

 FEDERMANAGER

 ALDAI ASSOCIAZIONE LOMBARDA
DIRIGENTI AZIENDE INDUSTRIALI

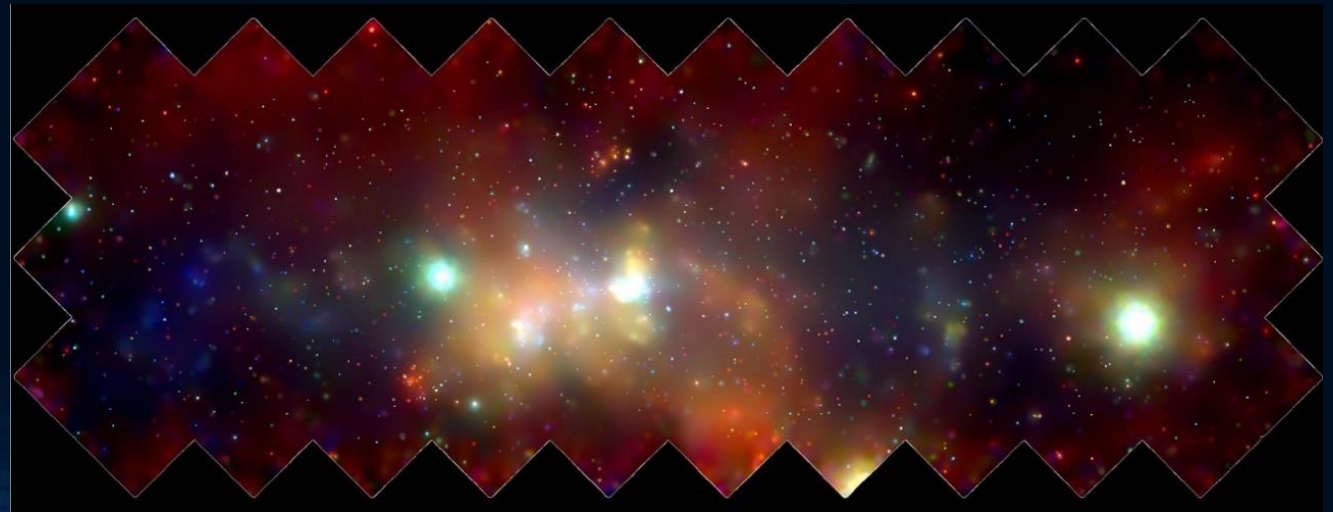
Onde gravitazionali

UN NUOVO STRUMENTO PER LO STUDIO DEL COSMO

OAS
GAC
IL CIELO È LA NOSTRA PASSIONE

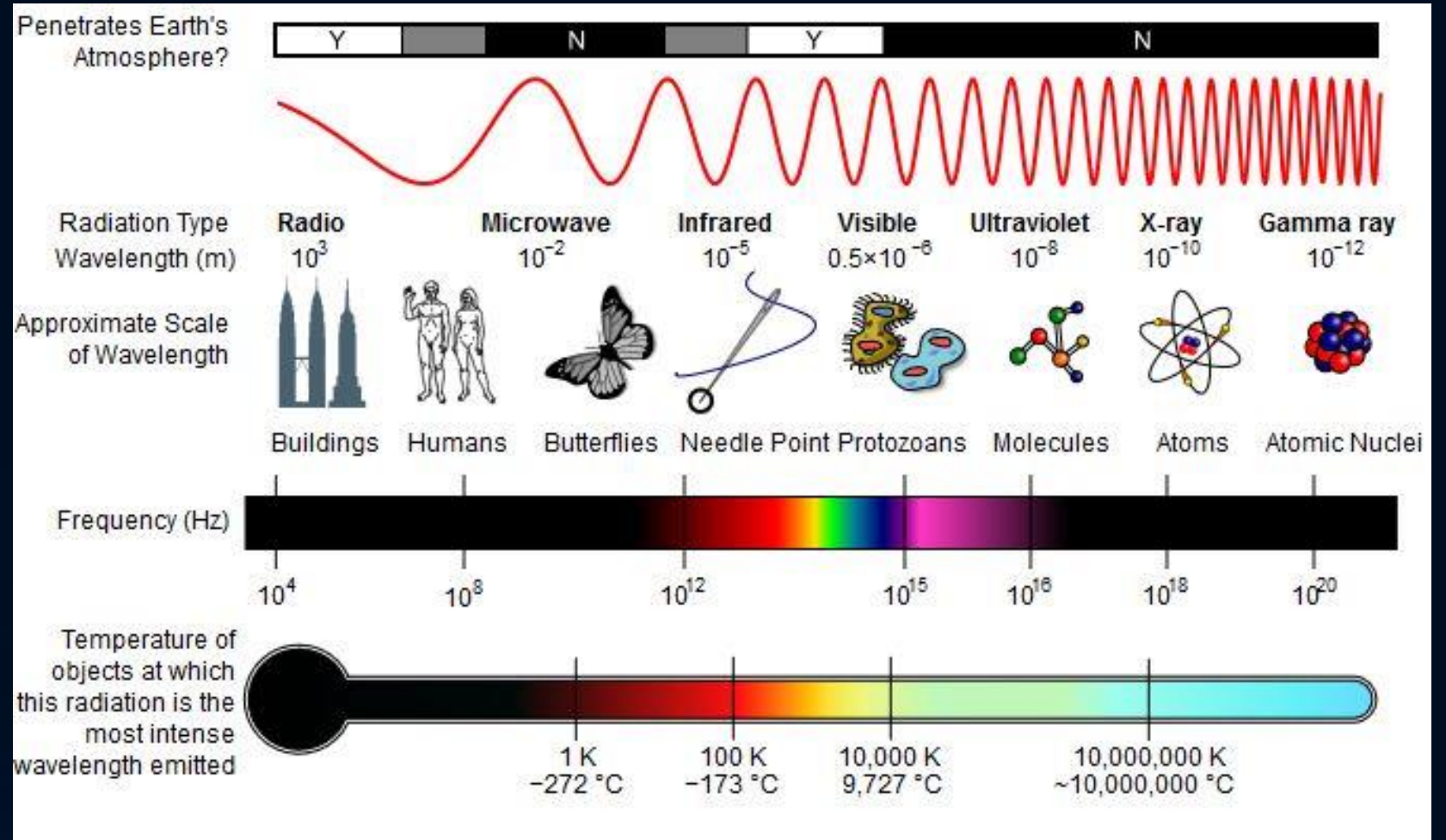
Quello che vediamo

Tutto quello che si è osservato finora coi telescopi ottici e i radiotelescopi fa parte della radiazione elettromagnetica dell'universo



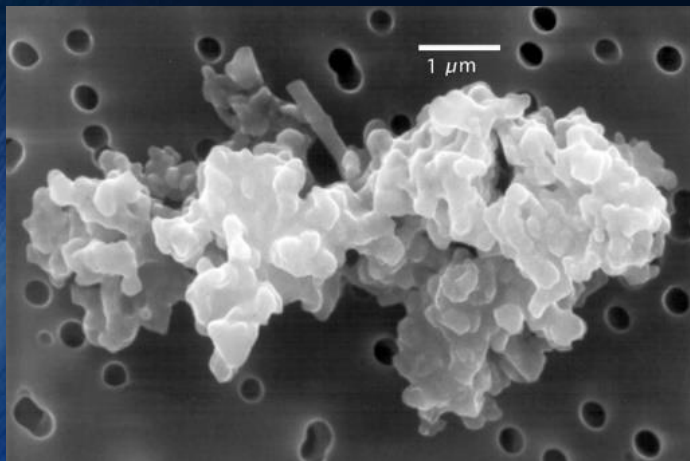
Quello che vediamo

La radiazione EM che si riceve è dovuta alle caratteristiche dell'oggetto che si osserva, ad esempio la temperatura di una stella o nebulosa che da emissione nella parte infrarossa e visibile dello spettro, o la rapida rotazione delle pulsar che emette onde radio



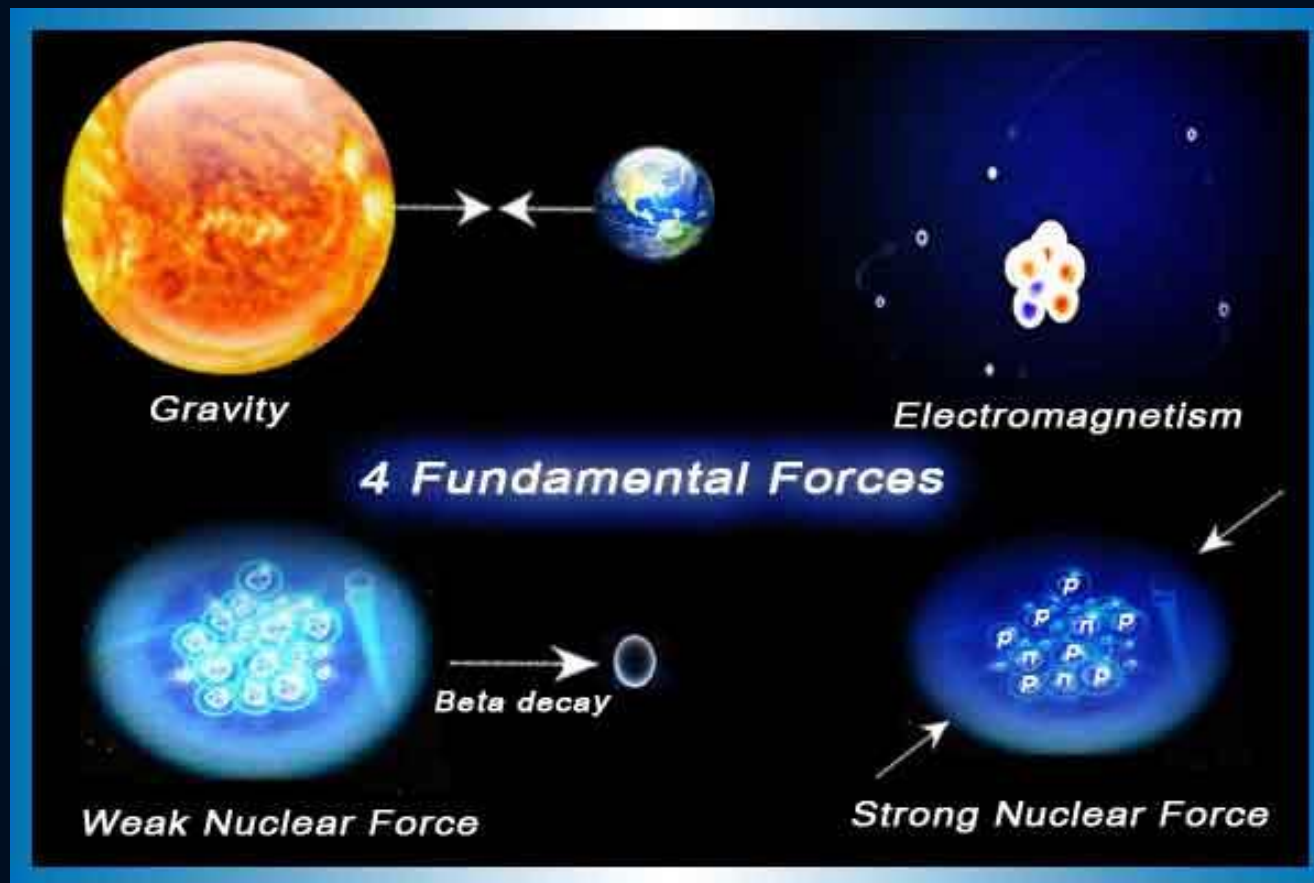
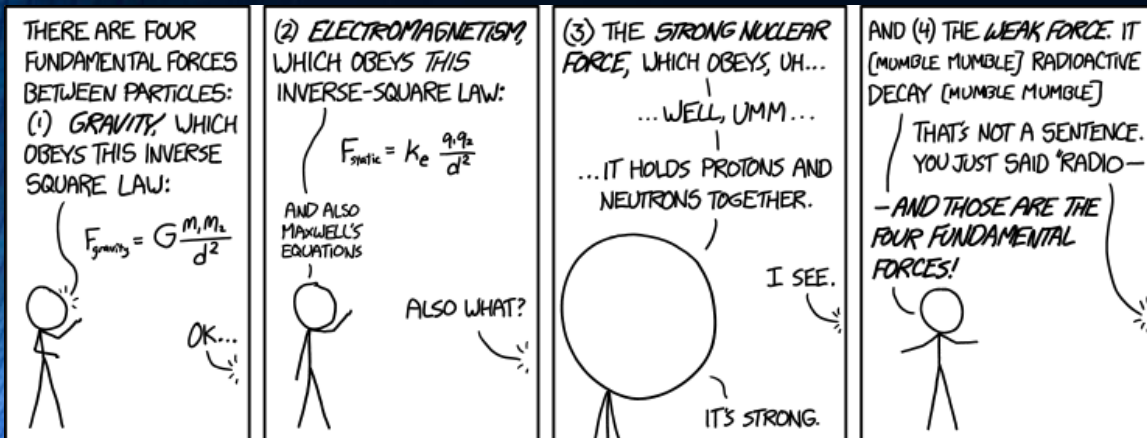
La polvere cosmica

In realtà lo spazio interstellare non è perfettamente vuoto, ma presenta della "polvere", si tratta di particelle dal diametro di pochi μm che si addensano nelle nebulose e nelle galassie, queste particelle però assorbono la radiazione elettromagnetica degli oggetti che gli stanno dietro, "nascondendoli"



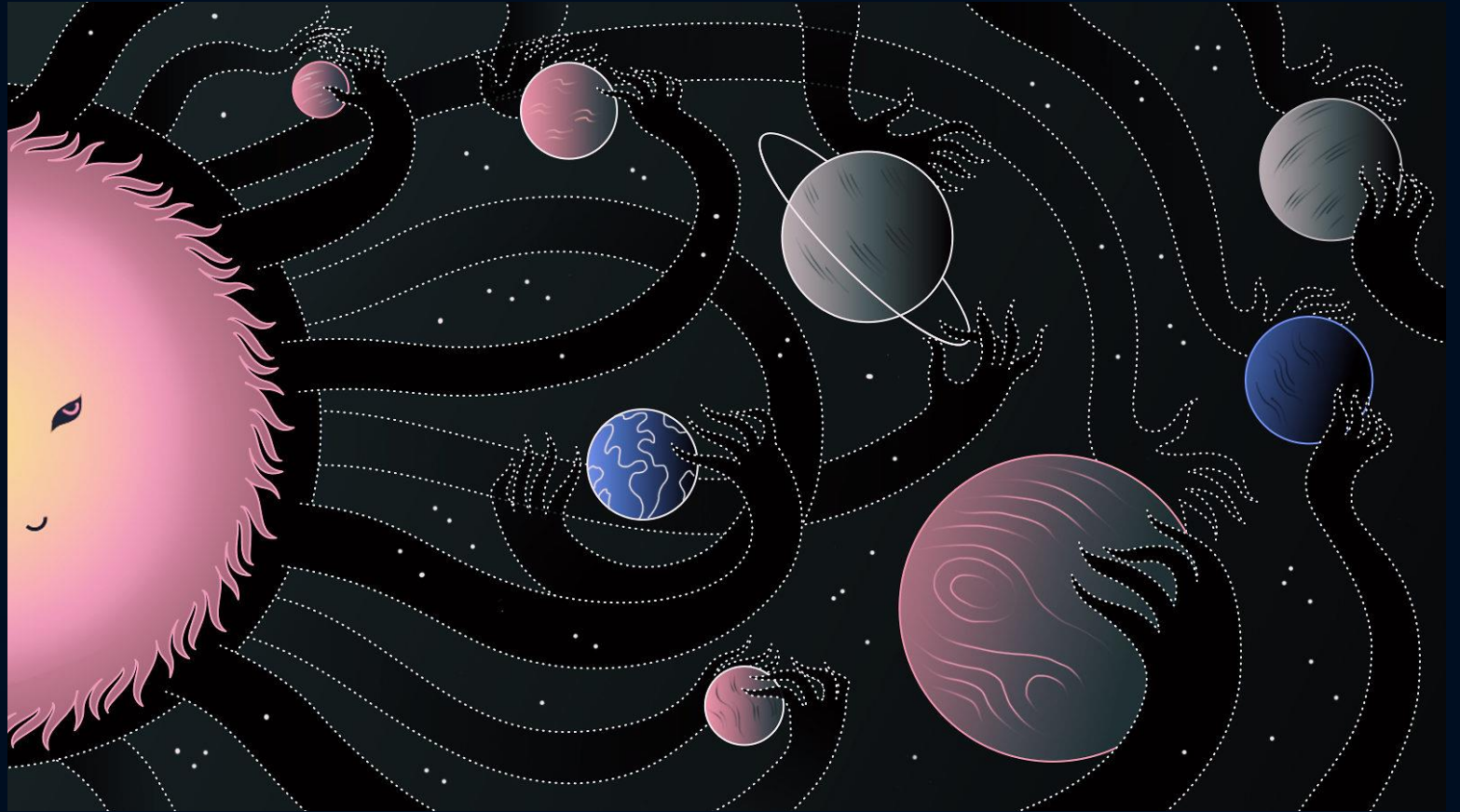
Quello che non vediamo

Tuttavia le interazioni dominanti nel cosmo non sono di natura elettromagnetica, ma sono gravitazionali, e queste non sono rilevabili studiando la radiazione elettromagnetica



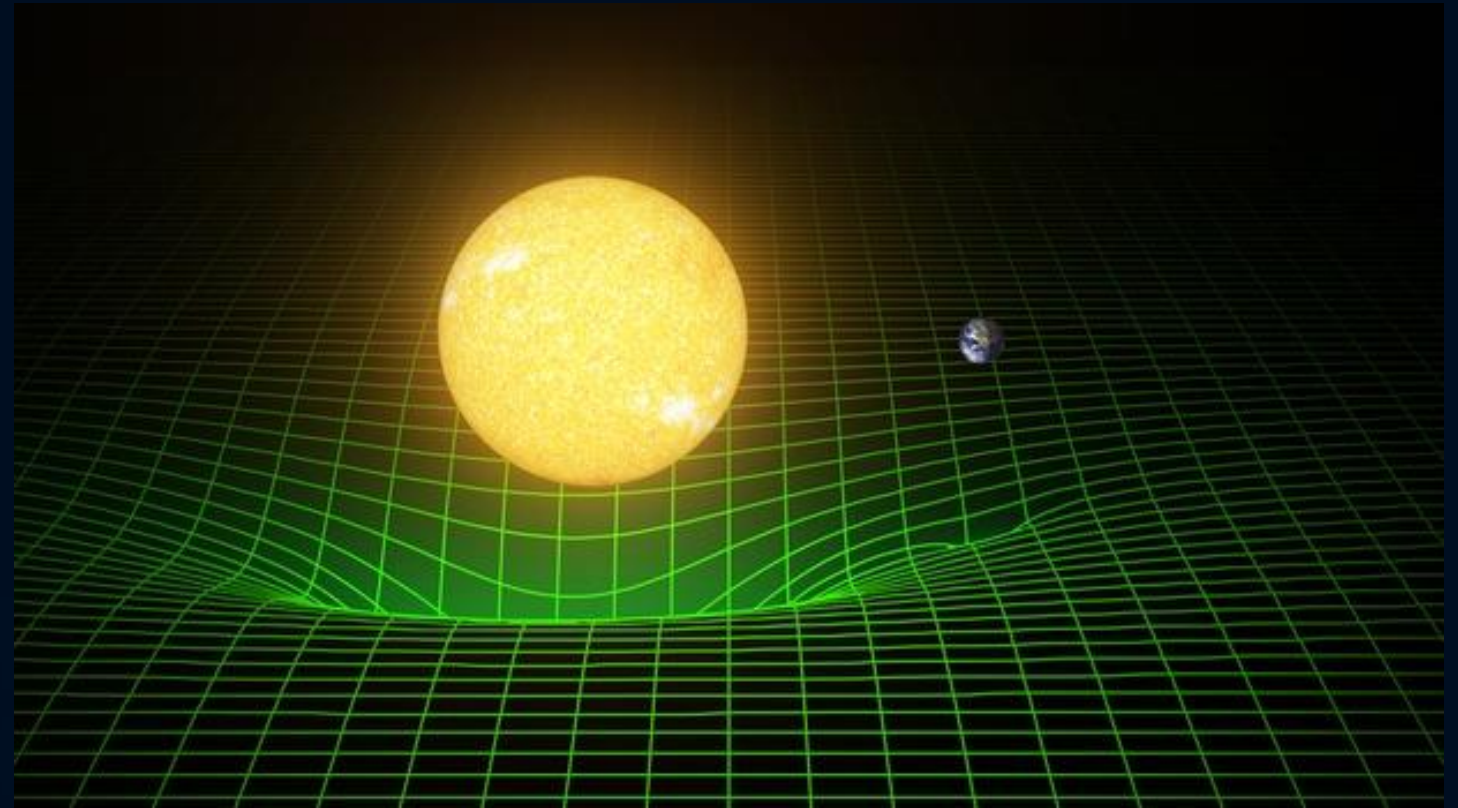
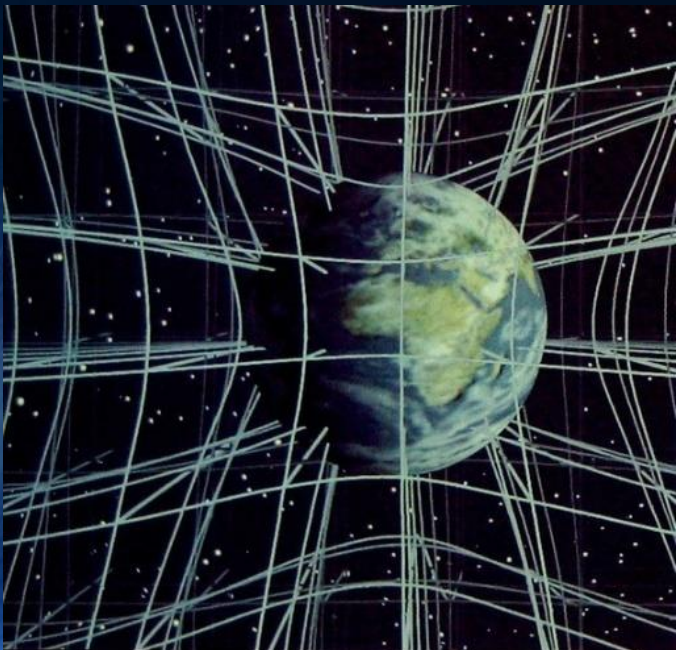
La gravità

Quindi poter studiare direttamente le interazioni gravitazionali fornirebbe informazioni più dettagliate che con un'analisi "tradizionale" è impossibile ottenere, ma come possiamo studiare direttamente la gravità?

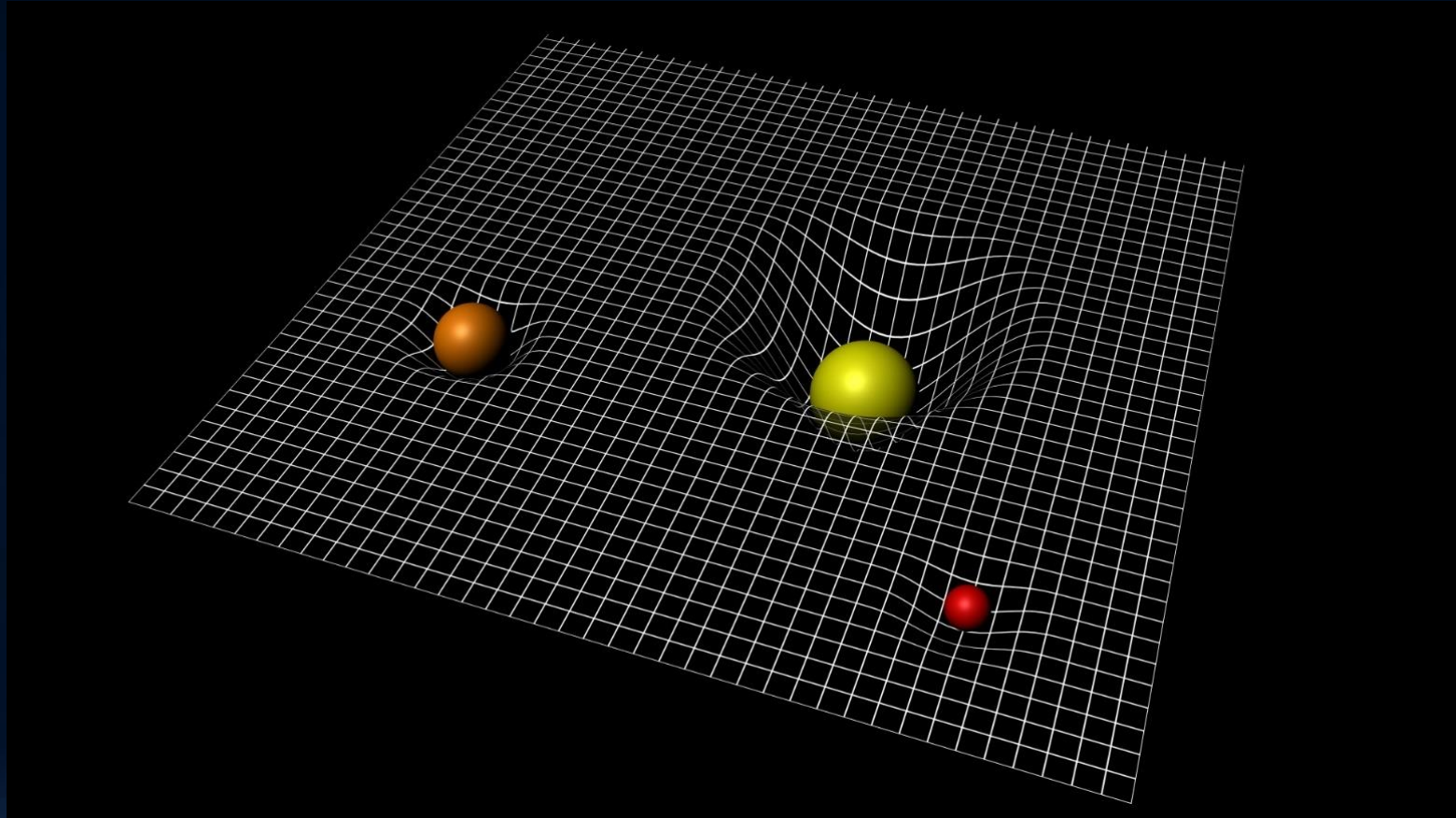


La gravità secondo Einstein

In base alla teoria della relatività generale, tutti i corpi si trovano su una superficie particolare detta "spazio-tempo", la gravità altro non è che la deformazione che i corpi creano su questa superficie



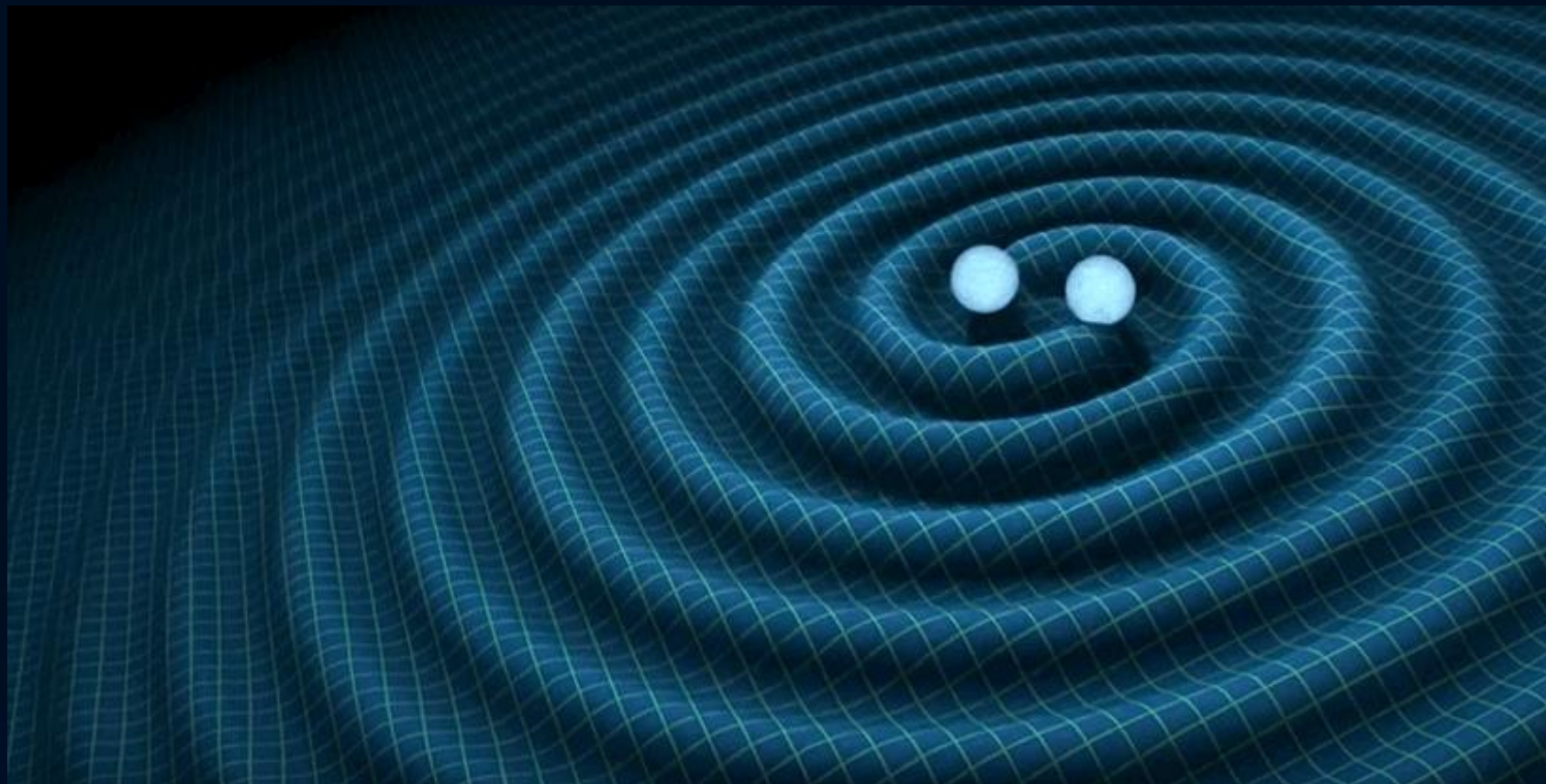
La gravità secondo Einstein



Lo spazio tempo si comporta come una sorta di "tappeto elastico", più massa è presente in un punto più la curvatura dello spazio-tempo è accentuata

Le onde gravitazionali

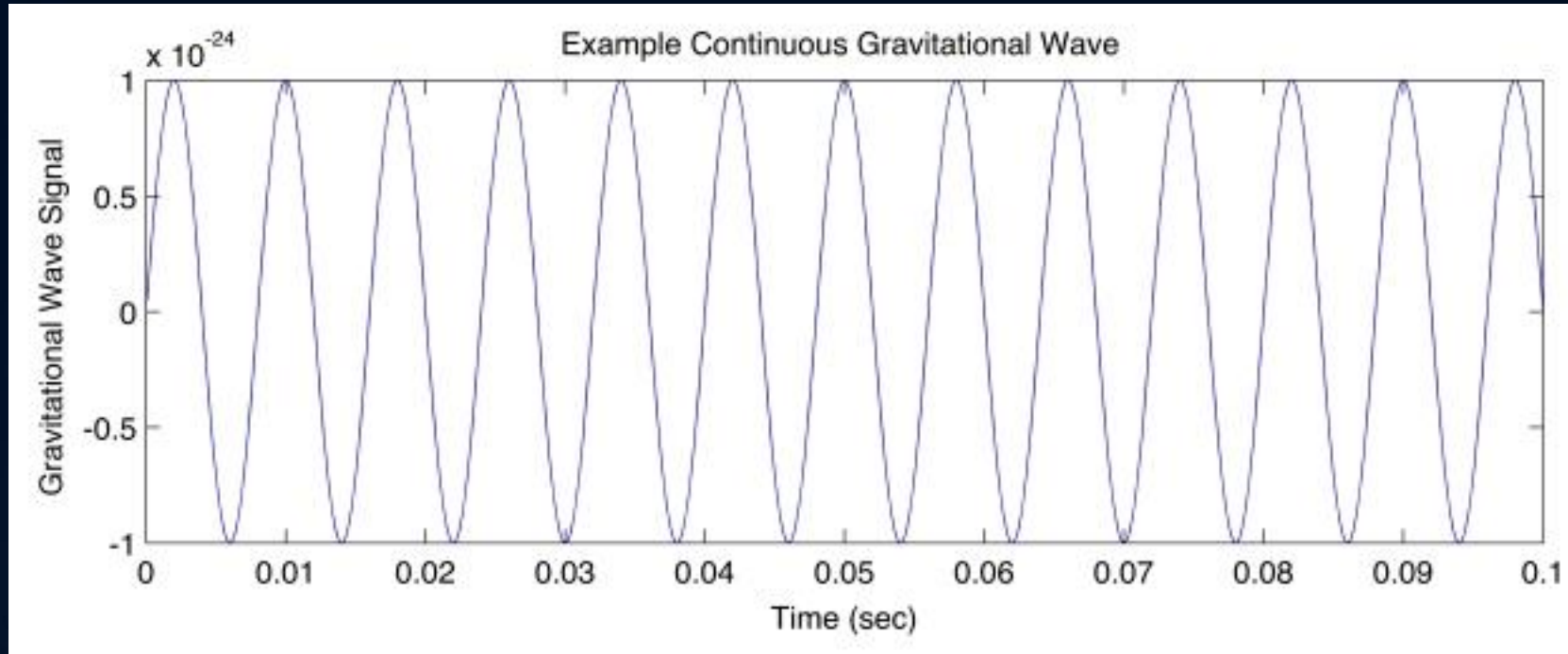
Come per un'imbarcazione che si muove sulla superficie di un lago, anche nello spazio gli oggetti in movimento creano delle "increspature" nello spazio-tempo, queste sono le onde gravitazionali



Sorgenti di onde gravitazionali

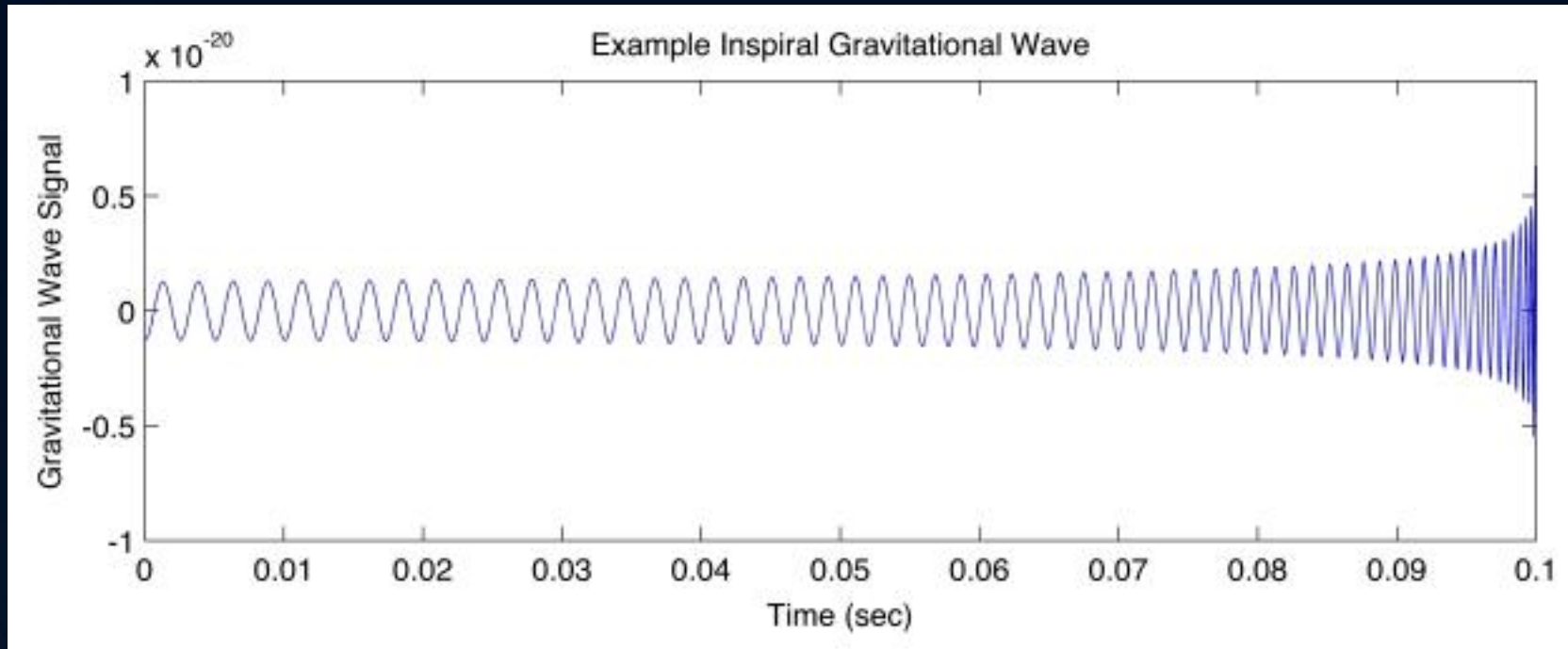
- Solo oggetti che NON hanno una simmetria sferica producono onde gravitazionali
- Le caratteristiche di un'onda gravitazionale dipendono dalla massa e dal moto dell'oggetto che le ha generate
- Si può quindi risalire al tipo di oggetto che ha generato l'onda a partire dalla forma dell'onda gravitazionale
- Si ottengono 4 classi di sorgenti di onde gravitazionali:
 - Sorgenti continue
 - Sorgenti spiraleggianti
 - Sorgenti esplosive
 - Sorgenti casuali

Sorgenti continue



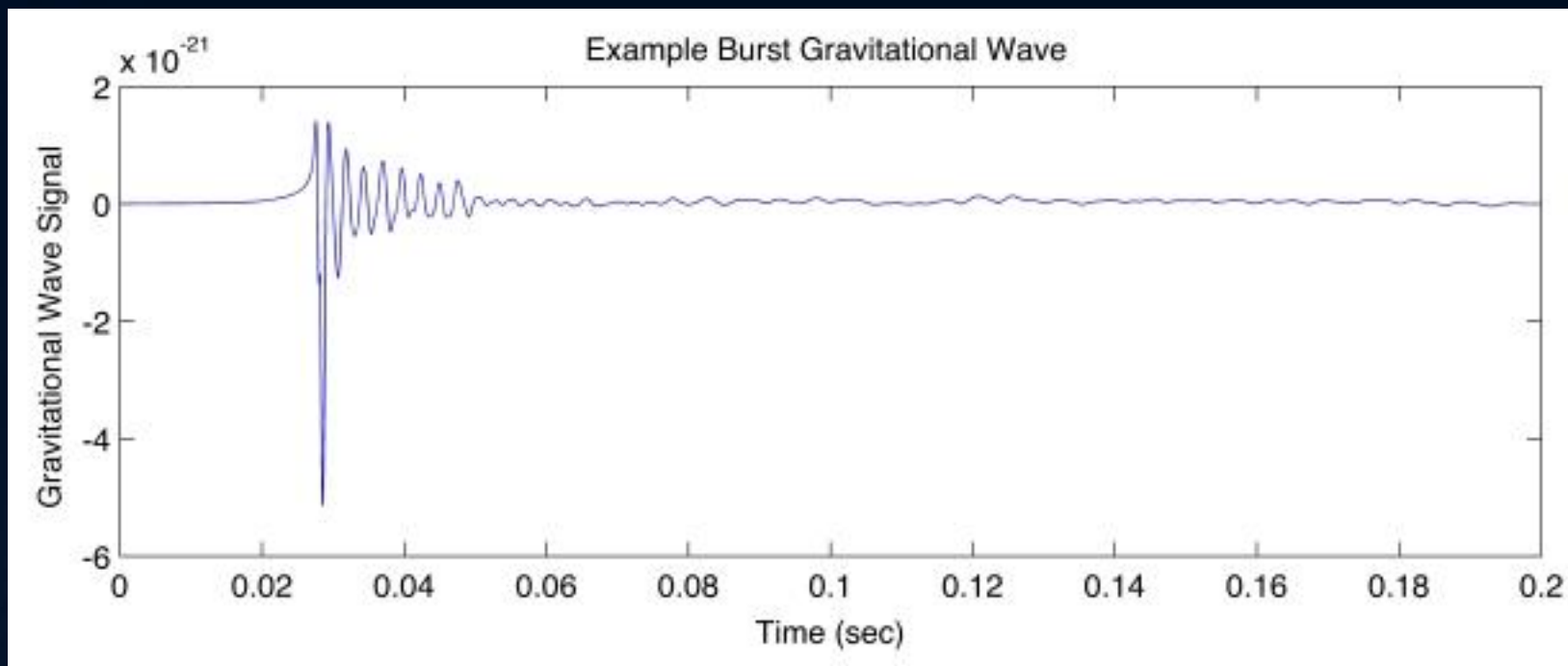
Sono sistemi che hanno una frequenza costante e ben definita: sistemi binari di buchi neri, stelle di neutroni o nane bianche. Le onde gravitazionali che generano hanno una forma regolare e sono di debole intensità, sono infatti sistemi che evolvono lentamente e rilasciano meno energia

Sorgenti spiraleggianti



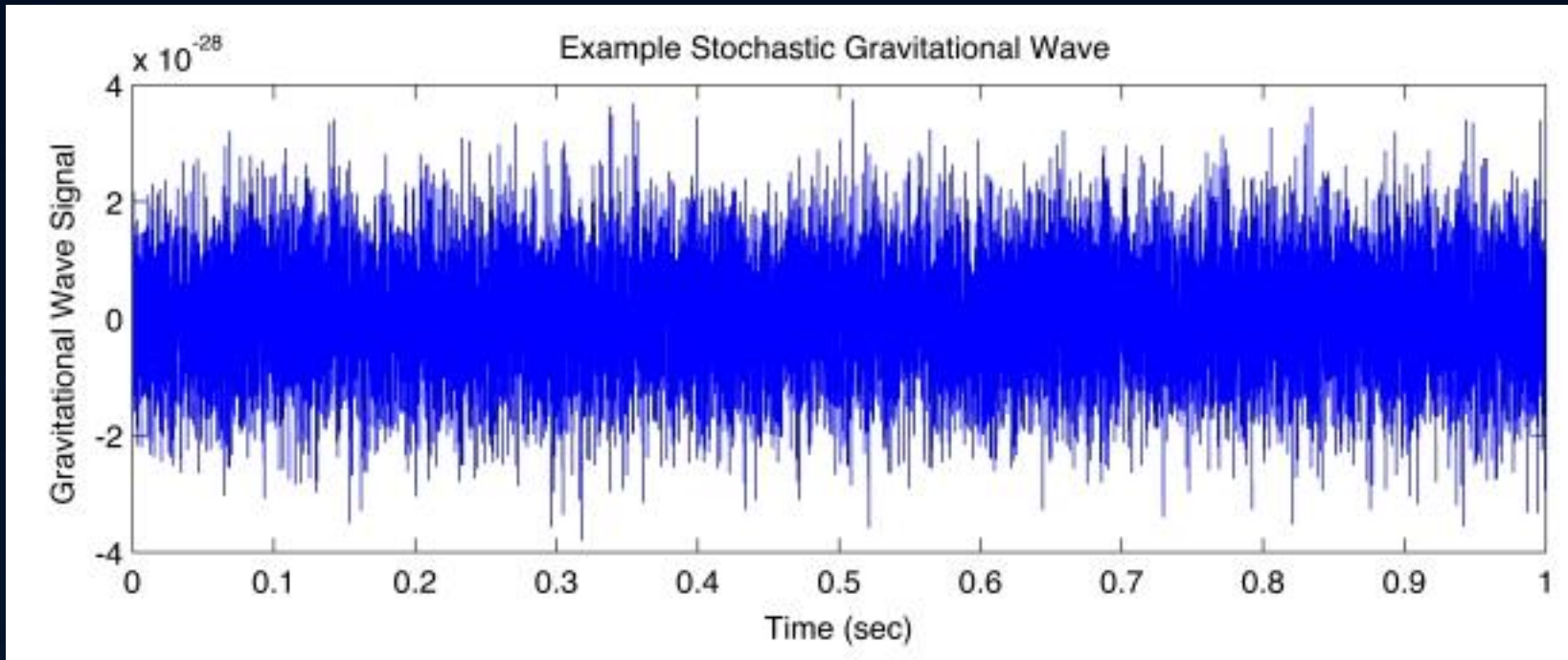
Tipiche dei sistemi binari agli stadi finali di evoluzione, man mano che i due corpi si avvicinano aumenta la loro velocità, di conseguenza la frequenza delle onde gravitazionali emesse aumenta fino a raggiungere il massimo nel momento della collisione

Sorgenti esplosive



Sono sorgenti di breve durata, probabilmente dovute a esplosioni di supernove o a gamma ray bursts, la forma dell'onda gravitazionale è simile a quella di un impulso

Sorgenti casuali



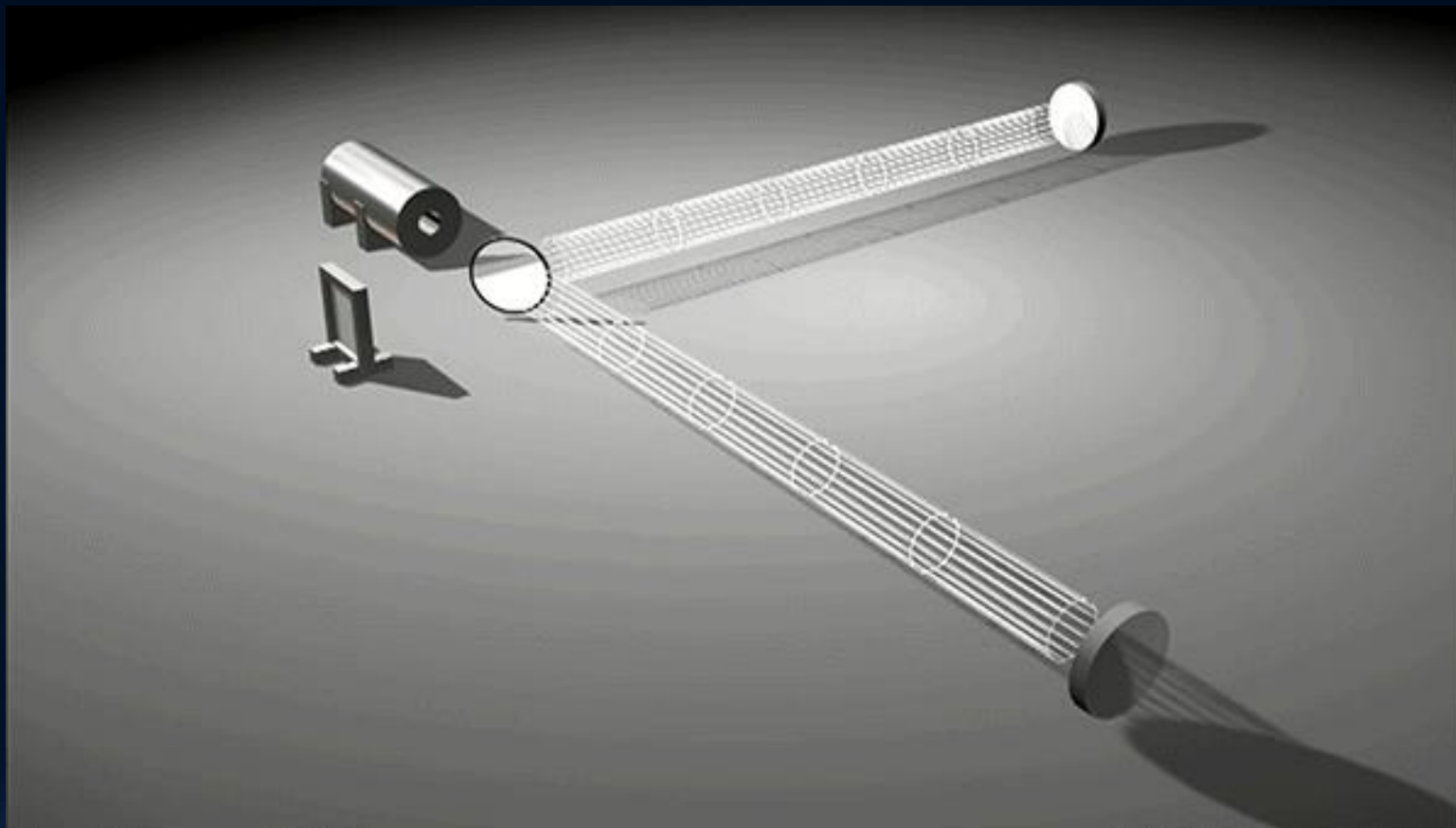
Derivano da numerose sorgenti casuali ed indipendenti che generano una sorta di onda gravitazionale cosmica di fondo, ha una forma simile a quella di un disturbo di fondo, probabilmente costituisce ciò che rimane delle onde gravitazionali formatesi dopo il Big Bang

L'effetto delle onde sulla materia



Un oggetto quando viene attraversato da un'onda gravitazionale subisce una deformazione a seguito della fluttuazione dell'accelerazione gravitazionale, questa deformazione, seppur infinitesima (circa 10^{-19}m , circa 10000 volte più piccola di un nucleo atomico), può essere utilizzata per rilevare il passaggio dell'onda

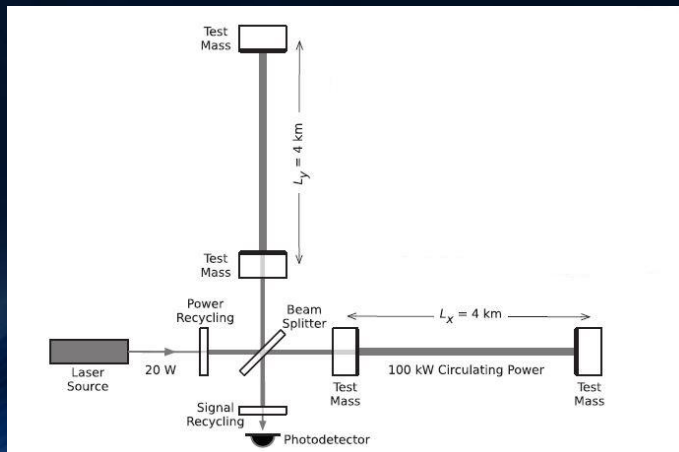
Misurare le onde gravitazionali



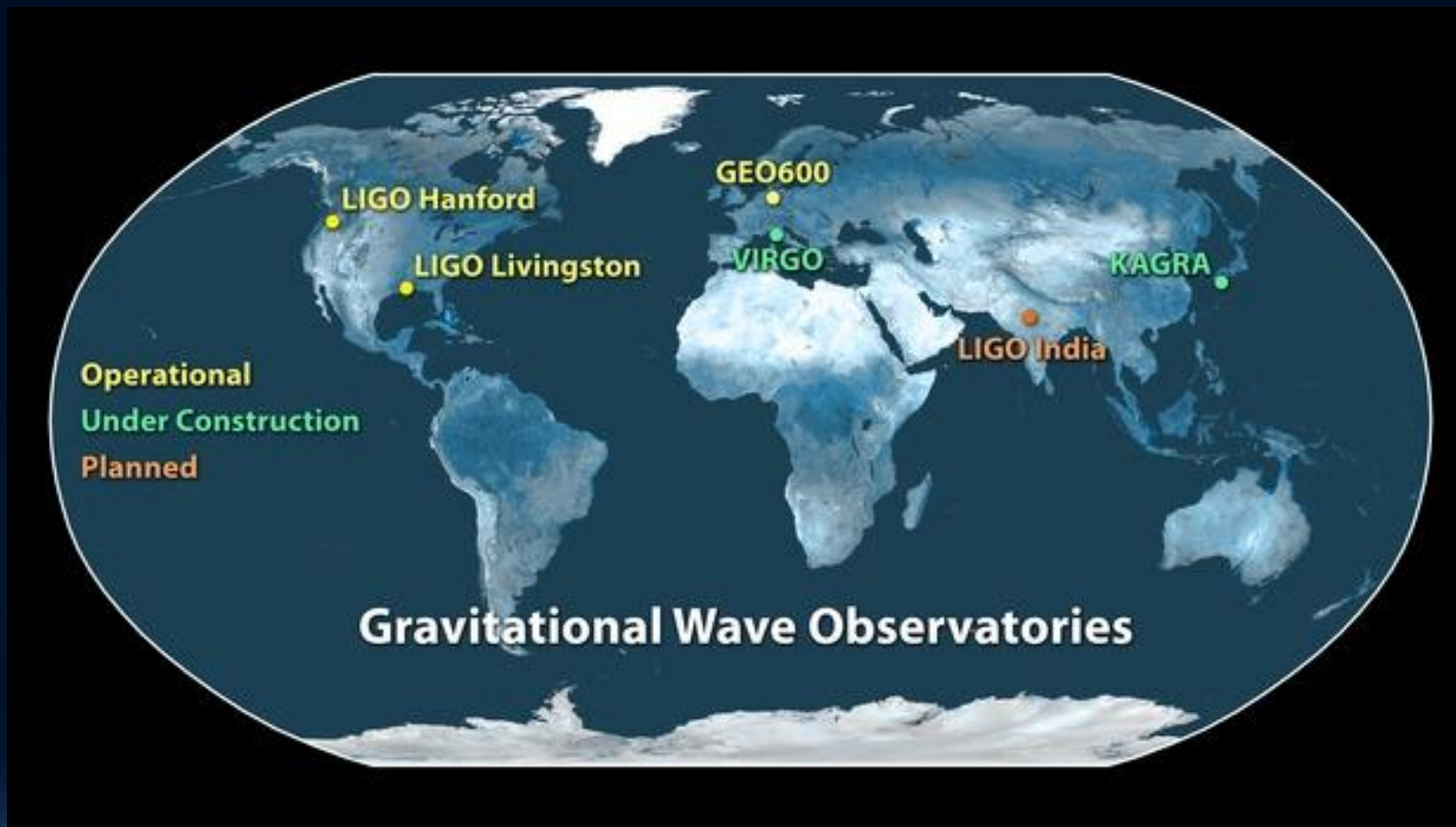
Per poter misurare il passaggio di un'onda gravitazionale è necessario essere in grado di misurare lunghezze piccolissime, per farlo si utilizzano gli interferometri, strumenti particolari che utilizzano l'interferenza tra due raggi di luce coerente per raggiungere precisioni elevatissime sulla misura di lunghezza

IL LIGO

Il LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) è l'osservatorio che per la prima volta ha osservato le onde gravitazionali. È costituito da due strutture (una a Hanford, l'altra a Livingston) entrambe formate da due lunghe camere di 4 km al cui interno è fatto il vuoto quasi assoluto (10^{-12} atm) disposte a formare una L all'interno delle quali viene fatto passare il raggio laser



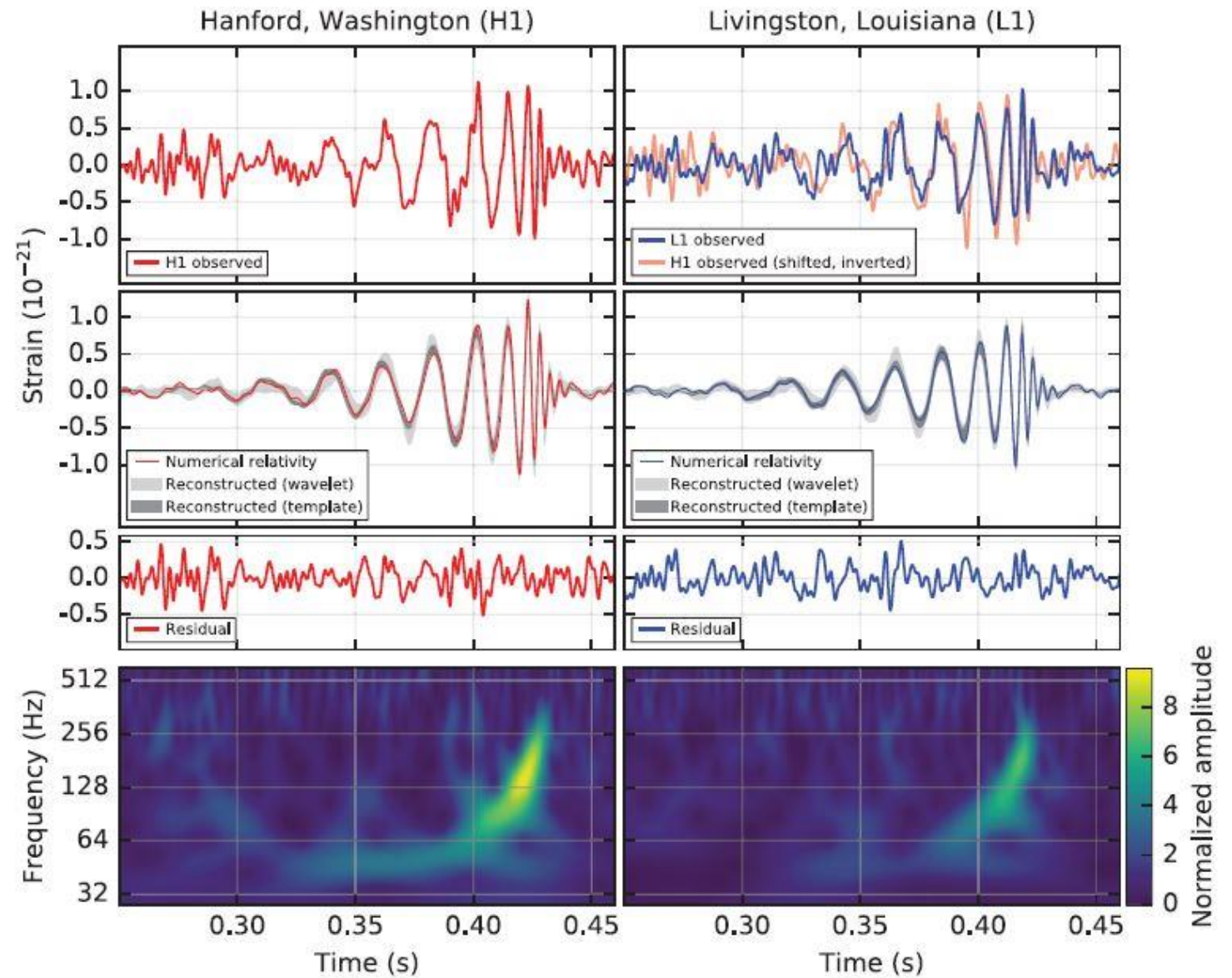
Le altre strutture simili



Oltre al LIGO sono in funzione e costruzione altre strutture simili, in questo modo si può creare una rete globale per il monitoraggio delle onde gravitazionali, così da non solo rilevare con maggior precisione il passaggio dell'onda gravitazionale, ma anche da identificarne l'origine

La prima osservazione

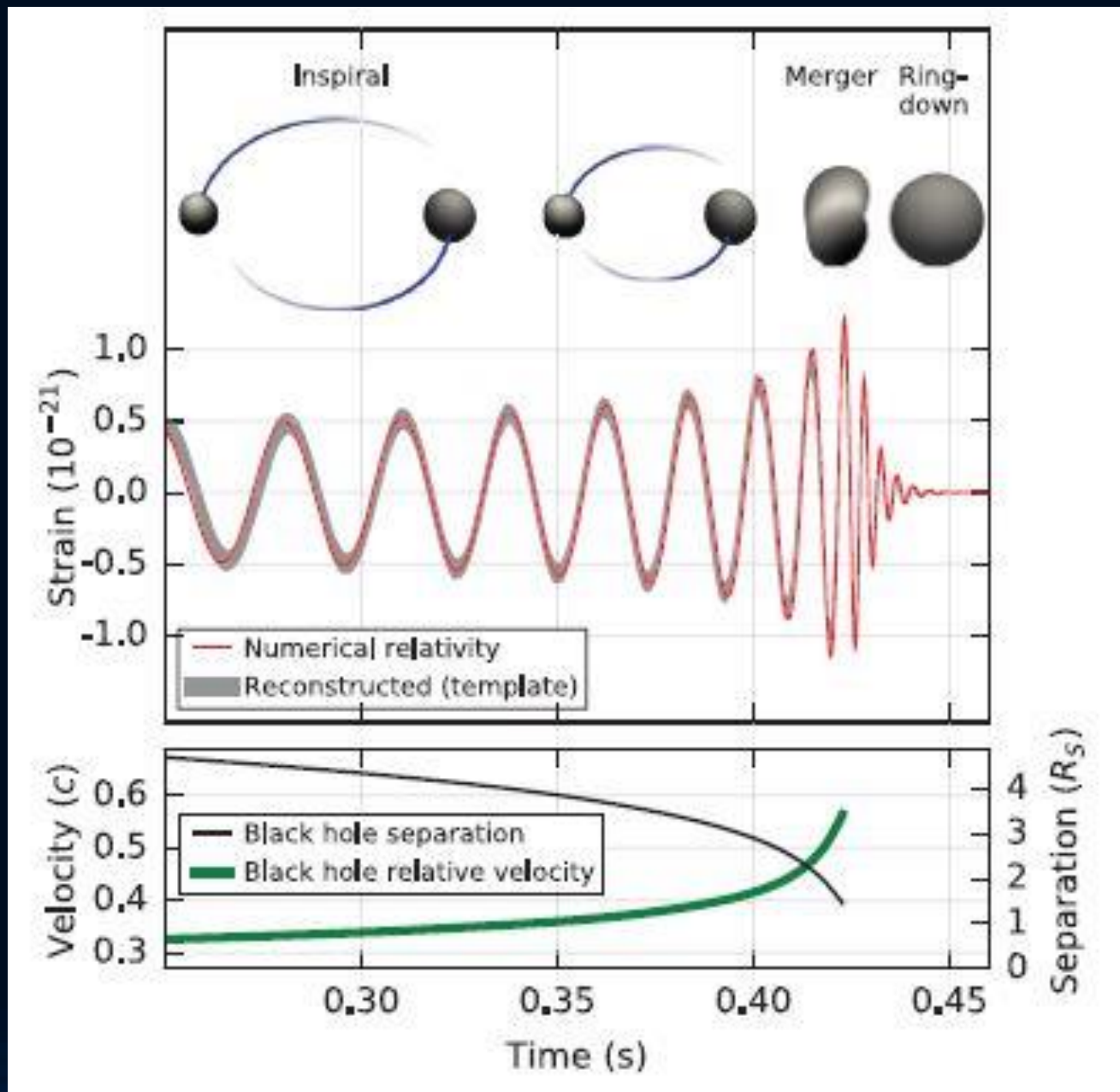
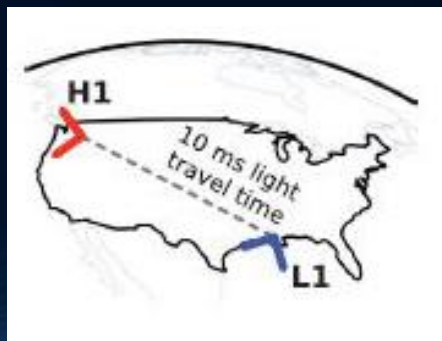
Il segnale dell'evento GW150914
osservato dalle due strutture del LIGO il
14 Settembre 2015 alle 9:50:45 UTC,
arrivato prima all'L1 e 6.9ms dopo all'H1



Il risultato ottenuto

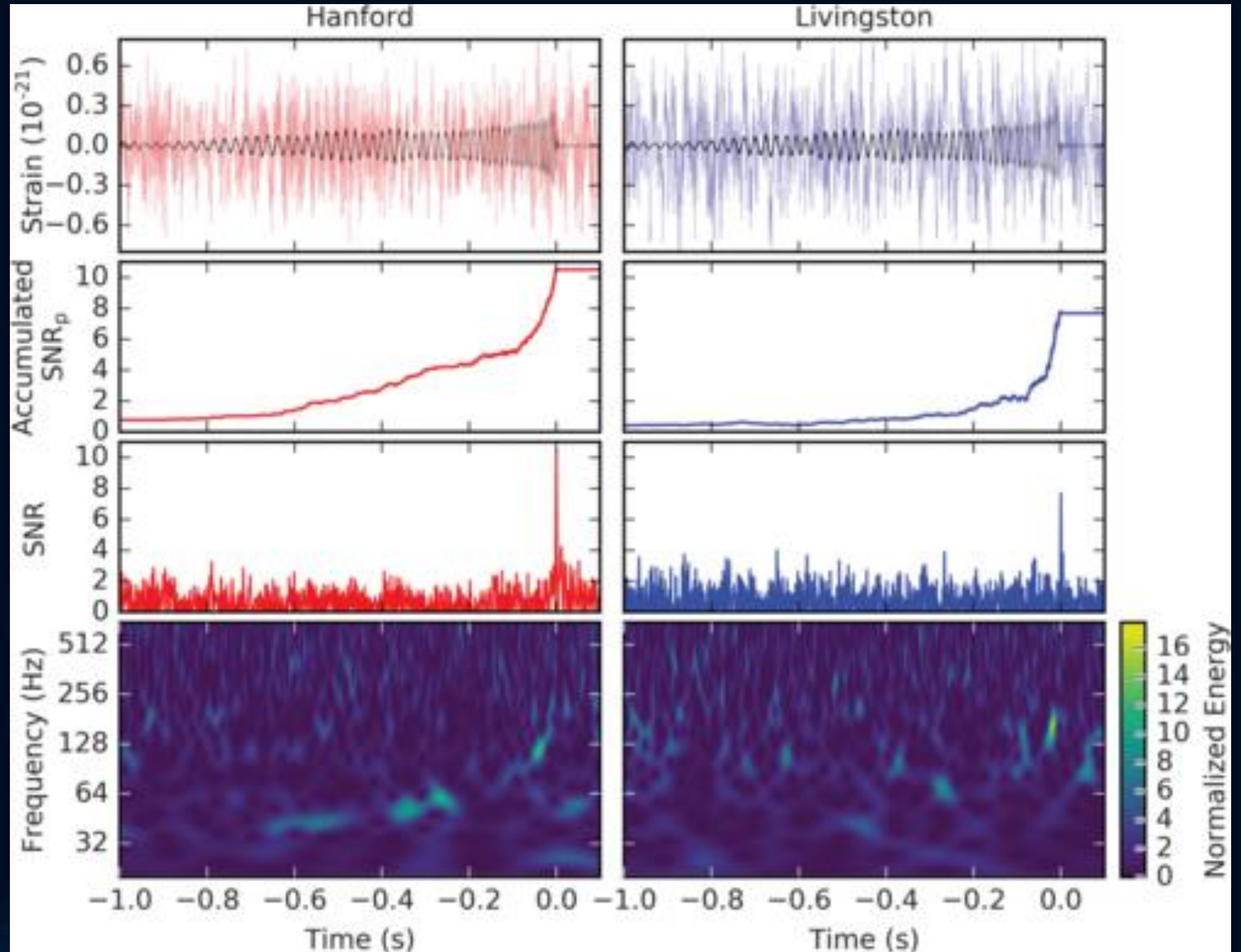
Si è osservato che le due misure sono avvenute entro i 10ms (ritardo stimato per la distanza tra i due rilevatori) e che c'è stato un incremento di frequenza (da 35 a 150Hz) avvenuto in circa 0.2s, caratteristico di un sistema di masse spiraleggianti.

Dai dati si è capito che si trattava di un sistema binario di buchi neri, uno di $\sim 30M_{\odot}$ e l'altro di $\sim 35M_{\odot}$ che si sono uniti a formare un buco nero di $\sim 62M_{\odot}$ le mancanti $\sim 3M_{\odot}$ sono finite in energia per l'onda gravitazionale.



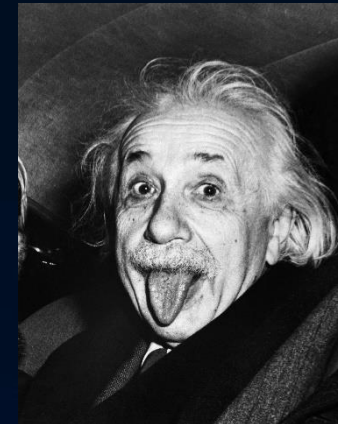
Un secondo evento

Il 26 dicembre 2015 il LIGO ha rilevato un altro evento (GW151226), in questo caso il sistema era meno massivo, formato sempre da due buchi neri ma di $14.2M_{\odot}$ e $7.5M_{\odot}$, formando un buco nero di $20.8M_{\odot}$ e solo $0.9M_{\odot}$ sono state irradiate come onda gravitazionale.



Le prime conclusioni

- Dall'osservazione di entrambi gli eventi si è capito che in entrambi i casi, per quanto riguarda le collisioni di buchi neri, circa il 4.6% della massa totale del sistema viene convertita in onda gravitazionale
- Dalla vicinanza temporale dei due eventi si è dedotto che le collisioni di buchi neri non sono eventi rari ma al contrario c'è una vasta popolazione di sistemi binari di buchi neri che danno origine a frequenti collisioni
- In entrambi i casi l'onda gravitazionale misurata era consistente con le predizioni della teoria della relatività generale in presenza di campi gravitazionali intensi, fornendo così la prima prova diretta della validità della teoria della relatività generale

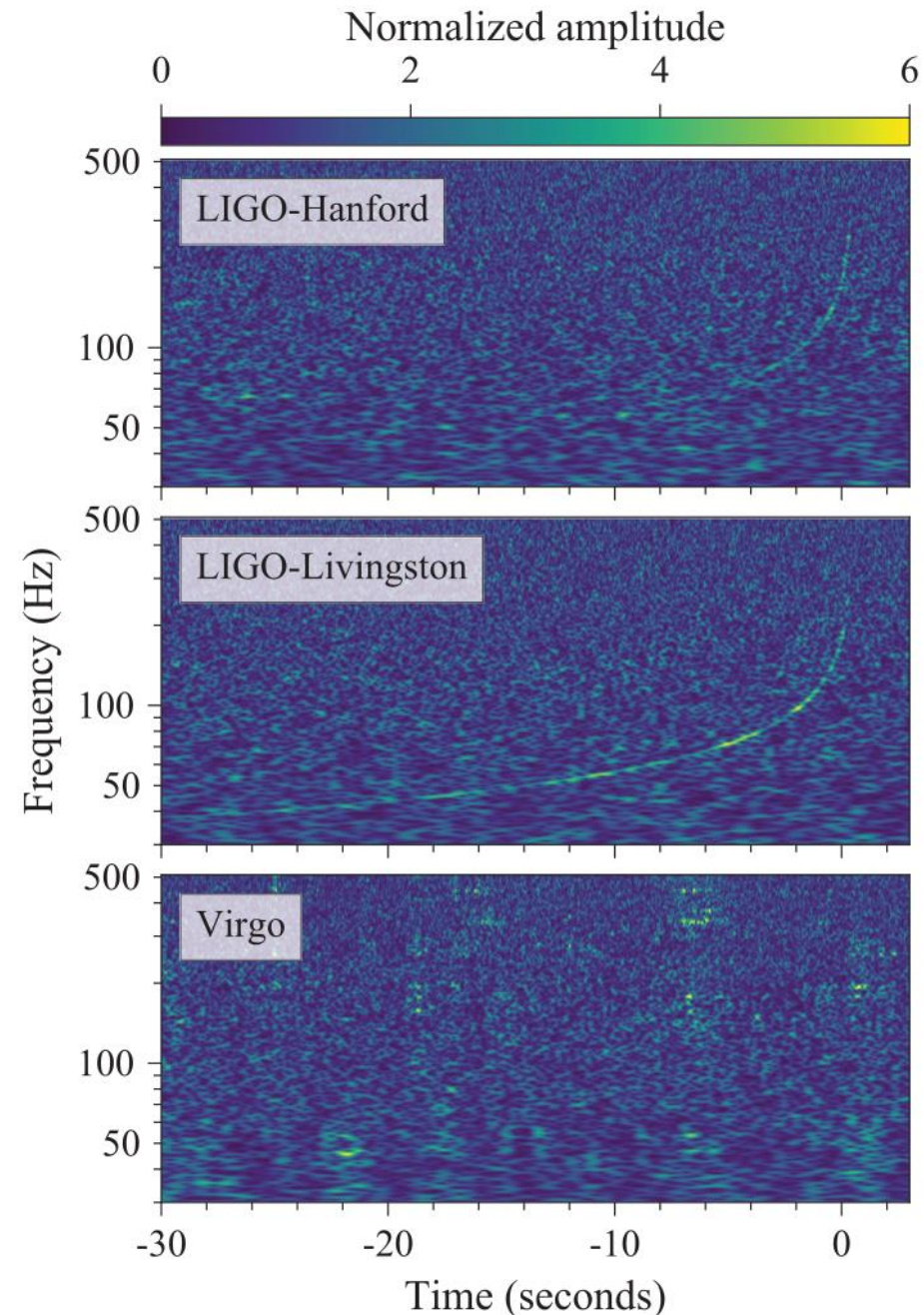


GW170817

Avvenuto il 17 Agosto 2017, per la prima volta l'evento, durato circa 100 secondi, non era legato alla collisione di due buchi neri, ma due stelle di neutroni (una con una massa compresa tra 1.36 e $2.26M_{\odot}$ e l'altra tra 0.86 e $1.36M_{\odot}$) che ne ha permesso l'osservazione anche coi metodi «tradizionali».

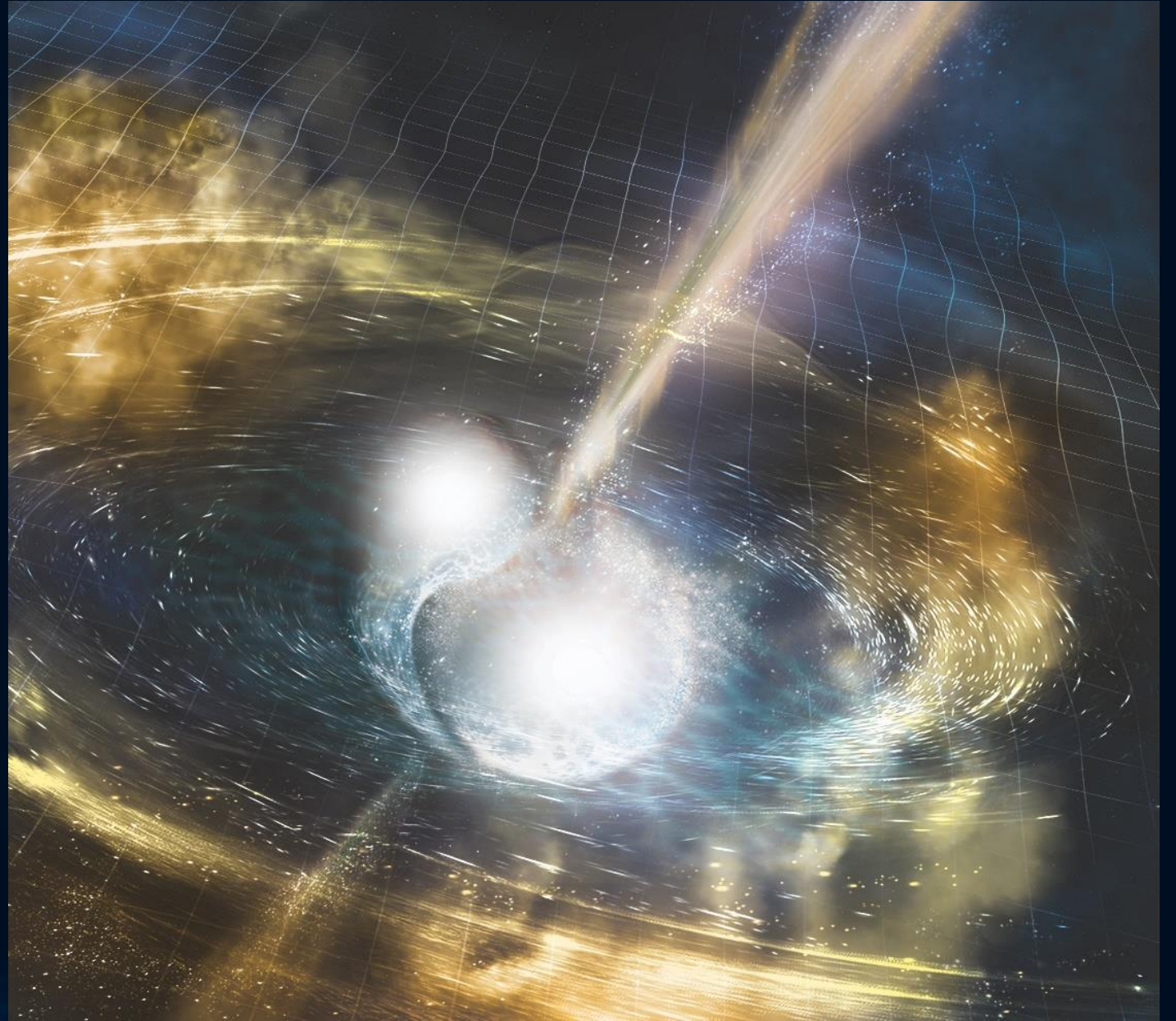
Prima è stato rilevato dal Virgo, 22ms dopo dal LIGO a Livingston e dopo altri 3ms dal LIGO di Hanford.

Dalla combinazione dei dati delle tre strutture è stato possibile triangolare il segnale e identificarne l'origine in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo meridionale (pari a 140 volte l'area coperta dalla luna piena)



Grb170817a

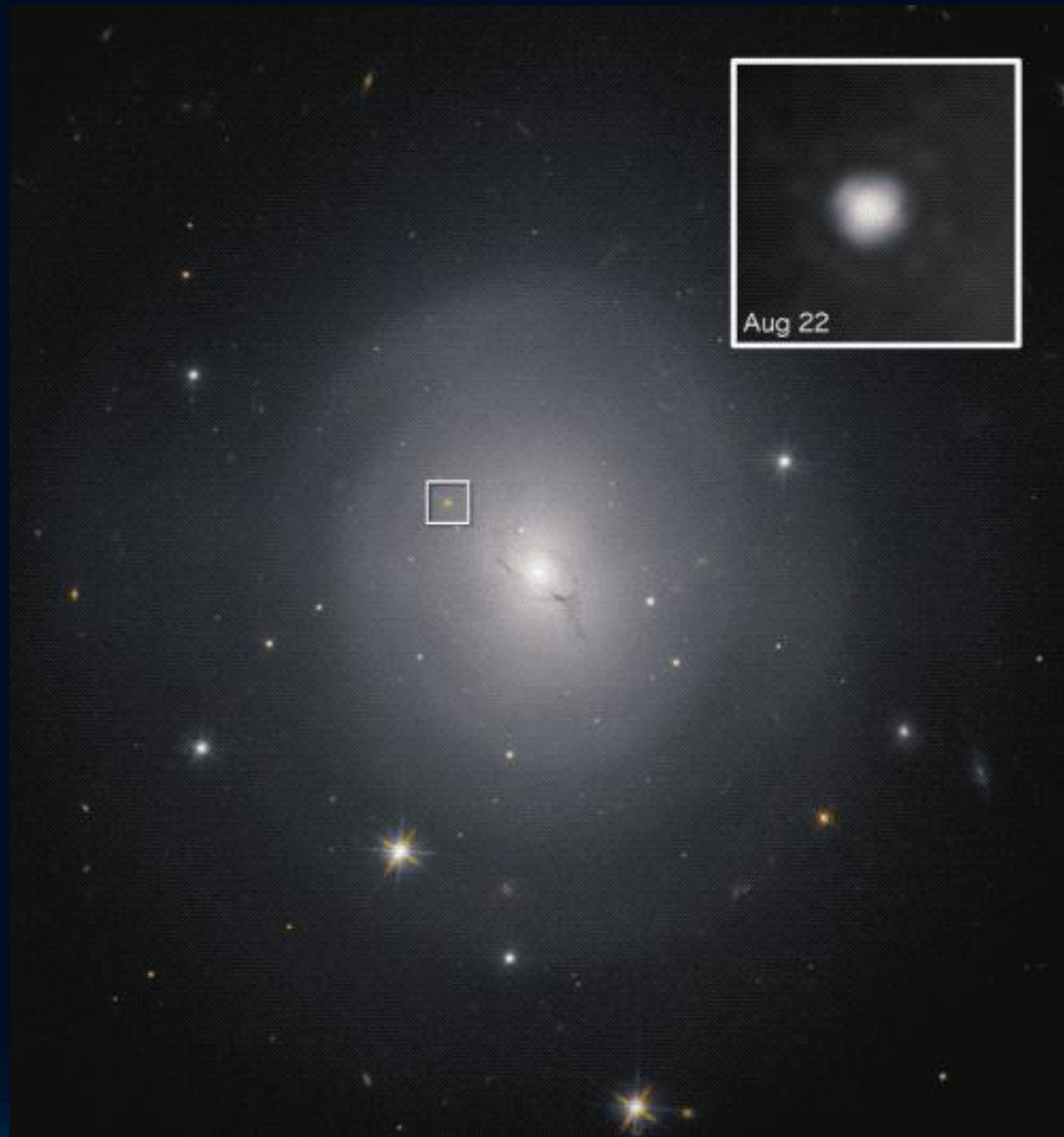
1.7 secondi dopo il termine del passaggio dell'onda gravitazionale l'evento è stato osservato anche ai raggi gamma dal Fermi gamma-ray telescope e dall'INTEGRAL gamma-ray telescope, i dati ottenuti hanno permesso di ridurre l'area ad un intorno della galassia NGC 4993 nella costellazione Idra



at2017gfo

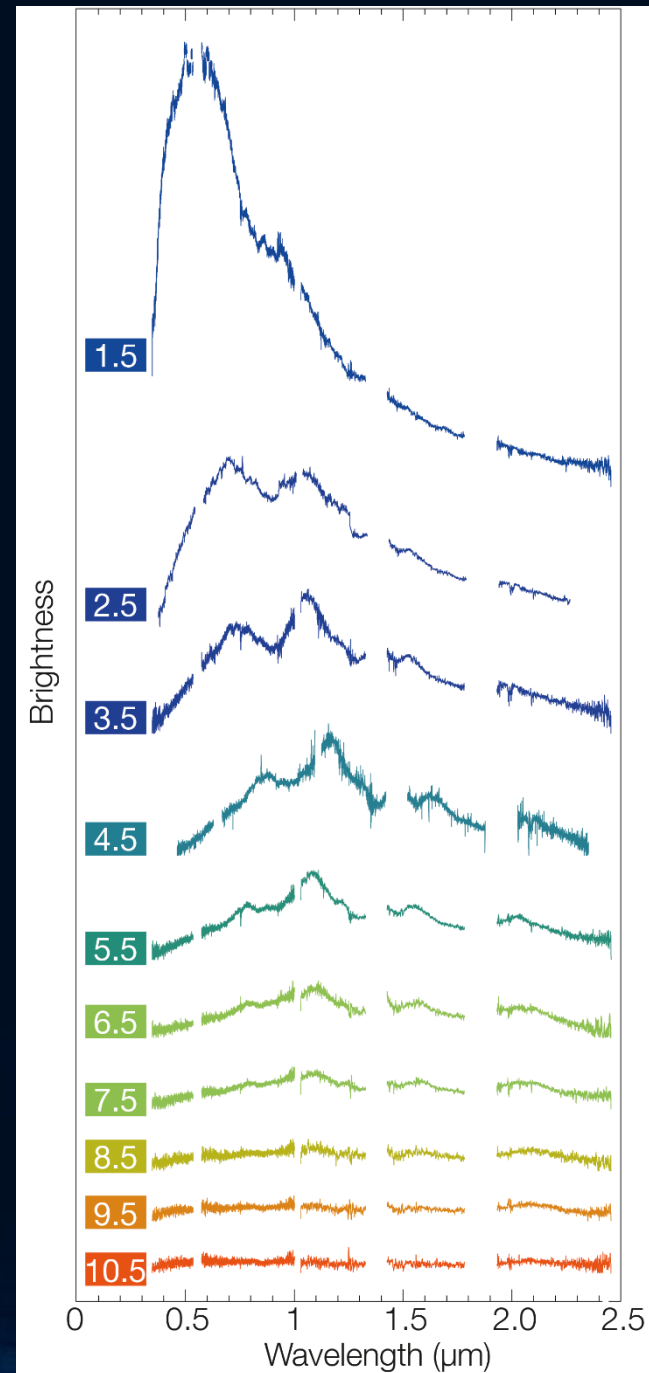
Dopo le circolari di Virgo/LIGO e di Fermi/INTEGRAL e l'identificazione dell'area di ricerca è partita la ricerca anche con gli strumenti ottici ed elettromagnetici, ricerca difficoltosa a causa delle dimensioni dell'area e per la sua vicinanza al Sole, possibile quindi solo nelle ore del crepuscolo.

10 ore e 52 minuti dopo l'evento GW il telescopio dello Swope Supernova Survey è riuscito a riprendere l'evento nel vicino infrarosso, la International Astronomical Union (IAU) ha subito rilasciato la circolare relativa all'evento AT2017gfo, permettendo ad altri 5 strumenti (DLT40, VISTA, Master, DECam, LCO) di effettuare successive misurazioni che si sono protratte nei giorni successivi



at2017gfo

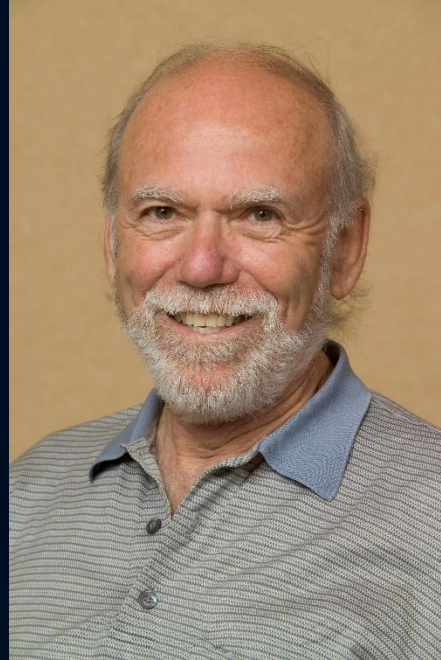
Successive osservazioni sono state effettuate dal telescopio Hubble, e 9 giorni dopo dal Chandra X-ray Observatory, che ne ha permesso l'identificazione precisa della sorgente, e 16 giorni dopo dal Very Large Array (VLA), per arrivare infine ad un totale di 70 osservatori per coprire il solo spettro elettromagnetico



I risultati ottenuti

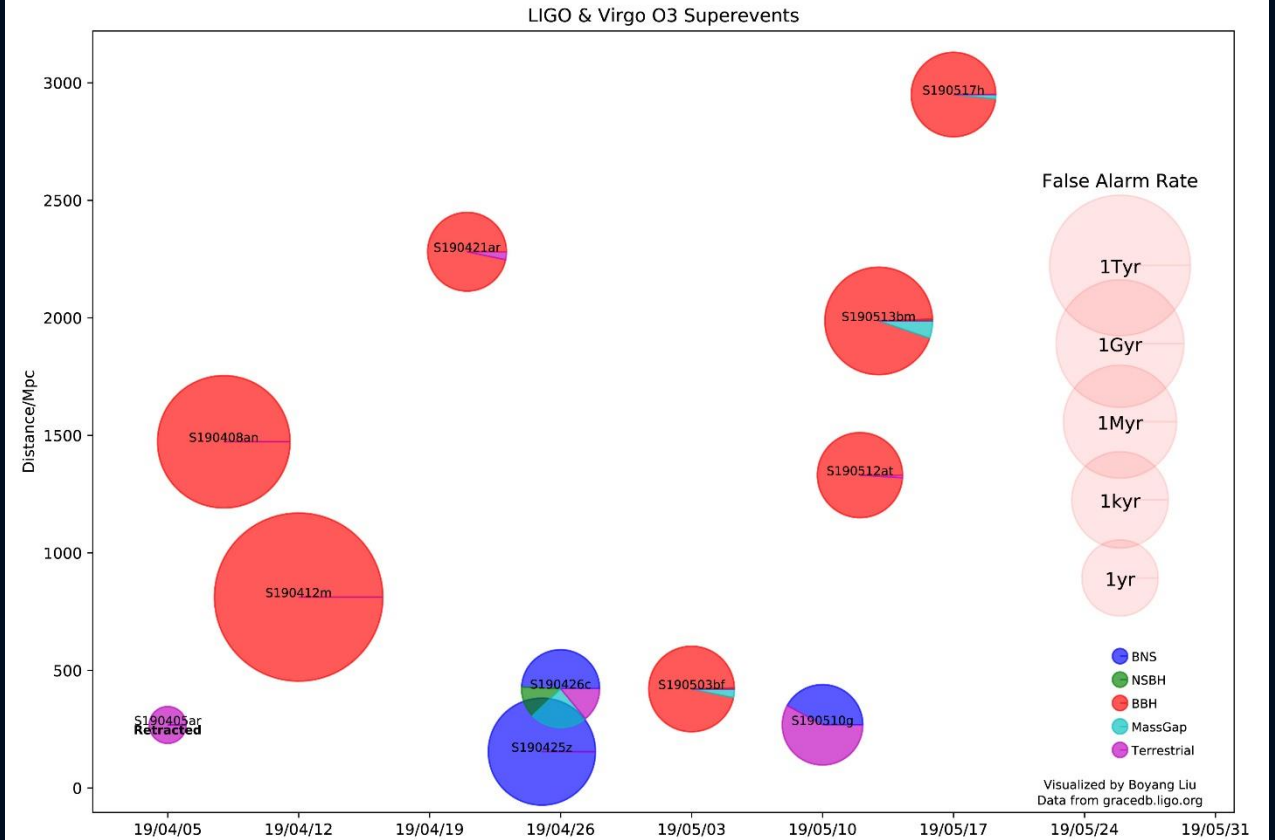
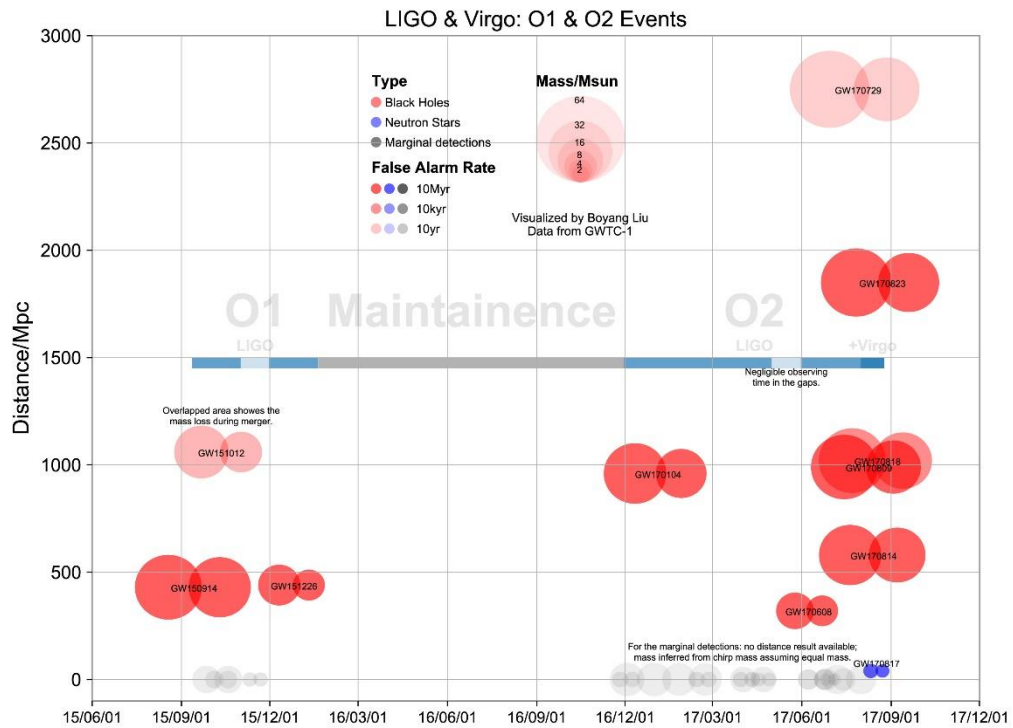
- L'evento GW₁₇₀₈₁₇ ha fornito il primo esempio di osservazione multi-messaggio, fornendo anche un'ulteriore validità al metodo delle onde gravitazionali per lo studio degli oggetti celesti
- Rappresenta inoltre la migliore osservazione mai eseguita di un evento di kilonova (collisione di due oggetti stellari densi e compatti), e ha fornito la prova che eventi di questo tipo sono la sorgente di gamma-ray bursts di breve durata
- Ha fornito informazioni utili ad escludere teorie alternative alla relatività generale
- Eventi come GW₁₇₀₈₁₇ possono essere utilizzati come misura indipendente della costante di Hubble (utilizzata nella formula di Hubble che lega il redshift con la velocità)
- Le osservazioni elettromagnetiche sono concordi con la teoria che prevede che siano eventi di questo tipo a generare gli elementi più pesanti del ferro (es. oro e platino)

Premio nobel per la fisica

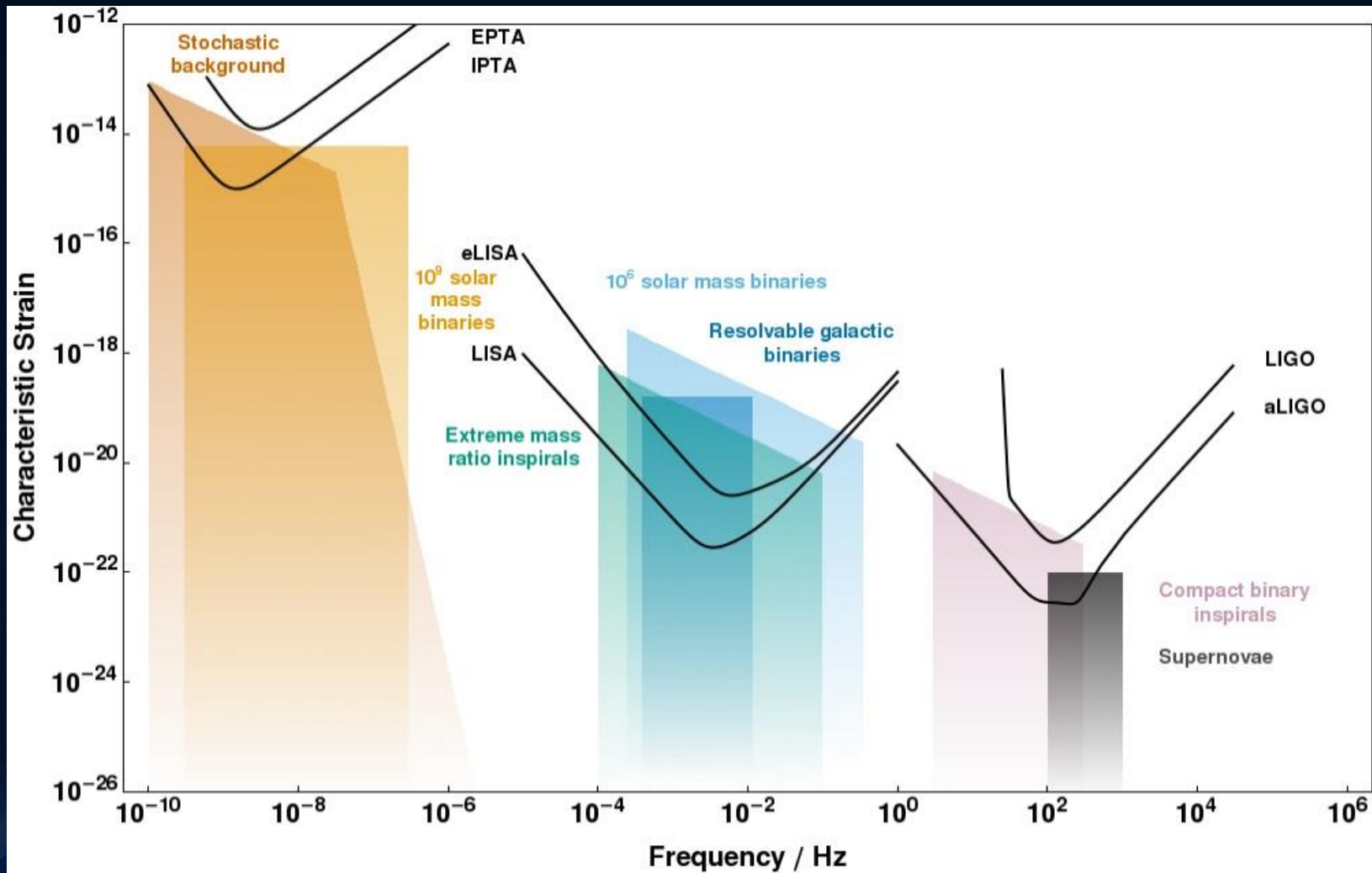


Il premio Nobel per la fisica del 2017 è stato assegnato a Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne per il loro contributo al LIGO detector e l'osservazione delle onde gravitazionali

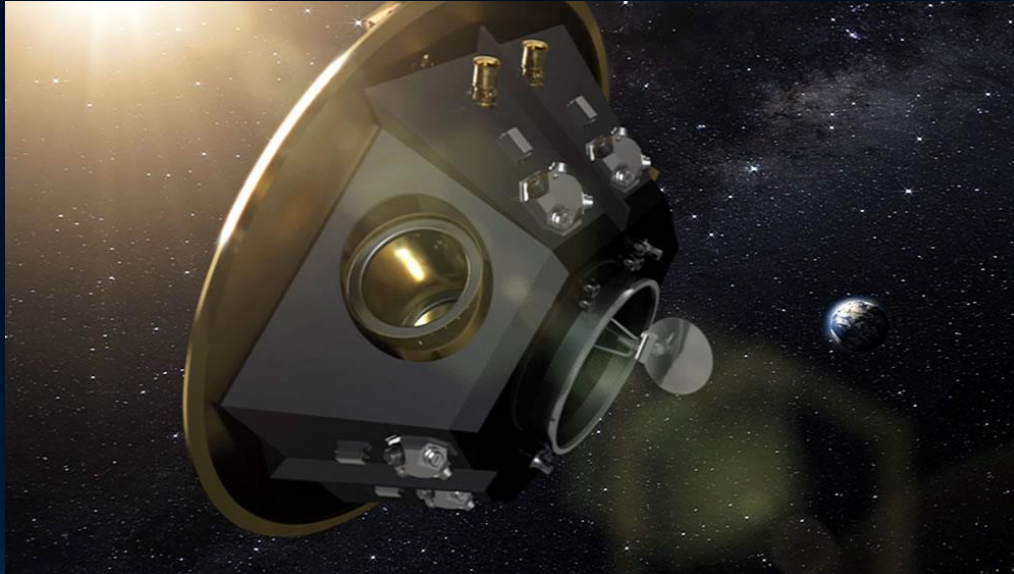
Misurazioni successive



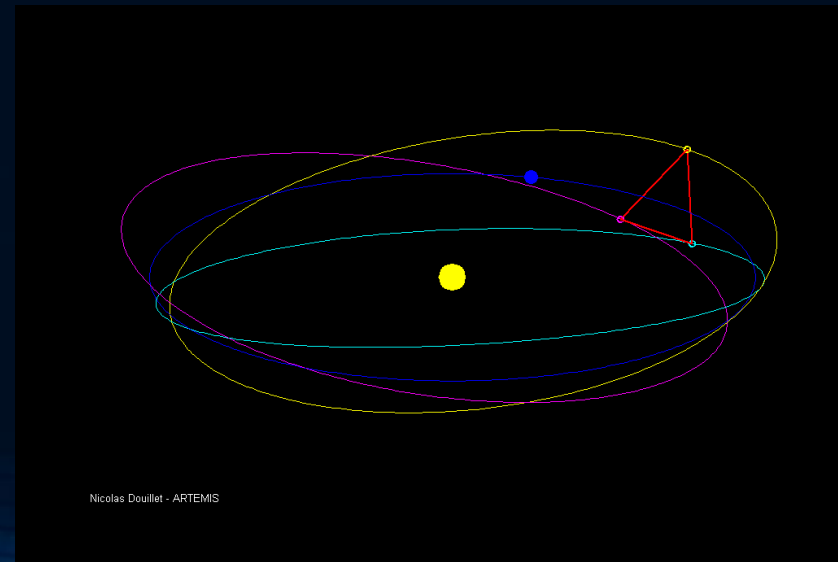
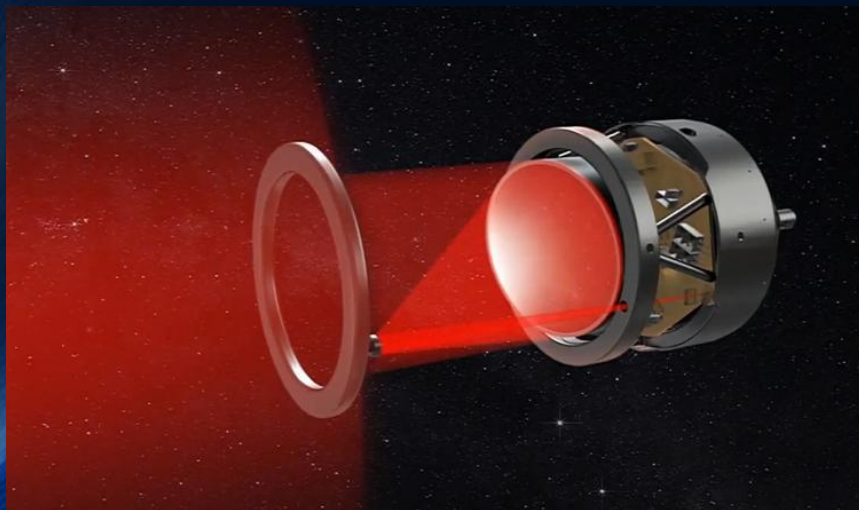
I limiti strumentali



Il Passo successivo: l'osservatorio spaziale

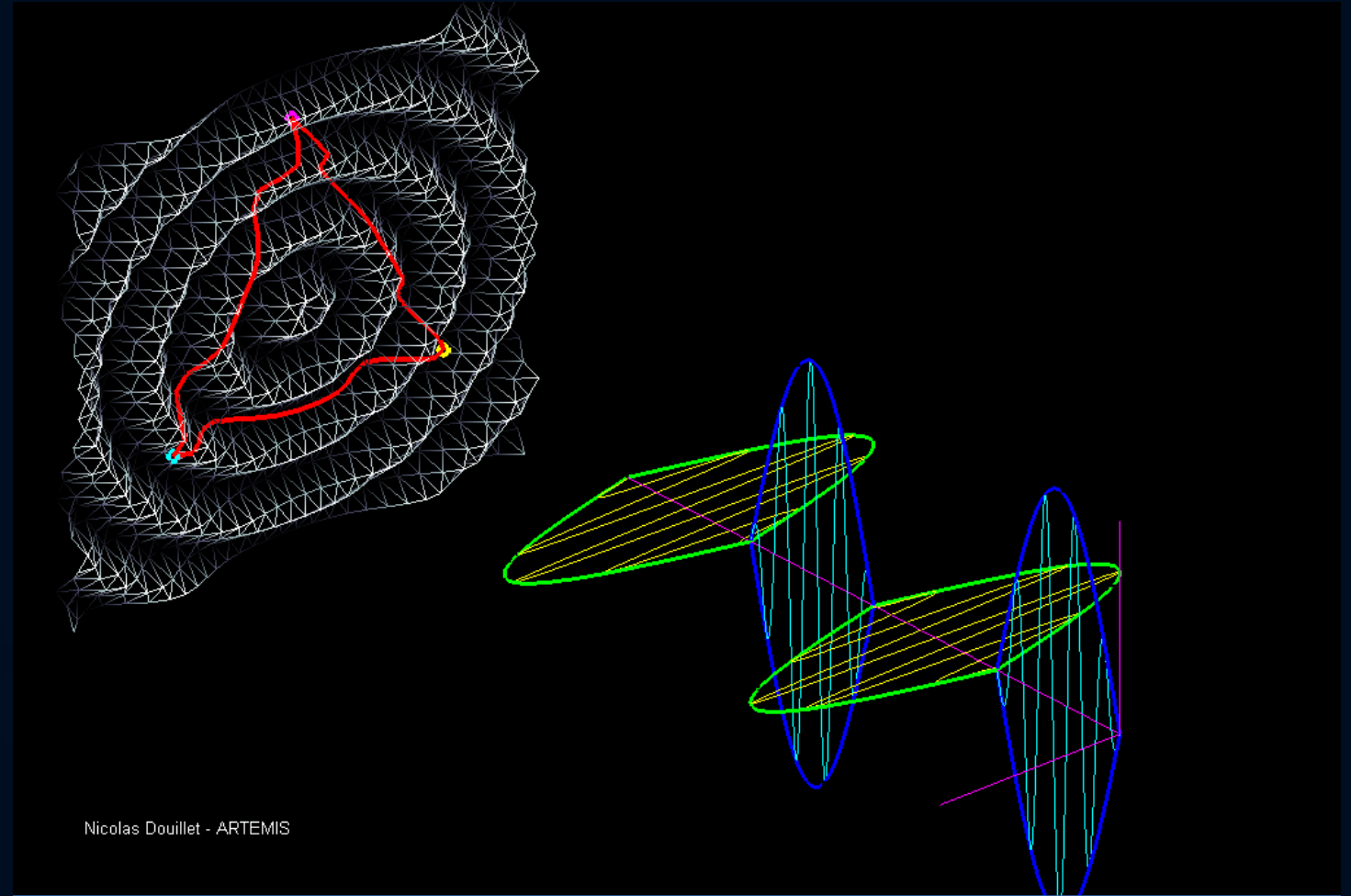


L'ESA ha in programma di mettere in orbita nel 2034 l'eLISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna), costituito da tre satelliti posti in formazione a triangolo equilatero con un'orbita eliocentrica in modo che il centro della formazione sia sul piano dell'eclittica ad 1AU dal Sole e 20° dietro alla Terra.

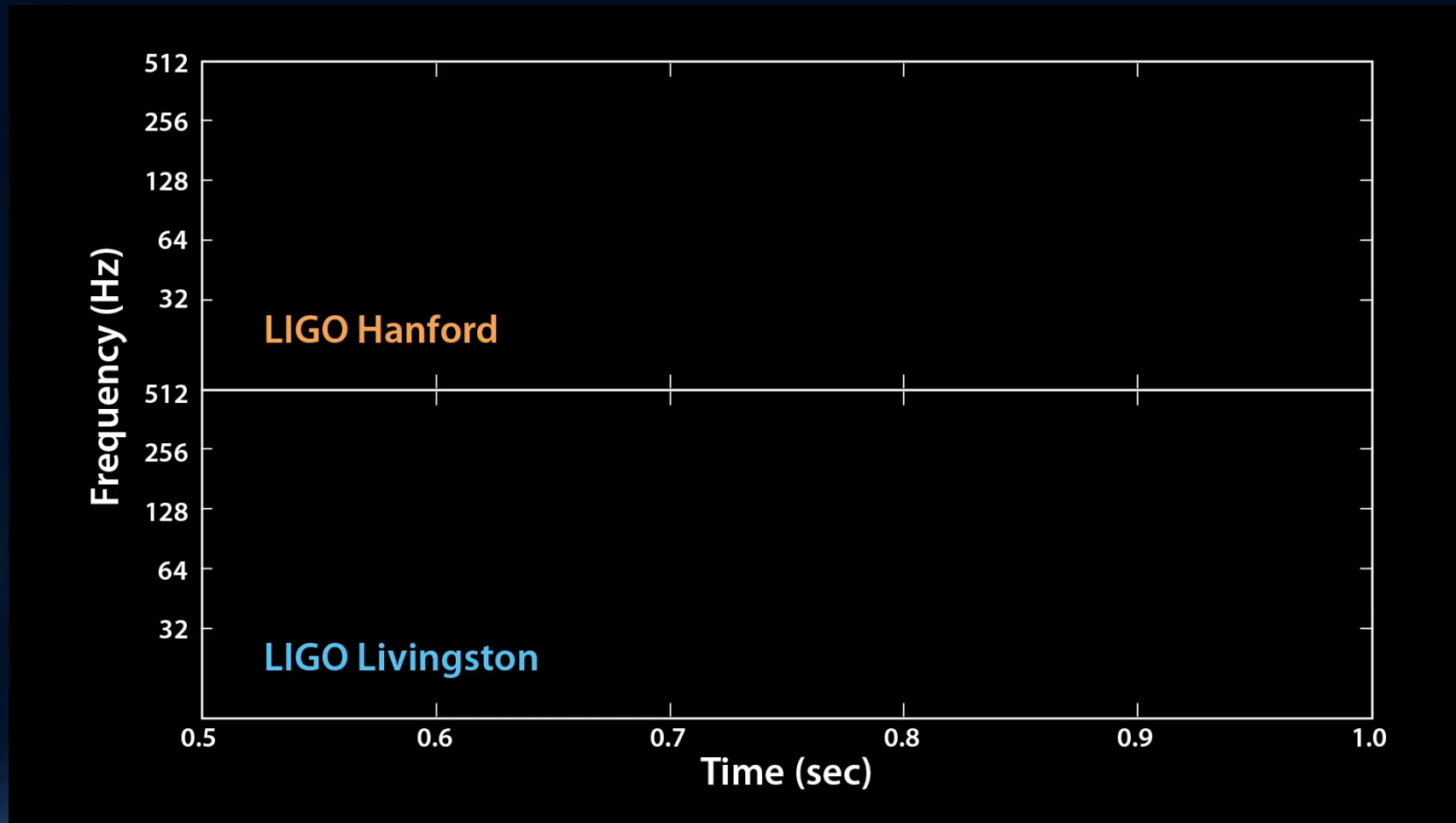


elisa

La distanza tra la nave madre e le due navi figlie è pari a 10^6 km (un milione di km), un interferometro con un braccio simile non è realizzabile sulla Terra, questo permetterà ad eLISA di misurare onde gravitazionali con un'ampia banda di frequenze (0.1mHz – 1Hz, la banda più ricca di sorgenti di onde gravitazionali) che permetterà di studiare sistemi binari della nostra galassia, extreme mass ratio inspirals e sistemi binari di buchi neri supermassivi nei centri di altre galassie, impossibili da studiare con strumenti simili al LIGO



Concludiamo con il segnale, convertito in impulso sonoro, dell'onda gravitazionale rilevata dal LIGO il 14 settembre 2015



Grazie per l'attenzione