchi neri erano totalmente sconosciuti. Solo dopo lo sviluppo di strumenti più potenti, verso la metà degli anni '60 questi elementi poterono essere individuati.

Ma se ci fosse un modo per vedere tutto l'universo, e non soltanto la piccola porzione offerta dalla luce stellare? Se si potesse entrare in possesso delle informazioni di qualsiasi oggetto nel cosmo, semplicemente analizzando l'impronta che lascia sullo spaziotempo?

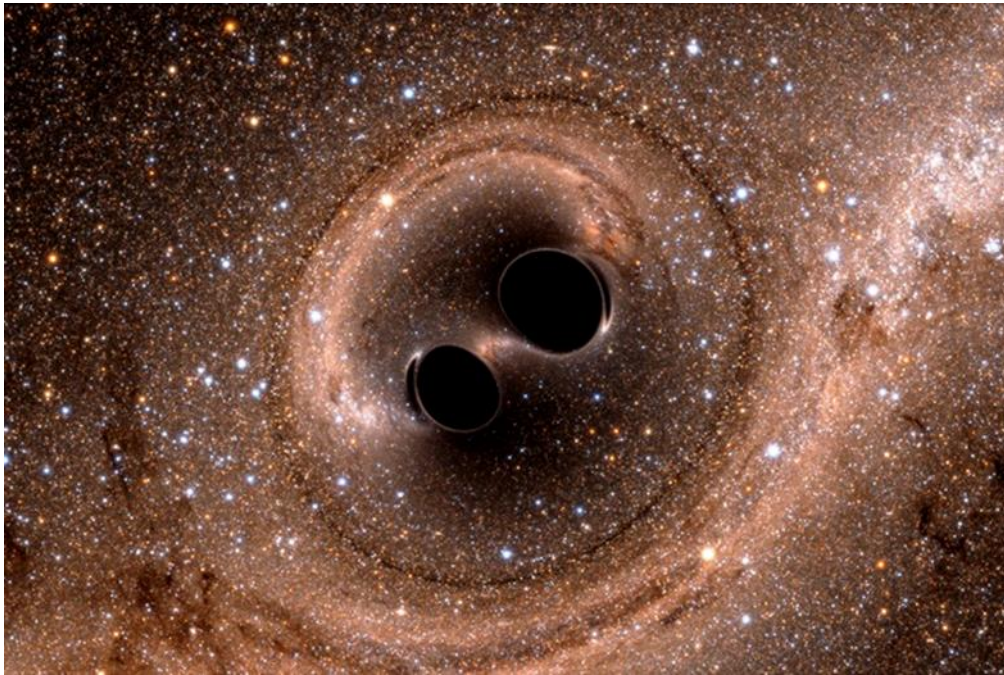
Si parla in questo caso di onde gravitazionali. Esse rappresentano niente meno che un'increspatura dello spaziotempo, che la relatività generale afferma essere emesse da tutti i fenomeni astrofisici.

L'astrofisico genovese Roberto Pesce ha parlato

*delle ultime novità in merito alle onde gravitazionali come causa di quello che è stato definito "il respiro dell'Universo"*

### **1,3 miliardi di anni fa...**

Due buchi neri stavano vivendo gli ultimi istanti della loro vita da separati.



Il 14 settembre del 2015 due rivelatori gravitazionali del progetto Ligo-Virgo, posizionati sulle due coste degli Stati Uniti, hanno captato per la prima volta un'onda gravitazionale.

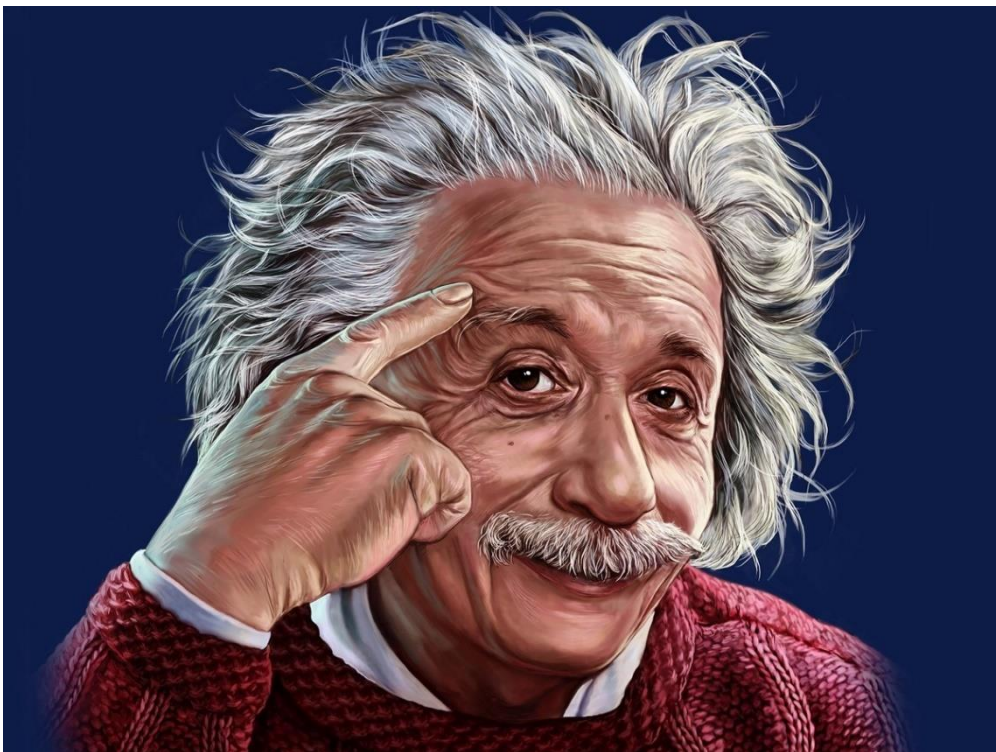
Le analisi del segnale hanno mostrato che era stato prodotto dalla collisione tra due buchi neri con una massa rispettivamente di 29 e 36 volte più grande di quella del sole e si erano fusi in un singolo buco nero di 62 masse solari. I due buchi neri, prima di fondersi, hanno spiraleggiato, per poi scontrarsi a una velocità di circa 150.000 km/s, la metà della velocità della luce.

In pochi decimi di secondo, una massa tre volte più grande di quella del Sole era stata completamente convertita in energia ed irradiata sotto forma di onde gravitazionali ovvero perturbazioni, "ripples" ("increspature") dello spazio-tempo, che si erano propagate nell'universo alla velocità della luce. Il segnale risale 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.

Questo cataclisma, che ha prodotto il segnale di onde gravitazionali, è avvenuto in una galassia distante dalla Terra più di un miliardo di anni luce. Le collaborazioni Ligo-Virgo hanno stimato che il picco di potenza irradiata in onde gravitazionali durante il momento finale della fusione dei buchi neri sia stata 10 volte maggiore della potenza luminosa di tutte le stelle e galassie dell'universo visibile messe insieme. Questa scoperta eccezionale segna l'inizio di una nuova eccitante era per l'astronomia in quanto apriamo una nuova finestra sull'universo, all'insegna delle onde gravitazionali.

L'annuncio della scoperta fu dato l'11 febbraio del 2016 e poco più di un anno dopo tre fisici della collaborazione Ligo-Virgo, Rainer Weiss, Kip S. Thorne, Barry C. Barish sono stati premiati con il Nobel per la Fisica.

### ***Ma tutto nasce da un'intuizione...***



Albert Einstein predisse l'esistenza delle onde gravitazionali nel 1916, come conseguenza della sua teoria della Relatività Generale, pubblicata nel 1915.

Con la Relatività Generale, la gravità non è più una forza invisibile e istantanea tra due corpi, che attrae gli oggetti l'uno verso l'altro, come Newton aveva previsto con la legge di gravitazione universale. Fino a quel momento si sosteneva che la gravità era una forza e due masse ad una certa distanza si attraggono proprio per il fatto di possedere una massa. Einstein aveva capito che la gravità era legata al concetto di spazio e di tempo. Risulta così essere una curvatura o una

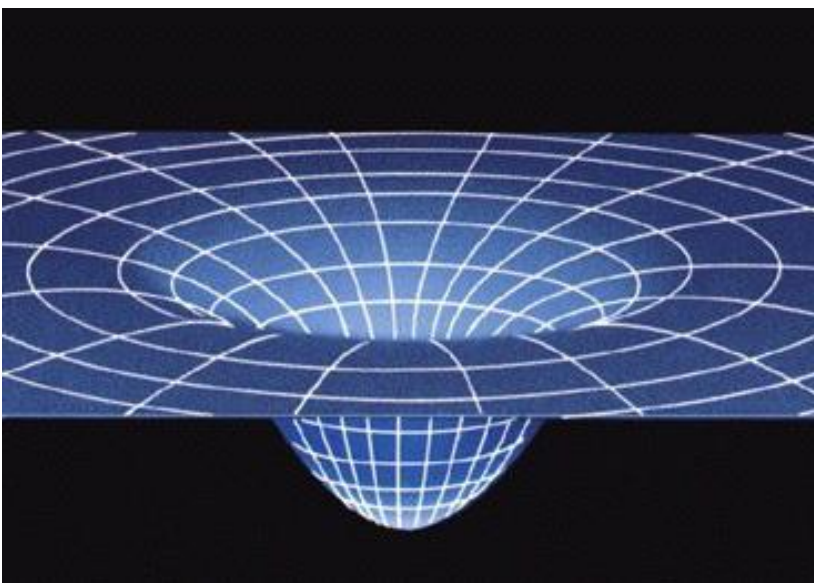
deformazione dello spazio-tempo. Più un oggetto è massiccio, più deforma lo spazio. Ad esempio, il Sole è abbastanza massiccio da deformare lo spazio-tempo attraverso il nostro sistema solare, di conseguenza, la Terra e gli altri pianeti si muovono in percorsi curvi (orbite) attorno ad essa.

Questa è una vera rivoluzione, un cambio di paradigma. Einstein interpreta la gravità come un aspetto geometrico dell'universo, legato alla sua curvatura; riuscì a sostituire il concetto millenario di gravità come forza di attrazione con quello rivoluzionario di curvatura dello spazio-tempo, che vincola il moto di un corpo che in esso cade liberamente.

Questa teoria comporta delle importanti conseguenze sulla nostra visione dell'universo, sull'esistenza o meno dell'energia oscura che accelera l'espansione dell'universo, sulla materia oscura, che regola le orbite delle galassie, sull'esistenza dei buchi neri ed una serie di predizioni, che finora sono state confermate da tutti gli esperimenti e le osservazioni realizzati da fisici e astrofisici.

### ***Le onde gravitazionali sono una conseguenza della gravitazione***

La gravità può essere interpretata come una conseguenza della forma dello spazio-tempo. La presenza di un corpo dotato di massa deforma lo spazio-tempo intorno a sé. Possiamo immaginare la trama dello spazio-tempo come un foglio di gomma. Se vi appoggiamo sopra una massa, il foglio elastico sarà deformato e qualunque cosa si muova su di esso ne seguirà la curvatura.



***“Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve”***

*“la materia dice allo spazio come curvarsi, lo spazio dice alla materia come muoversi”*

John Archibald Wheeler (1911-2008)

In altre parole, una massa di test passando vicino ad un oggetto massiccio seguirà la curvatura dello spazio-tempo, attorno all'oggetto massiccio.

Le onde gravitazionali appaiono quando un evento perturba la curvatura dello spazio-tempo.

Possiamo pensare ad una goccia d'acqua che cade sulla superficie di uno stagno. Essa perturba la superficie dell'acqua e questa perturbazione si propaga verso l'esterno sotto forma di onde. Similmente, se lo spazio-tempo viene perturbato, la perturbazione si propaga alla



velocità della luce ( $\sim 300000$  km/s) sotto forma di onde gravitazionali.

Secondo la Relatività Generale, lo spazio-tempo permea tutto l'universo, viene deformato dai corpi e perturbato da masse in movimento. Lo spazio tempo non sta mai fermo e quindi ci sono continuamente onde gravitazionali che si propagano; tuttavia, sono estremamente deboli e molto difficili da misurare. Solo oggetti straordinariamente densi e in moto a velocità molto grandi possono



produrre effetti misurabili. Di fatto le onde gravitazionali osservabili sono prodotte da oggetti molto compatti come le stelle di neutroni o i buchi neri che ruotano uno attorno all'altro molto rapidamente.



*Scannerizzare per visualizzare un video che raffigura la collisione tra un buco nero e una stella di neutroni*

## Un fumetto per capire meglio

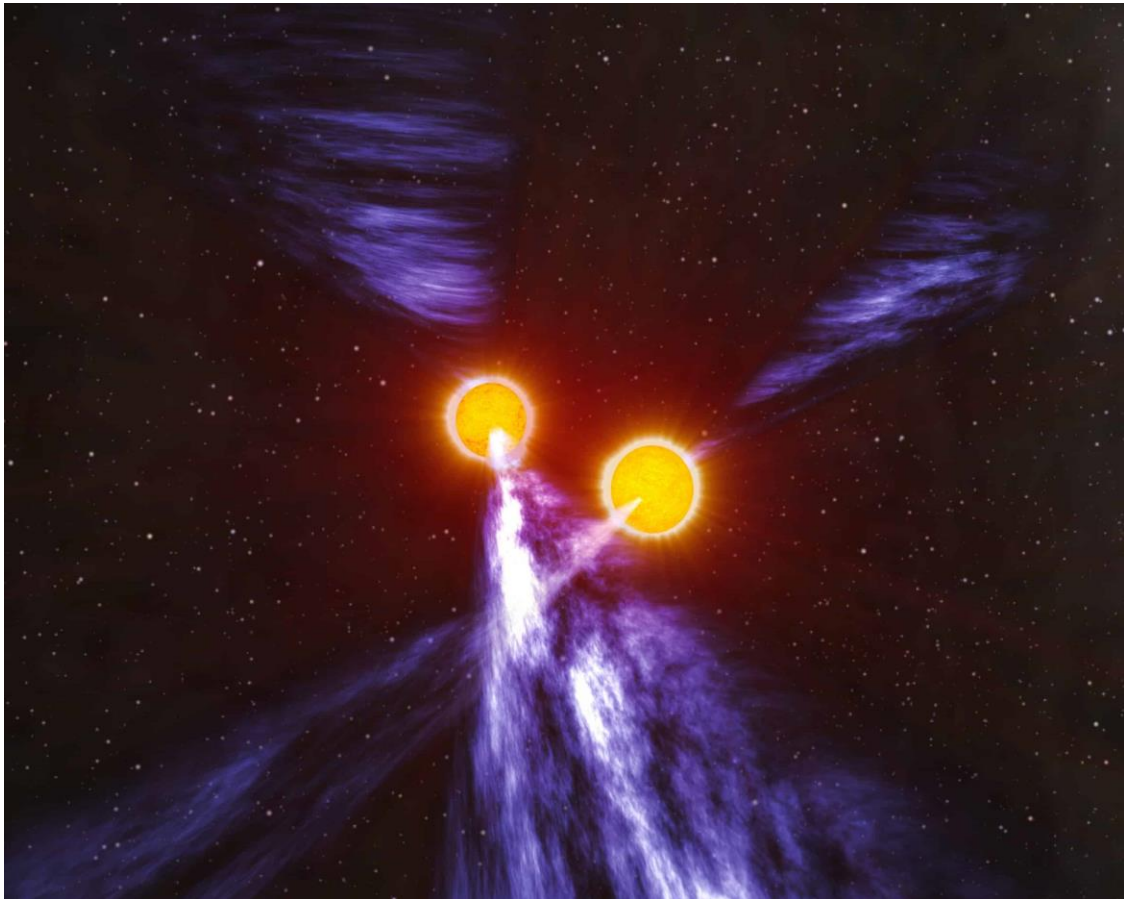


## Un processo che richiede tanto tempo

Sebbene Einstein avesse predetto l'esistenza delle onde gravitazionali nel 1916, la prima prova della loro esistenza arrivò solo nel 1974. In quell'anno, due astronomi, Russell Hulse e Joseph Taylor, utilizzando l'Osservatorio Radio di Arecibo a Porto Rico stavano studiando una pulsar appena scoperta e si accorsero che si stava comportando in modo anomalo.

### ***Ma cosa sono le pulsar?***

Sono stelle straordinariamente dense, in genere una stella di neutroni o una nana bianca, che girano su sé stesse a grande velocità, emettendo un getto di radiazione elettromagnetica stretto e potente, un po' come un faro. Se il getto si trova a puntare nella direzione della terra lungo il suo percorso i radiotelescopi osservano un segnale radio che si ripete periodicamente come una pulsazione molto rapida ed estremamente regolare, da cui il nome Pulsar.



Hulse e Taylor notarono due aspetti importanti: la frequenza della pulsazione variava ciclicamente, questo significava che la pulsar era in orbita intorno ad un altro oggetto in particolare ad una stella di neutroni; poi si accorsero che il sistema perdeva energia con il passare del tempo, un po' come una trottola che rallenta la sua rotazione. In pratica le due stelle che ruotavano rapidamente una intorno all'altra si stavano anche avvicinando, stavano cadendo una sull'altra. I due astronomi calcolarono che la perdita di energia era esattamente quella prevista dalla relatività generale a causa delle emissioni di onde gravitazionali. Per questa scoperta furono premiati con il Premio Nobel per la Fisica nel 1993.

Quindi questa è stata una prima conferma indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali, ma mancava la conferma diretta cioè l'osservazione della deformazione nello spazio tempo, provocata dal passaggio di un'onda.

Il problema è che questa deformazione, secondo le previsioni della relatività generale, è davvero minuscola. Per dare un esempio, le onde gravitazionali generate dalla rotazione tra due buchi neri e dalla loro collisione provocano, al momento del passaggio sulla terra, una variazione della distanza tra due punti dello spazio di una parte su 10 alla meno 21, una parte su mille miliardi di miliardi; come se la distanza tra il sole e la stella più vicina Proxima Centauri cambiasse dello spessore di un capello.

### ***Come mai così tanto tempo per trovarle***

Quando le onde gravitazionali interagiscono con gli strumenti, producono degli effetti piccolissimi. Einstein stesso, dopo aver teorizzato l'esistenza delle onde gravitazionali, fece subito un calcolo per capire se poteva produrre in laboratorio delle onde gravitazionali di ampiezza sufficiente per poter essere misurate. Ma il numero era talmente piccolo che lui stesso lo definì *negligible*, cioè trascurabile.

La difficoltà di riprodurle è legata anche ad una serie di difficoltà teoriche: a quell'epoca gli strumenti matematici stavano arrivando, non erano ancora consolidati da tanto tempo. Inoltre vi erano anche difficoltà di tipo sperimentale nel riprodurre i segnali. Le onde gravitazionali producono effetti piccolissimi quindi era necessario avere degli strumenti estremamente sensibili per poterle captare. Tutto questo processo ha richiesto un avanzamento teorico e anche un grande affinamento delle tecniche sperimentali.



## ***Alla ricerca di onde gravitazionali***

***Barre risonanti:*** inizia la caccia alle onde gravitazionali

Sono dei cilindri di grande massa costruiti con leghe di alluminio o niobio, un materiale superconduttore, che, quando arriva l'onda, immagazzinano una parte dell'energia e risuonano, si mettono in vibrazione, come un diapason quando viene colpito.



L'onda gravitazionale è come un martello che colpisce la barra e la fa vibrare. Bisogna dunque misurare la vibrazione di questo cilindro.

Il primo strumento fu costruito da John Weber, pioniere negli anni 60/70. Le vibrazioni sono piccole, quindi è necessario raffinare lo strumento per isolarlo da tutti i disturbi esterni.

## ***Nautilus***

Le prime barre si sono poi evolute in strumenti più complessi come il Nautilus, una barra di risonanza dei laboratori del CERN, poi trasferita ai Laboratori Nazionali di Frascati LNF.

È un cilindro di due tonnellate, raffreddato a temperature bassissime, un decimo di grado sopra lo zero assoluto.

La bassa temperatura riduce l'agitazione termica, rumore presente in qualunque corpo, e consente di vedere meglio il piccolo segnale e misurarlo.



## Una nuova tecnologia: gli interferometri

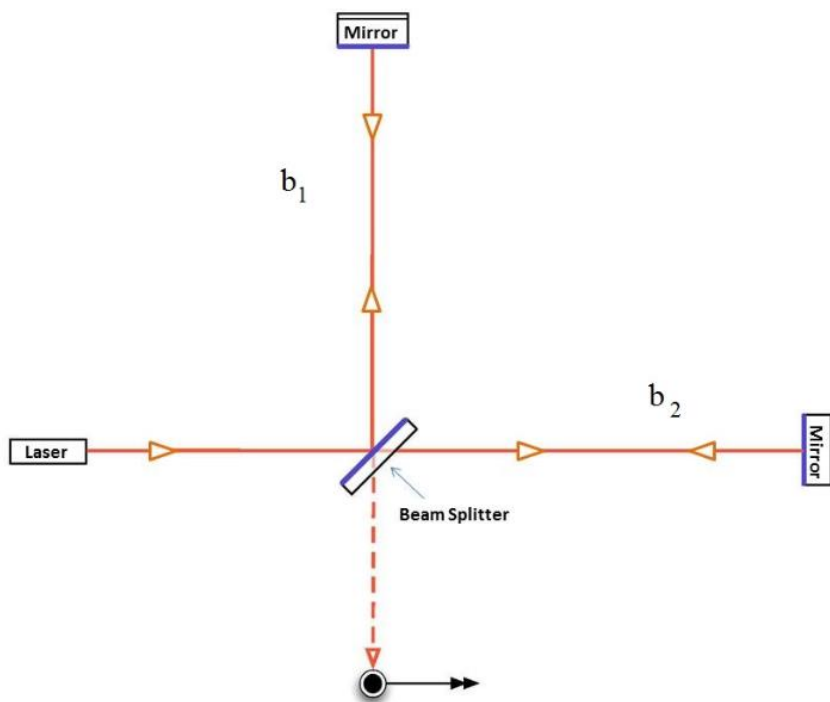
Negli anni 70, i fisici capiscono che per misurare una variazione così piccola si poteva usare un congegno chiamato interferometro laser.

### Come funziona?

La luce emessa dalla sorgente colpisce il primo specchio ad un angolo di circa 45 gradi. Poiché questo specchio è per metà trasparente, metà della luce è riflessa dallo specchio in una direzione, mentre l'altra metà lo attraversa. Questo specchio è comunemente chiamato '*beam-splitter*' (separatore di fascio) perché separa il fascio laser in due (*splitting*).

L'oggetto è disposto in maniera che i due nuovi fasci si allontanino, l'uno dall'altro, in direzioni tra loro perpendicolari.

Questi seguono fino in fondo i rispettivi bracci ( $b_1$  e  $b_2$ ), dove incontrano uno specchio, detto *massa di test*, che li riflette indietro, verso il *beam splitter*.



Qui sono riuniti in un unico fascio (*merging*). In base alla distanza percorsa dalle onde secondarie, queste interferiranno in maniera diversa al momento del *merging*.

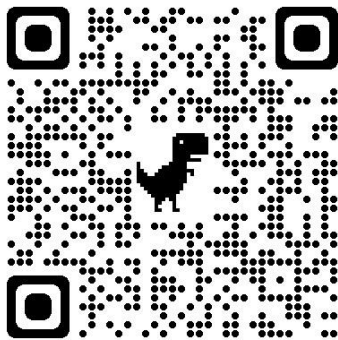
Il disegno d'interferenza (*pattern*) viene impresso su un foto - rivelatore che registra la forma dell'onda finale e consente di risalire anche alla più piccola differenza nella

lunghezza dei bracci. Gli interferometri adibiti alla rivelazione di onde gravitazionali sono costituiti esattamente con le stesse modalità, e possono percepire variazioni oltre la decimillesima parte della larghezza del protone.

I bracci sono disposti a  $90^\circ$  tra loro e durante il transito di un'onda gravitazionale, si osserva lo stiramento di uno dei due bracci mentre si assiste al restringimento dell'altro, o viceversa. Se inizialmente  $b_1 = b_2$ , il processo causa un divario nella lunghezza effettiva dei bracci, e la

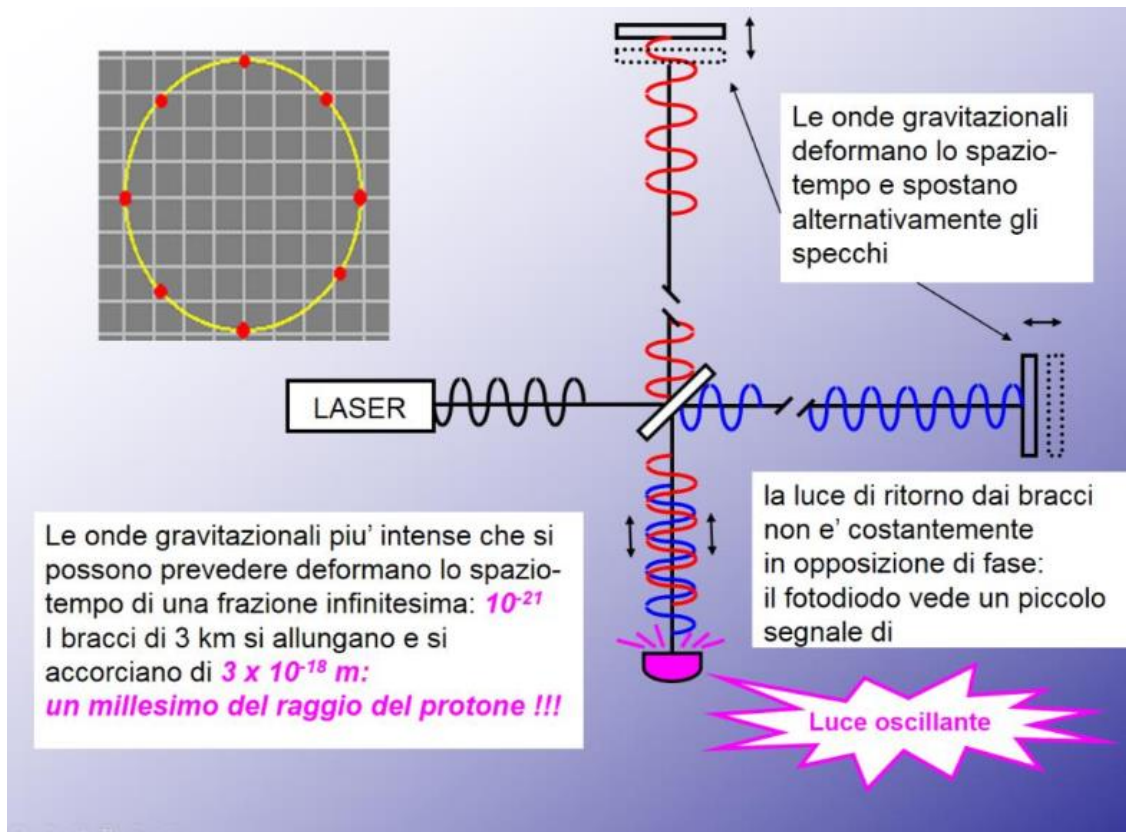
conseguente discrepanza nei tempi di ritorno al *beam splitter*, in quanto la velocità della luce rimane costante.

Durante il *merging*, i fasci subiranno interferenza costruttiva o distruttiva, cioè alternanza di luce (interferenza costruttiva) e buio (interferenza distruttiva), captata dall'interferometro, che segnala il passaggio della perturbazione e dà indicazione del passaggio dell'onda gravitazionale.



Scannerizza per accedere ad una *gif* che mostra la deformazione dello spazio-tempo occupato da un anello di masse di test, indotta dal passaggio di un'onda gravitazionale. L'effetto è enormemente amplificato per renderlo visibile.

Come disse Weiss "quello che fa un'onda gravitazionale è allungare, allontanare e poi riavvicinare lo spazio... quando arriva l'onda gravitazionale distorce lo spazio tempo...misurare i tempi di percorrenza della luce al passaggio dell'onda gravitazionale sembra un metodo molto efficace, questa è stata l'origine di LIGO".



Naturalmente questa è l'idea teorica ma la realizzazione pratica è incredibilmente complicata, basti pensare che la lunghezza tipica dei bracci di un'antenna gravitazionale è di alcuni chilometri, mentre la variazione causata dal passaggio di un'onda gravitazionale è migliaia di volte più piccola del nucleo di un atomo. Ecco perché ci sono voluti decenni prima di riuscire a costruire antenne gravitazionali funzionanti e soprattutto a tenere sotto controllo tutte le possibili fonti di disturbo, ma ormai le osservazioni delle onde gravitazionali sono diventate una realtà.

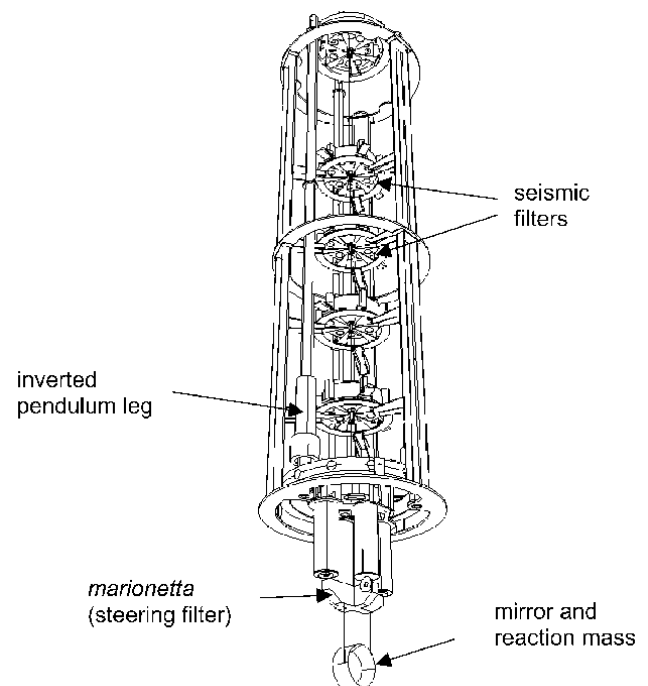
### ***VIRGO: l'interferometro italiano***



Questo interferometro si trova a Cascina, in provincia di Pisa, nella campagna toscana. È formato da due bracci, ciascuno lungo 3 km. Nei bracci sono tuttavia presenti delle cavità risonanti che amplificano il segnale

e fanno sì che la lunghezza dei bracci effettiva sia assai maggiore dei 3 km.

Per ridurre il rumore sismico (una delle principali limitazioni a bassa frequenza per la rivelazione delle onde gravitazionali) tutte le principali componenti ottiche degli interferometri devono essere sospese rispetto a terra. Virgo utilizza una catena di pendoli lunga 8 m chiamata *super-attenuatore*.



## **Com'è nato VIRGO**

In Italia, Francesco Giazotto, fisico delle particelle, cominciò ad interessarsi alle onde gravitazionali. Per salute fu costretto a non viaggiare e durante questa pausa forzata iniziò ad interessarsi alla teoria generale della relatività. Iniziò a pensare a come poter costruire un rilevatore, ora Virgo. Insieme ad Allan Brillet e ad un esperto di ottica Lambri Yes capirono di avere le competenze necessarie per poter costruire Virgo.



## **14 settembre 2015: la svolta**

Per la prima volta gli scienziati hanno osservato in modo diretto le onde gravitazionali. Le onde gravitazionali sono state rivelate il 14 settembre 2015, alle 10:50:45 ora italiana (09:50:45 UTC, 05:50:45 am EDT), da entrambi gli strumenti gemelli LIGO negli Stati Uniti, a Livingston, in Louisiana, e a Hanford, nello stato di Washington. Gli osservatori LIGO hanno registrato l'arrivo delle onde gravitazionali entro una finestra temporale di coincidenza di 10 millisecondi.

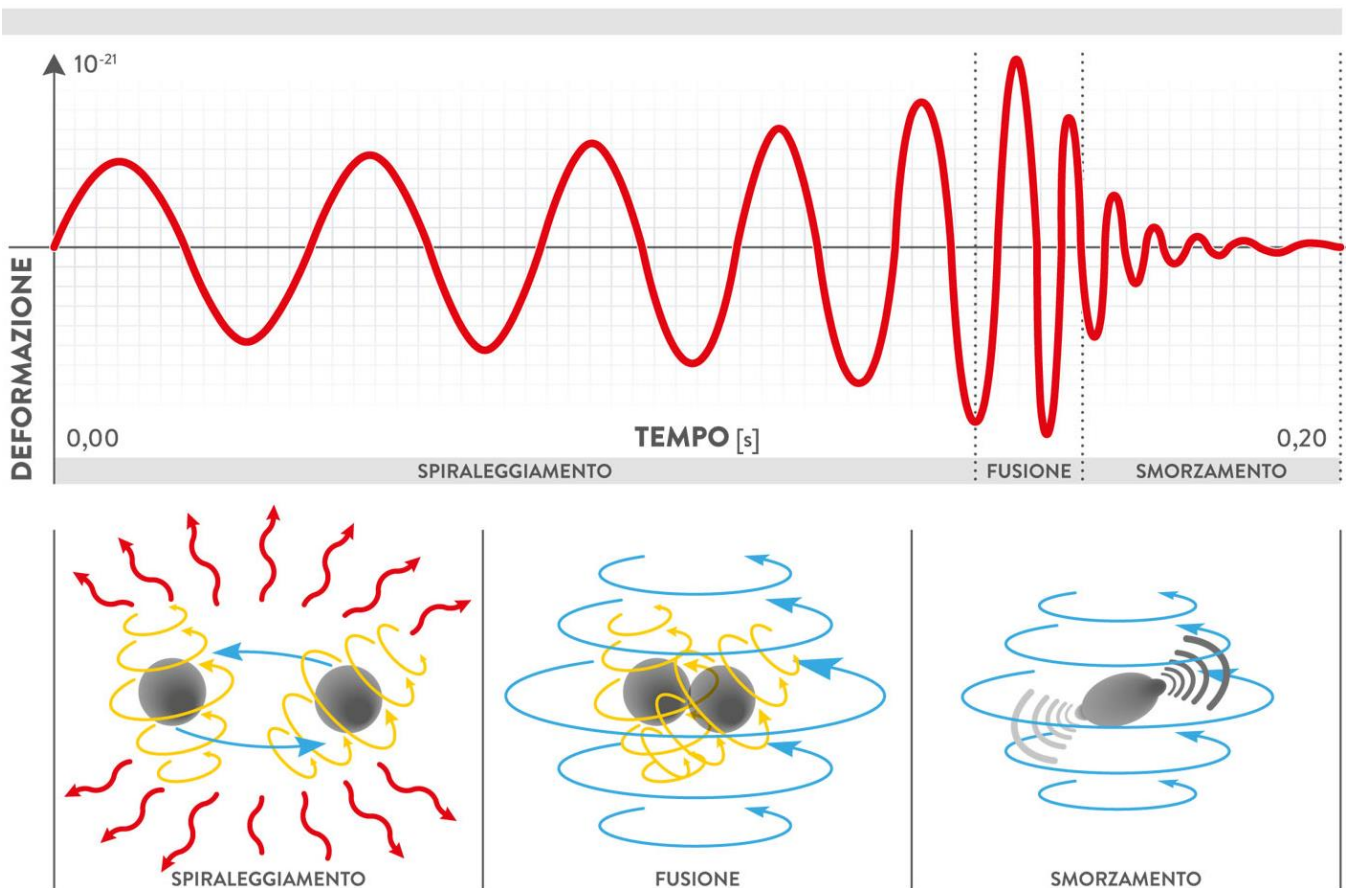
L'importante risultato, pubblicato sulla rivista scientifica *Physical Review Letters*, fu annunciata dalle collaborazioni LIGO e VIRGO nel corso di due conferenze simultanee, negli Stati Uniti a Washington, e in Italia a Cascina (Pisa).

Link all'articolo originale per chi volesse approfondire:

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

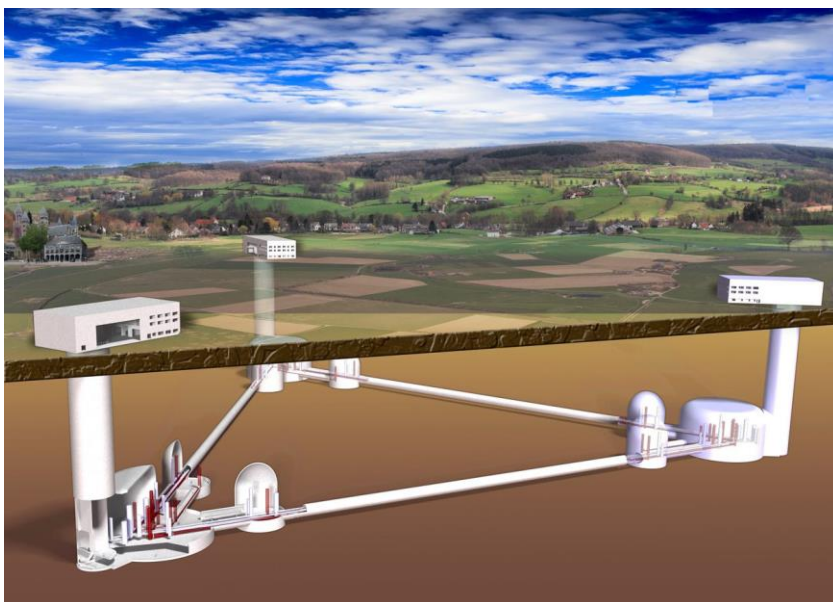
Le onde gravitazionali rivelate sono state prodotte nell'ultima frazione di fusione di due buchi neri.





## Nuovi progetti

### ET (Einstein Telescope)



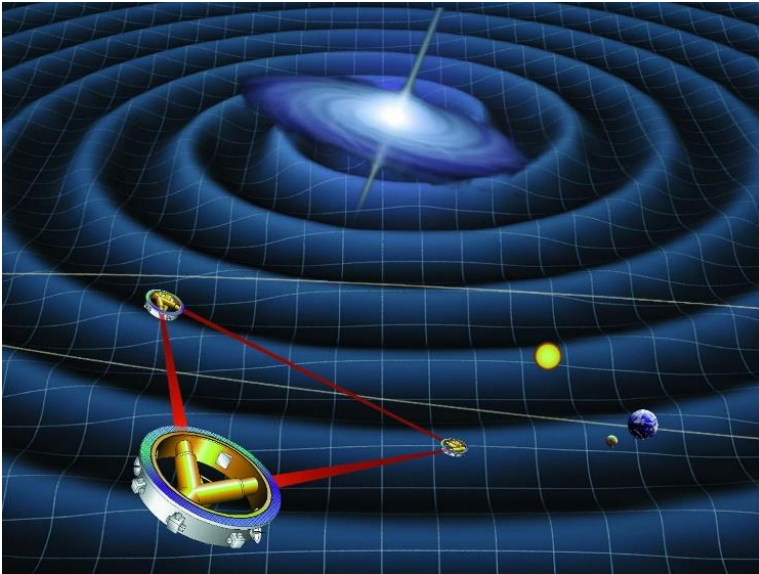
Un interferometro molto sofisticato, di terza generazione, la forma, diversamente da LIGO e VIRGO, sarà un triangolo per consentire una migliore caratterizzazione dell'onda gravitazionale.

La dimensione dell'interferometro passerà dai 3–4 km dei rilevatori attuali a 10 km.

Per schermare i disturbi ambientali e rumori di sottofondo, verrà costruito un sito sotterraneo (200 m di profondità) per mitigare i disturbi causati dal rumore sismico ambientale e gli specchi saranno raffreddati a bassa temperatura (10-20 K), per ridurre gli effetti del rumore termico.

I siti candidati ad ospitare questo nuovo interferometro sono: l'osservatorio in Sardegna per la silenziosità ambientale, insieme al confine tra Germania, Belgio e Olanda. Con questo strumento si avrà una capacità migliore di esplorazione dello spazio, per studiare segnali che oggi non si conoscono.

### LISA: cercare nello Spazio (25 gennaio 2024)



Lo Science Programme Committee dell'Agenzia spaziale europea (Esa) ha ufficialmente rilasciato il suo *go-ahead* per l'avvio della missione, il cui nome è l'acronimo di *Laser Interferometer Space Antenna*: si tratta del primo progetto mai tentato di ricerca e rilevazione di onde gravitazionali direttamente dallo Spazio.

Il *go-ahead* è un passo decisivo per il passaggio alla fase operativa della missione: con questa approvazione, l'agenzia spaziale riconosce che il concept e la tecnologia di Lisa sono sufficientemente avanzate e passa quindi alla fase successiva, quella della scelta degli appaltatori che dovranno materialmente costruire i veicoli e gli strumenti.

Alla missione, tra l'altro, parteciperà anche la Nasa in qualità di "*partner collaborativo*".

LISA è una sonda spaziale, costituita da 3 satelliti artificiali posti ai vertici di un triangolo equilatero. Questa costellazione di satelliti si muoverà in un'orbita solare. Tramite un interferometro laser, la distanza reciproca verrà accuratamente misurata, ed eventuali piccolissimi cambiamenti potranno essere attribuiti ad onde gravitazionali di passaggio. Le tre sonde si scambieranno raggi laser su distanze pari a 2,5 milioni di chilometri, ovvero più di sei volte la distanza Terra-Luna.

I laser usati per la misurazione avranno una potenza di 1 Watt, e saranno osservati tramite piccoli telescopi di 30 cm di diametro. LISA sarà sensibile a onde gravitazionali a bassa frequenza, fra 0,1 mHz e 1 Hz; poiché non sarà affetto dai disturbi ambientali di origine terrestre, come i microsismi,

potrà esplorare frequenze molto più basse di quelle a cui sono sensibili gli interferometri terrestri, come ad esempio Virgo e LIGO.

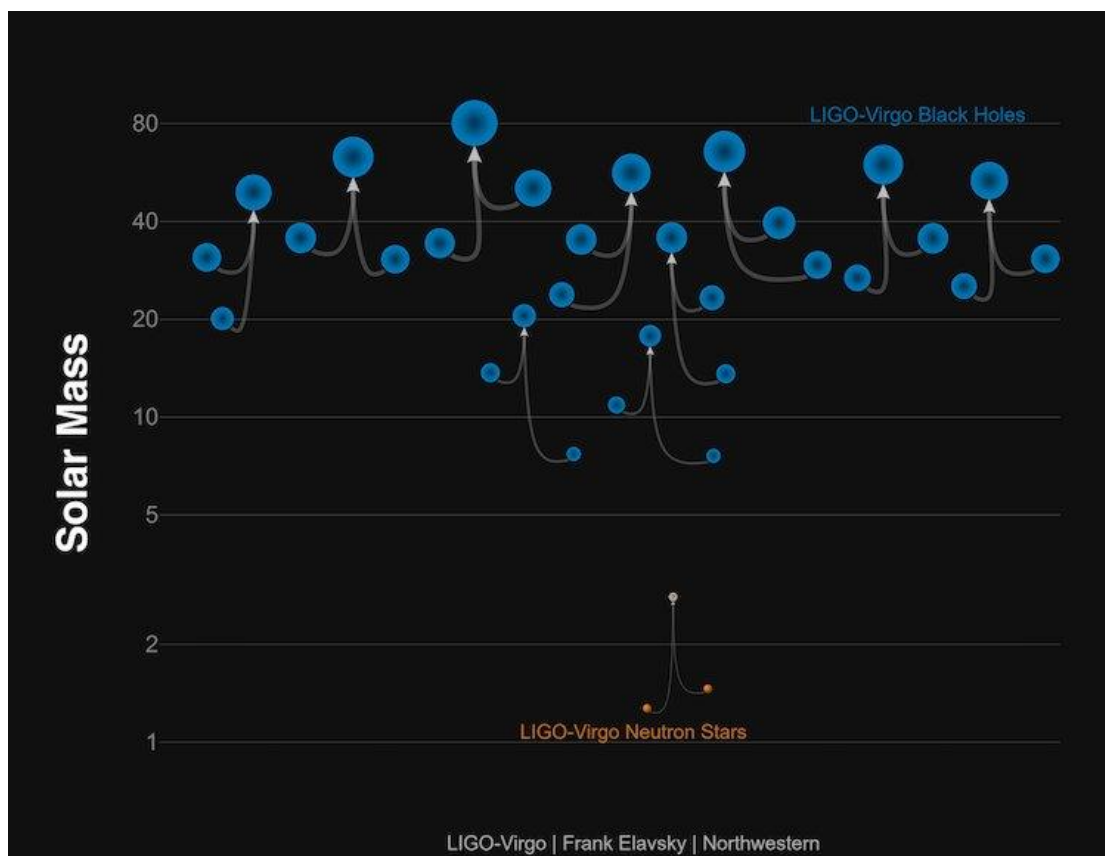
L'obiettivo di Lisa, è l'osservazione delle onde gravitazionali direttamente dallo Spazio. *“Lisa è un'impresa mai tentata prima – ha spiegato Nora Lützendorf, a capo del progetto per l'Esa – Usando raggi laser su distanze di diversi chilometri, ormai siamo in grado di rilevare, con gli strumenti a terra, le onde gravitazionali derivanti da eventi cosmici che coinvolgono oggetti della dimensione delle stelle – come esplosioni di supernova o collisioni di stelle ultra-dense o di buchi neri. Per allargare le nostre possibilità è necessario spostarci nello Spazio”*.

Lisa sarà in grado di rilevare le onde gravitazionali derivanti dalla collisione dei grandi buchi neri al centro delle galassie lontane (cosa che, come abbiamo visto, sono riusciti a fare anche gli strumenti a terra), ma anche quelle derivanti dalla fusione di oggetti cosmici molto più piccoli, come nane bianche o stelle di neutroni, il che auspicabilmente fornirà informazioni preziosissime sull'evoluzione di questi sistemi. La missione, inoltre, contribuirà a mappare con più precisione la struttura della Via Lattea.

*“Per secoli abbiamo studiato il cosmo osservando la luce – ha concluso Oliver Jennrich, un altro scienziato Esa coinvolto nel progetto Lisa – Abbinando questa osservazione a quella delle onde gravitazionali stiamo introducendo una nuova dimensione alla nostra percezione dell'Universo. Se immaginiamo che ora, con le nostre missioni, abbiamo guardato il cosmo come un film muto, catturare le increspature dello spazio-tempo con Lisa sarà come aggiungere il sonoro. Un vero momento di svolta”*.



## Un catalogo di sorgenti di onde gravitazionali



Il catalogo LIGO/Virgo rappresenta una bellissima ricompensa per l'enorme sforzo scientifico e tecnologico delle collaborazioni, e una grande soddisfazione per tutti coloro che per anni hanno creduto e investito lavoro e risorse in questo progetto.

Grazie alla rilevazione di onde gravitazionali, gli scienziati sono stati in grado di mappare le principali sorgenti di queste perturbazioni, ordinate in base alla loro Solar Mass (massa solare).

I singoli eventi osservati danno informazioni non solo sulla distribuzione degli oggetti compatti nell'Universo (buchi neri e stelle di neutroni) ma anche sulle loro proprietà. Si scoprì così una popolazione di buchi neri altrimenti invisibili.

In questo catalogo, è presente inoltre il primo segnale proveniente da una collisione di stelle di neutroni. Era il 17 agosto 2017, gli interferometri hanno inviato un nuovo "*alert*", un segnale per indicare una nuova onda gravitazionale. Grazie all'italiana Marica Branchesi, astronoma del Gssi (il Gran Sasso Science Institute dell'Aquila), 96 telescopi di tutto il mondo hanno puntato la zona di cielo dalla quale sembrava provenire e hanno osservato per la prima volta l'evento anche nello spettro elettromagnetico. Ma non si trattava di due buchi neri, bensì della fusione di due stelle di neutroni.

Quando dei buchi neri si scontrano, poiché sono invisibili, possiamo osservare solo gli effetti della loro immensa forza di attrazione, registrando le onde gravitazionali che scaturiscono quando due di loro si fondono. Le due stelle di neutroni, che si sono scontrate, invece hanno prodotto un'onda gravitazionale ma anche luce visibile e dei raggi X. Il 17 agosto 2017 è nata "l'astronomia multimessaggera", che studia i segnali che ci arrivano dal cosmo attraverso fenomeni di natura diversa.

### ***Una nuova era dell'astronomia (giugno 2023)***

***«L'universo non è vuoto, si muove come un mare agitato»***



***“Space-time churns like a choppy sea”***

*L'Osservatorio Green Bank a Green Bank, W.Va., era tra gli osservatori utilizzati per tracciare le pulsar come un modo per rilevare le onde gravitazionali a bassa frequenza. (Michael S. Williamson/Washington Post).*

Tutto ciò che vediamo attorno a noi viene costantemente agitato dalle onde gravitazionali a bassa frequenza. È questa in sostanza la scoperta fatta da un team internazionale di astronomi, che per la prima volta ha trovato prove concrete e convincenti sull'attività delle onde spazio-temporali. Il Washington Post, tra i primi a riportare la notizia, parla di una «scoperta sconvolgente». Secondo quanto osservato dagli astrofisici, l'universo non sarebbe affatto un luogo statico e vuoto. Al contrario: viene descritto come un «mare agitato», a causa delle potenti interazioni gravitazionali tra i tanti oggetti – tra cui i buchi neri – che increspano il tessuto dello spazio-tempo.

## **Conclusioni**

Le onde gravitazionali possono viaggiare indisturbate nell'universo portando informazioni sia dalle regioni più interne delle stelle e farci conoscere com'è fatta una stella di neutroni al suo interno, oppure se un buco nero è veramente un buco nero come descritto dalla relatività generale di Einstein. Ma possono venire anche da molto lontano da noi, proprio per la loro capacità di viaggiare nel cosmo senza essere attenuate dalla materia che incontrano. Grazie a questa proprietà, nel futuro e con strumenti più raffinati, si potranno catturare onde gravitazionali prodotte nei primissimi istanti di vita dell'universo. Si potrà così avere un'immagine del cosmo appena nato, impossibile da ottenere da qualunque altro Messaggero Cosmico. Le onde gravitazionali ci possono portare a conoscere come si è formato ed evoluto l'Universo all'inizio della sua vita.

Gli studiosi, infatti, sperano di potenziare i propri strumenti e focalizzare al meglio le indagini, in modo da poter sfruttare queste infinitesimali variazioni nello spazio-tempo, come portatrici di informazioni provenienti da Ere passate, permettendoci di viaggiare nel tempo.

La prima cattura delle onde gravitazionali da parte dei rivelatori Ligo e Virgo è anche un grande successo italiano: *"è una particolare soddisfazione poter vedere che in Italia ci siano ancora luoghi in cui è possibile fare imprese di questo tipo"* (Giovanni Losurdo, dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare INFN). La scienza italiana ha un ruolo di primo piano nella scoperta diretta dell'esistenza delle onde gravitazionali, che, oltre a coinvolgere decine di nostri ricercatori, è stata possibile grazie a un progetto ideato e sviluppato proprio in Italia, in collaborazione con altre nazioni.

L'Italia è oggi tra i protagonisti della scoperta, grazie all'intelligenza, alla caparbia e all'impegno dei ricercatori della Collaborazione VIRGO, che fa capo all'interferometro dello European Gravitational Observatory (EGO), di Cascina, vicino Pisa. Un laboratorio fiore all'occhiello dell'eccellenza italiana, dei nostri scienziati e della nostra industria.

Un esempio di come gli investimenti nella scienza e nelle grandi infrastrutture di ricerca siano essenziali per il progresso delle conoscenze e per lo sviluppo del Paese.

*"Ricordatevi quindi di guardare in alto, verso le stelle, e non i vostri piedi. Cercate di capire quello che vedete e interrogatevi sulle ragioni per cui l'universo esiste. Siate curiosi. Per quanto difficile possa sembrare la vita, c'è sempre qualcosa che potrete fare con successo. L'importante è non arrendersi. Liberare la vostra immaginazione. Plasmate il futuro"*

*Stephen Hawking*

## **Sitografia**

- [https://amslaurea.unibo.it/10334/1/Onde\\_gravitazionali - Teo.pdf](https://amslaurea.unibo.it/10334/1/Onde_gravitazionali_-_Teo.pdf)
- <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-are-gw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=cUa0tI5sK-E>
- <http://public.virgo-gw.eu/cosa-sono-le-onde-gravitazionali/#:~:text=Le%20onde%20gravitazionali%20sono%20oscillazioni,Relativit%C3%A0%20Generale%2C%20pubblicata%20nel%201915.>
- [https://www.open.online/2023/06/29/astronomia-universo-onde-gravitazionali-studio/?refresh\\_ce-cp](https://www.open.online/2023/06/29/astronomia-universo-onde-gravitazionali-studio/?refresh_ce-cp)
- [https://indico.ego-gw.it/event/50/contributions/1039/subcontributions/11/attachments/727/1234/VirtualVisitsDemonstrator\\_ITA\\_EGO.pdf](https://indico.ego-gw.it/event/50/contributions/1039/subcontributions/11/attachments/727/1234/VirtualVisitsDemonstrator_ITA_EGO.pdf)
- <https://cielipiemontesi.it/che-cosa-sono-le-onde-gravitazionali-un-fumetto-per-capire-repubblica-it/>
- <https://www.unina.it/-/12078220-osservate-per-la-prima-volta-le-onde-gravitazionali#:~:text=Le%20onde%20gravitazionali%20sono%20state,Hanford%2C%20nello%20stato%20di%20Washington>
- <https://www.wired.it/article/einstein-telescope-italia-progetto-etic-infn-pnrr/#:~:text=In%20particolare%2C%20l'Et%20%C3%A8,da%20due%20onde%20di%20luce>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio\\_Einstein](https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio_Einstein)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/LISA\\_\(sonda\\_spaziale\)](https://it.wikipedia.org/wiki/LISA_(sonda_spaziale))
- <https://www.media.inaf.it/2024/01/25/lisa-oliver-jennrich/>
- <https://www.units.it/news/onde-gravitazionali-units-tra-gli-autori-del-nuovo-catalogo>
- [https://www.youtube.com/watch?v=R5tlcHut1\\_k&t=1022s](https://www.youtube.com/watch?v=R5tlcHut1_k&t=1022s)
- <https://www.youtube.com/watch?v=DLj29SIanc&t=1421s>