

La Musica delle Stelle:

Suoni di Onde Gravitazionali tra Scienza e Musica

Francesco Di Renzo, IP2I Lyon

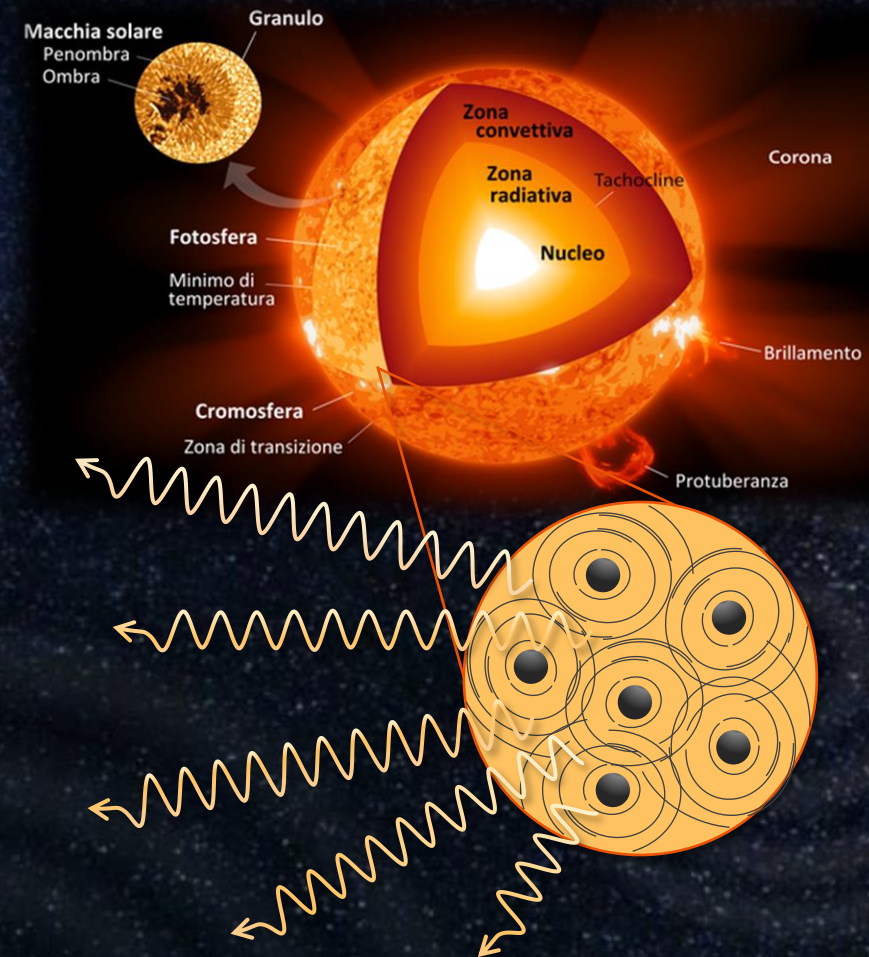
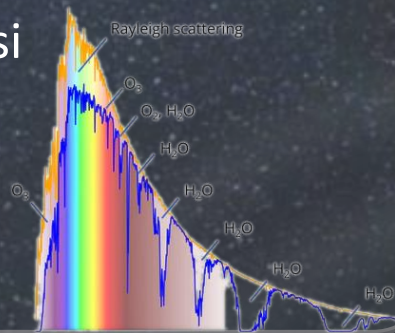
PID @ EGO 2024



Onde elettromagnetiche e gravitazionali

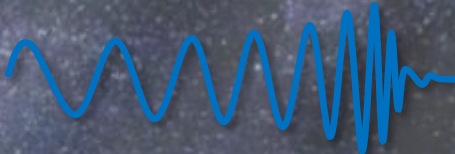
Onde elettromagnetiche

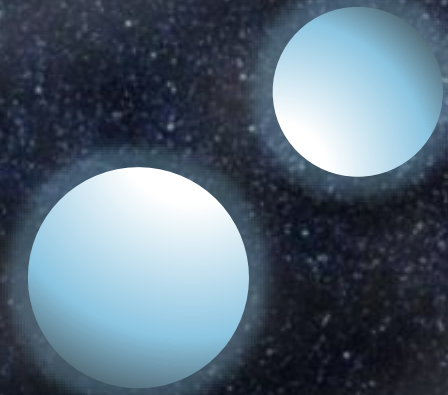
- ✧ Le onde elettromagnetiche sono emesse dal *movimento locale* di cariche elettriche
- ✧ Posso creare **immagini** della sorgente macroscopica che contiene le cariche
- ✧ L'emissione avviene in modo incoerente: le onde emesse hanno differenti frequenze e differenti fasi
- ✧ Una stella come il Sole emette uno spettro di frequenze.



Onde elettromagnetiche e gravitazionali

Onde gravitazionali

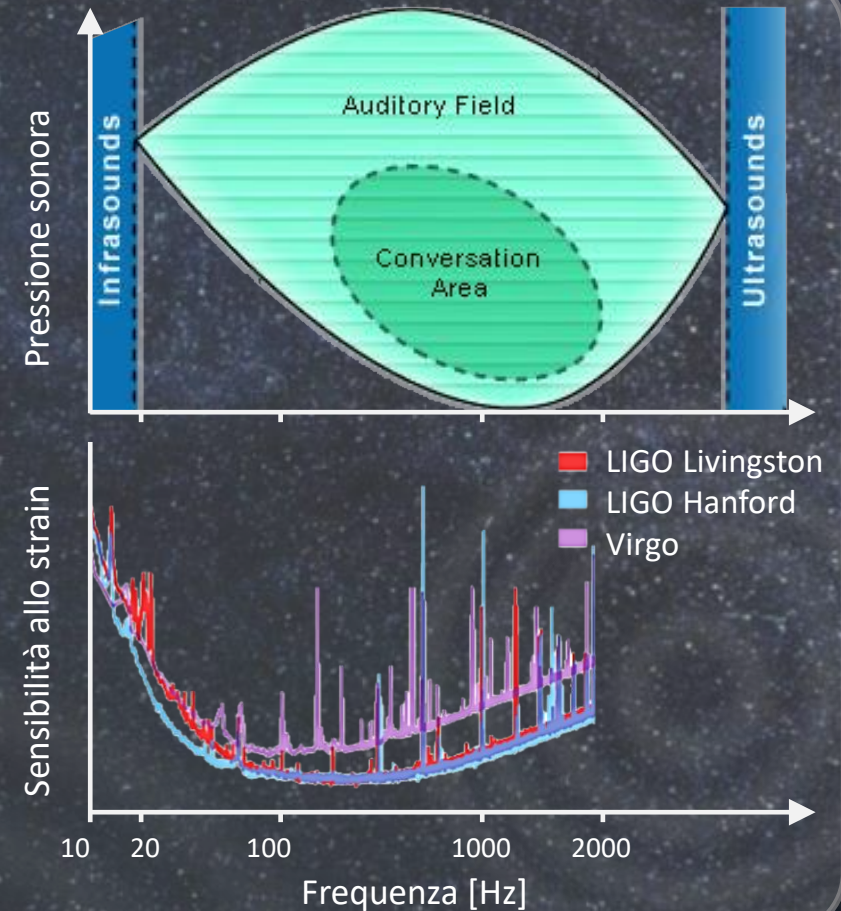
- ☾ Le onde gravitazionali sono prodotte dal *movimento coerente* della sorgente
- ☾ Hanno una forma d'onda ben definita 
- ☾ Hanno lunghezze d'onda tipicamente maggiori delle dimensioni della sorgente
- ☾ Non possono essere usate per creare immagini ma danno una **percezione della sorgente simile a quella di un suono.**



I rivelatori di onde gravitazionali

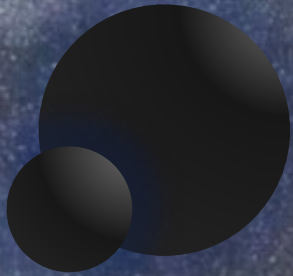
☾ I rivelatori di onde gravitazionali sono le Nostre "orecchie" per lo studio del cosmo

☾ I rivelatori interferometrici terrestri hanno un range di frequenze in cui sono maggiormente sensibili simili al range uditivo umano.



Stelle compatte come sorgenti di onde

Buchi neri



- ☾ Si formano alla fine del ciclo di vita di stelle di masse superiori a 40 volte quella del Sole, o dalla fusione di altre stelle compatte
- ☾ Hanno masse comprese tra 5 e 150 volte quella del Sole, ma raggi pari a 20 ÷ 200 km
- ☾ Assorbono tutta la luce, curvano lo spaziotempo

Stelle di neutroni



- ☾ Si formano da stelle di massa compresa tra 8 e 40 volte quella del Sole
- ☾ Hanno masse pari a circa una volta e mezzo quella del Sole, e raggi di 10 km (un cucchiaino di materia pesa quanto l'Everest)
- ☾ Emettono solo una flebile luce ma possono avere intensi campi magnetici che fanno da "faro" (pulsar)

Stelle compatte come sorgenti di onde (trivia)

Buchi neri



- ☞ Curvano lo spaziotempo creando lenti gravitazionali
- ☞ Riesci a vedere dietro di loro
- ☞ Possono avere un disco di accrescimento

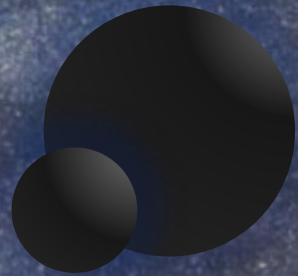


Stelle di neutroni



- ☞ La superficie visibile di fronte è pari a $2/3$ del totale (quanto per una palla?)
- ☞ Un anno passato sulla superficie della stella corrisponde a 14 mesi sulla Terra
- ☞ Quando si fondono producono tutti gli elementi dal Nb^{41} (incluso l'oro)

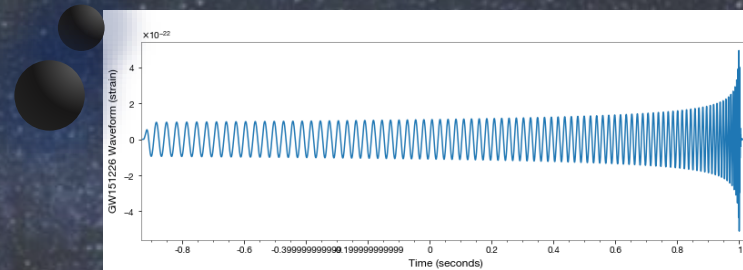
Segnali da buchi neri



- ☞ Secondo la Relatività Generale, il segnale predetto dalla coalescenza di due buchi neri ha una forma d'onda simile a quella di un "chirp"
- ☞ A buchi neri più massicci corrisponderanno segnali più brevi e con frequenze massime più gravi, e viceversa

- ☞ Molti altri dettagli sono codificati nella forma d'onda (spin, incinazione, ...)
- ☞ Possiamo convertire il dato misurato o simulato dello strain in un file audio

Buchi neri di massa totale 20 M



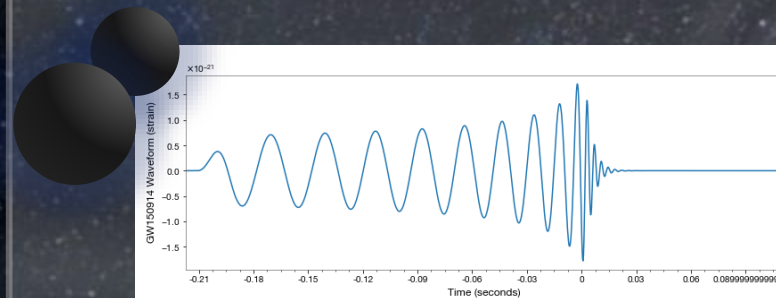
Template



Template shiftato (+400 Hz)



Buchi neri di massa totale 65 M



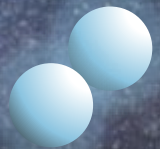
Template



Template shiftato (+400 Hz)



Segnali da stelle di neutroni

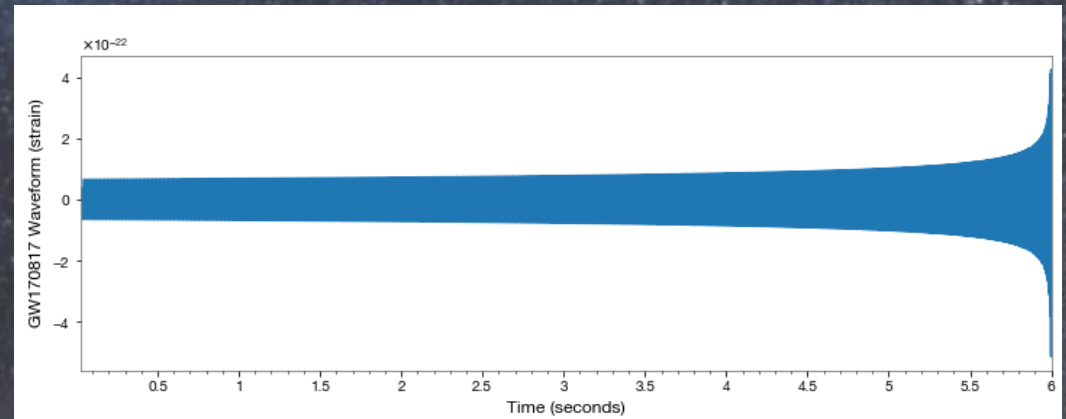



☞ Come ci si aspetterebbe da buchi neri molto molto leggeri ($1.4+1.4 M_{\odot}$), sono segnali molto lunghi e che possono raggiungere frequenze più elevate

☞ A differenza dei buchi neri, caratterizzati unicamente da massa e spin, le stelle di neutroni possono avere molti più parametri intrinseci che ne descrivono la struttura.



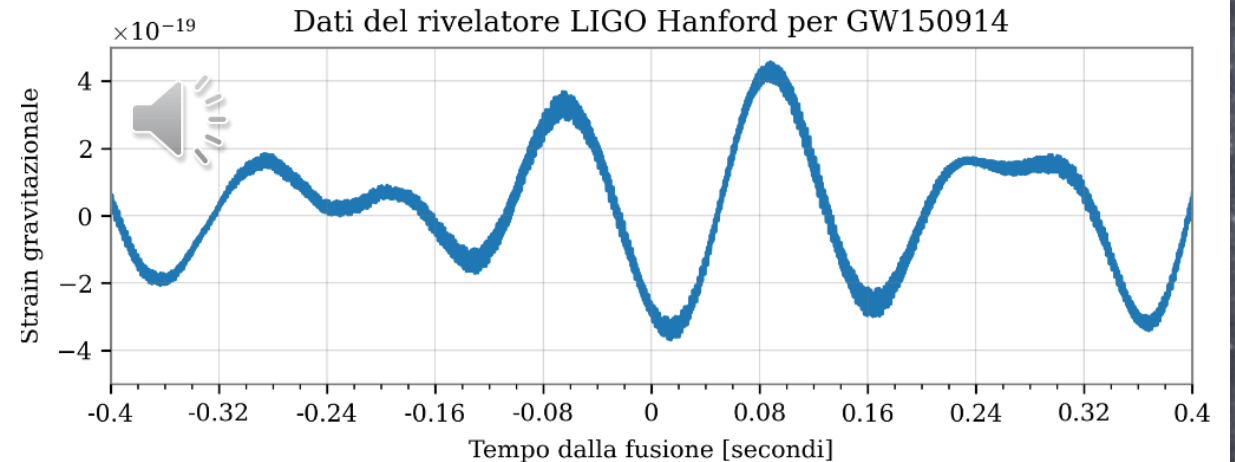
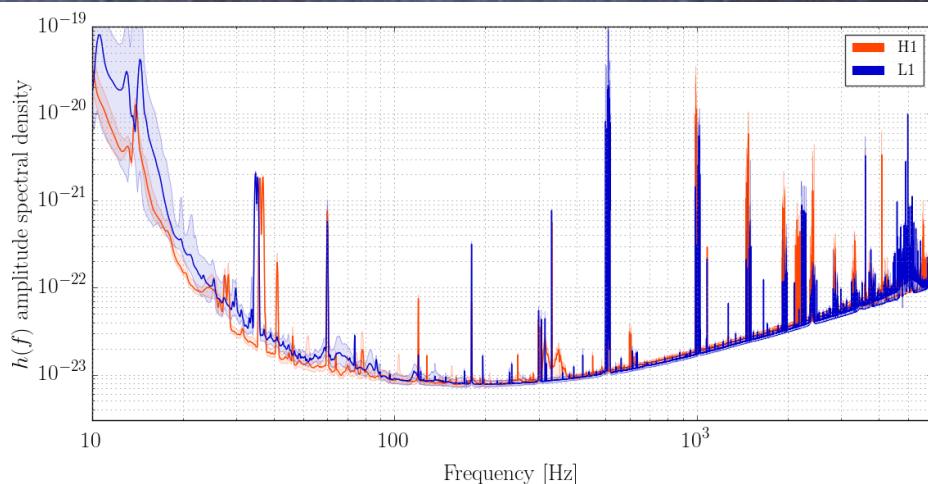
GW170817 – La prima rivelazione di una coalescenza di stelle di neutroni



Template 

Ricordiamoci del rumore...

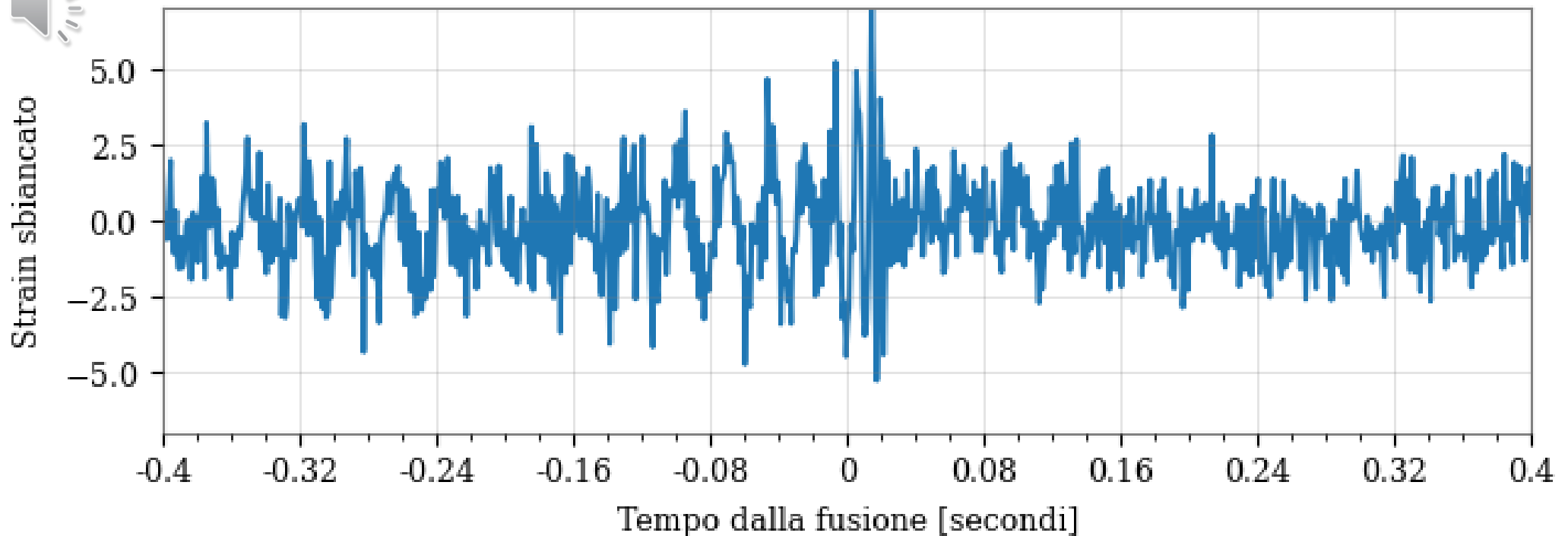
- ☞ Anche il rumore del rivelatore ha il suo suono caratteristico:
 - ha componenti spettrali continue, con andamenti distinti a bassa e alta frequenza
 - presenta anche linee spettrali in corrispondenza di risonanze dell'apparato
- ☞ Il suono del rumore di fondo sovrasta quel del segnale gravitazionale presente nei dati
- ☞ Per enfatizzare il segnale astrofisico sono necessarie alcuni filtri e trasformazioni...



Dati sbiancati



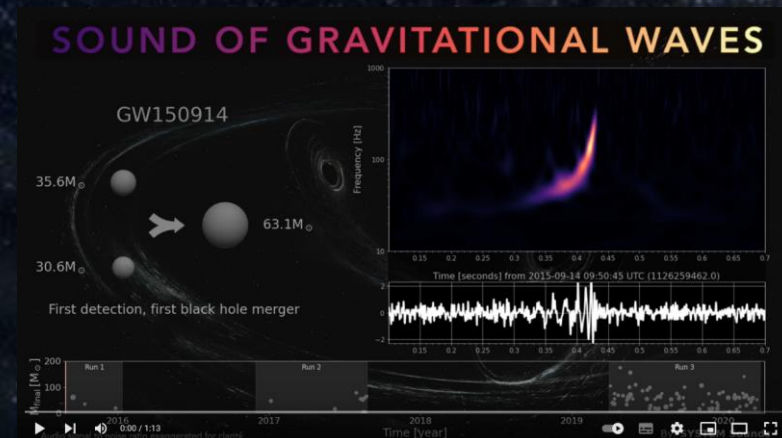
Dati del rivelatore LIGO Hanford per GW150914



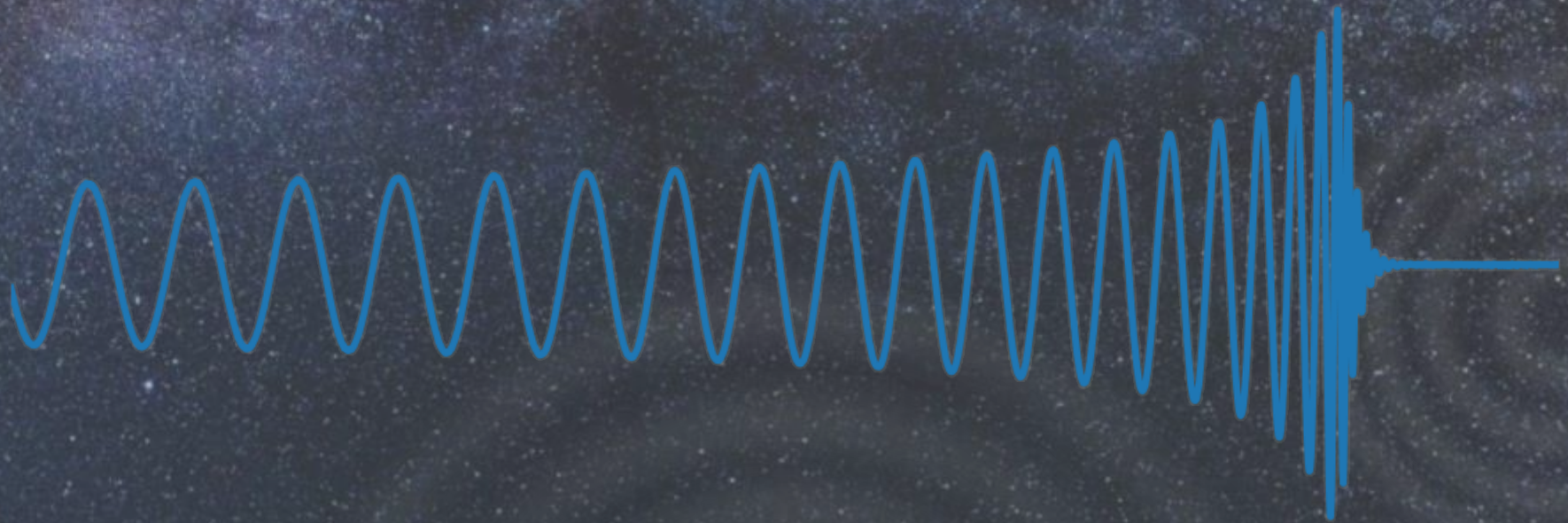
Segnali gravitazionali in formato audio

- 🔗 File audio per I primi 11 eventi rivelati (GWTC-1): template e segnali nei rivelatori. [Link](#)
- 🔗 File audio dei primi 4 eventi e loro trasformazioni. [Link](#)
- 🔗 Approfondimento sui suoni. [Link](#)
- 🔗 Codice in python per creare I suoni di segnali gravitazionali, reali e simulate. [Link](#)
- 🔗 Blackhole hunter. [Link](#)
- 🔗 Sounds of Spacetime. [Link](#)

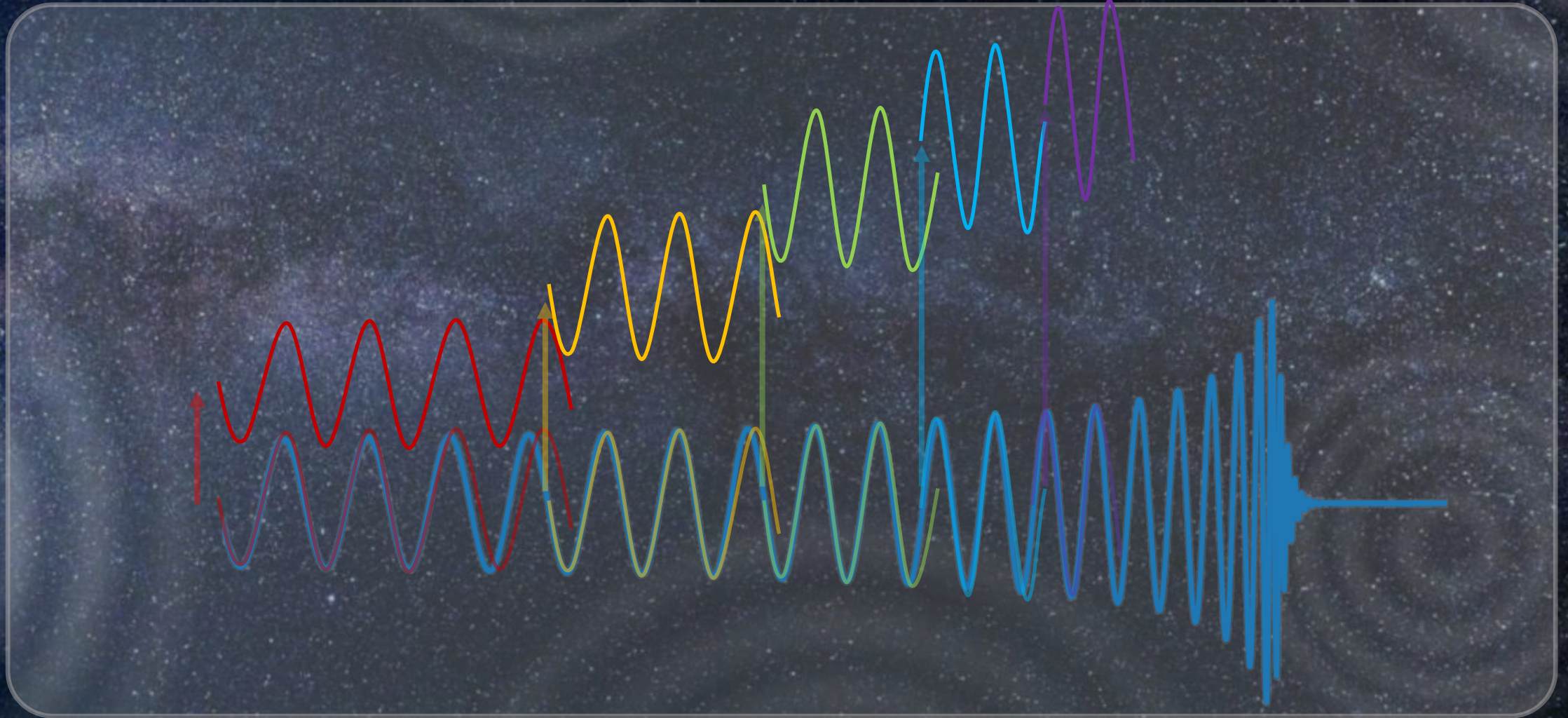
Audio Files				
The binary black hole merger events that LIGO has detected are in the audio band. They can be converted to sound (.wav) files, so that you can hear them.				
Audio Type	GW150914	LVT151012	GW151226	GW170104
Data: whitened, bandpassed				
Data: Whitened, bandpassed, frequency shifted +400 Hz				
Waveform template derived from GR, whitened				
Waveform template derived from GR, whitened, frequency shifted +400 Hz				



Analizziamo il segnale gravitazionale

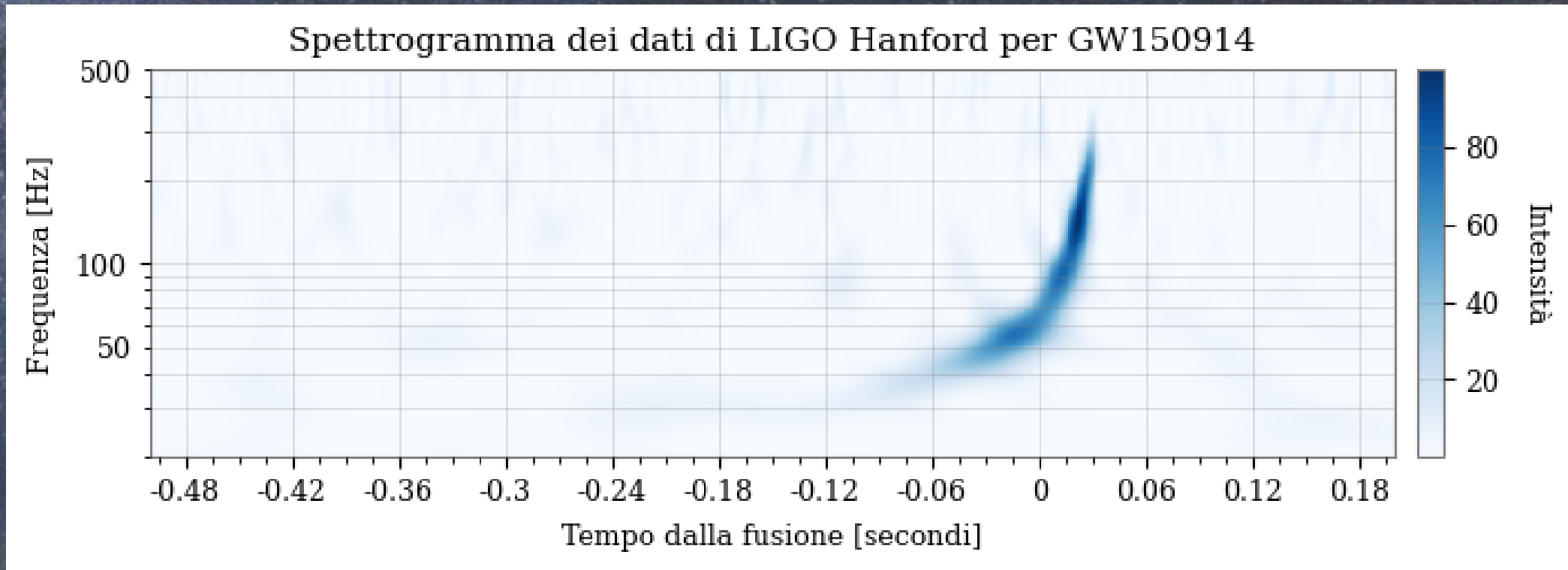


Analizziamo il segnale gravitazionale



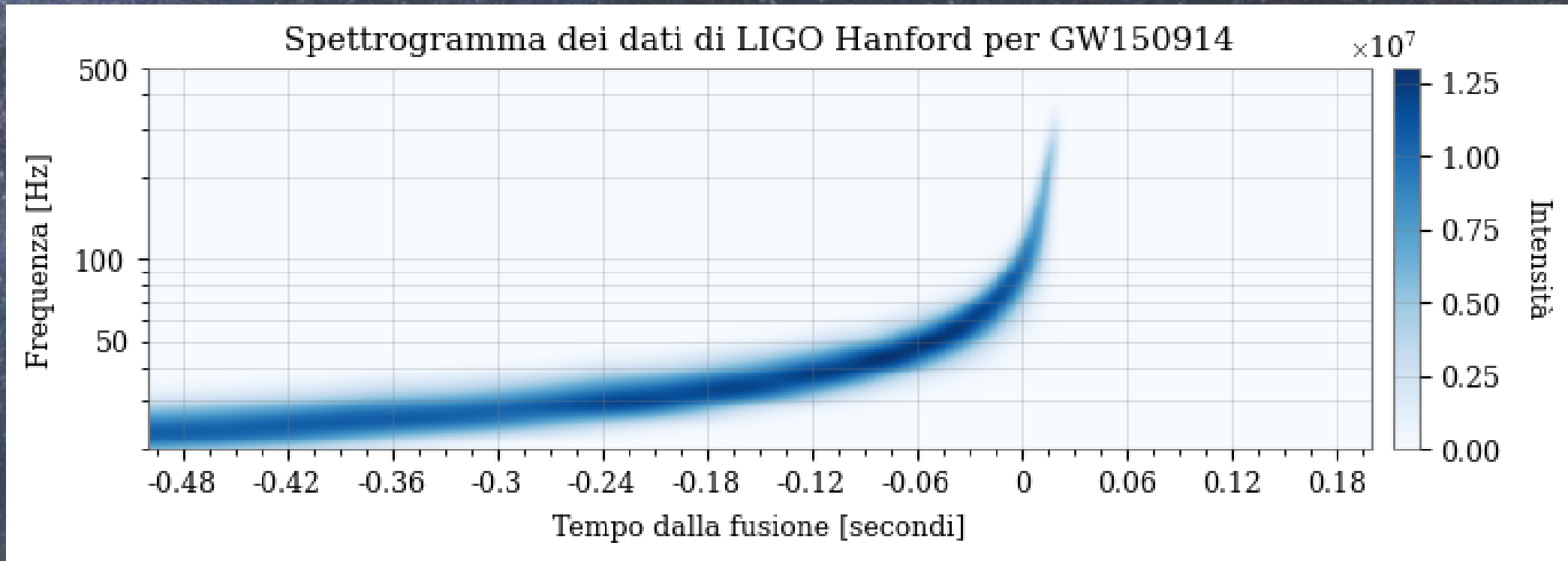
Rappresentazione come spettrogrammi

Dati reali sbiancati



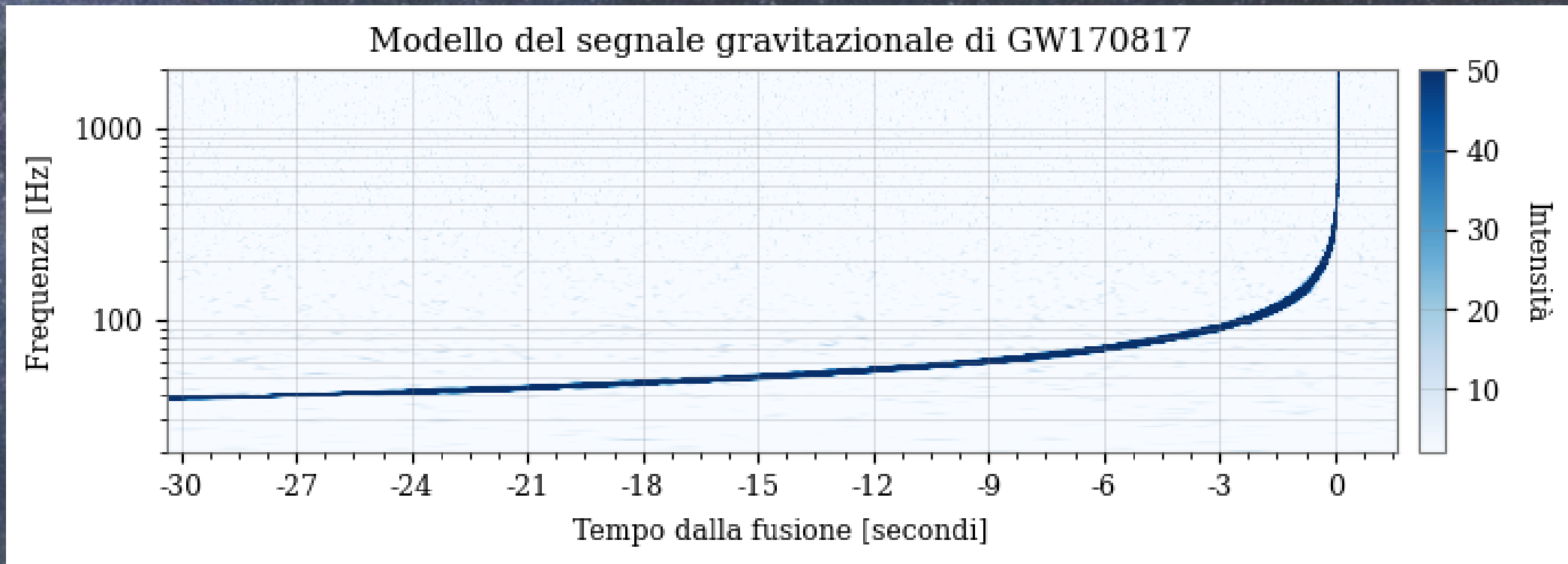
Rappresentazione come spettrogrammi

Modello del segnale gravitazionale



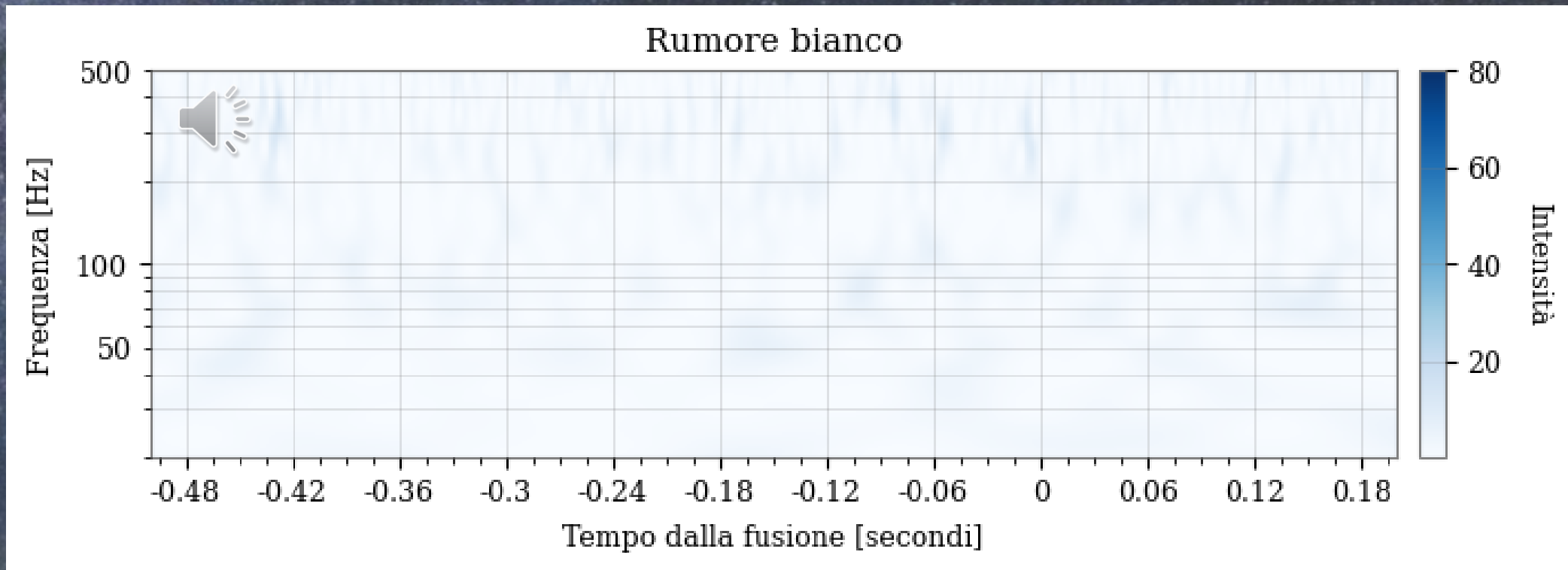
Rappresentazione come spettrogrammi

Stelle di neutroni



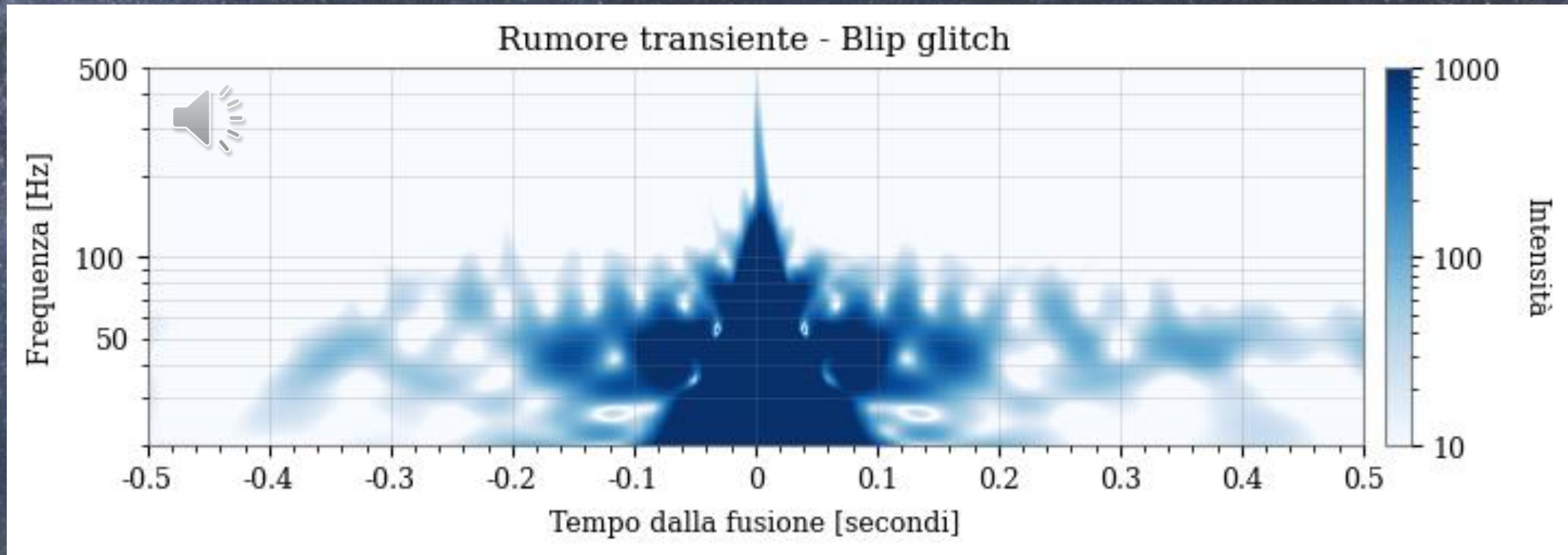
Rappresentazione come spettrogrammi

Rumore bianco



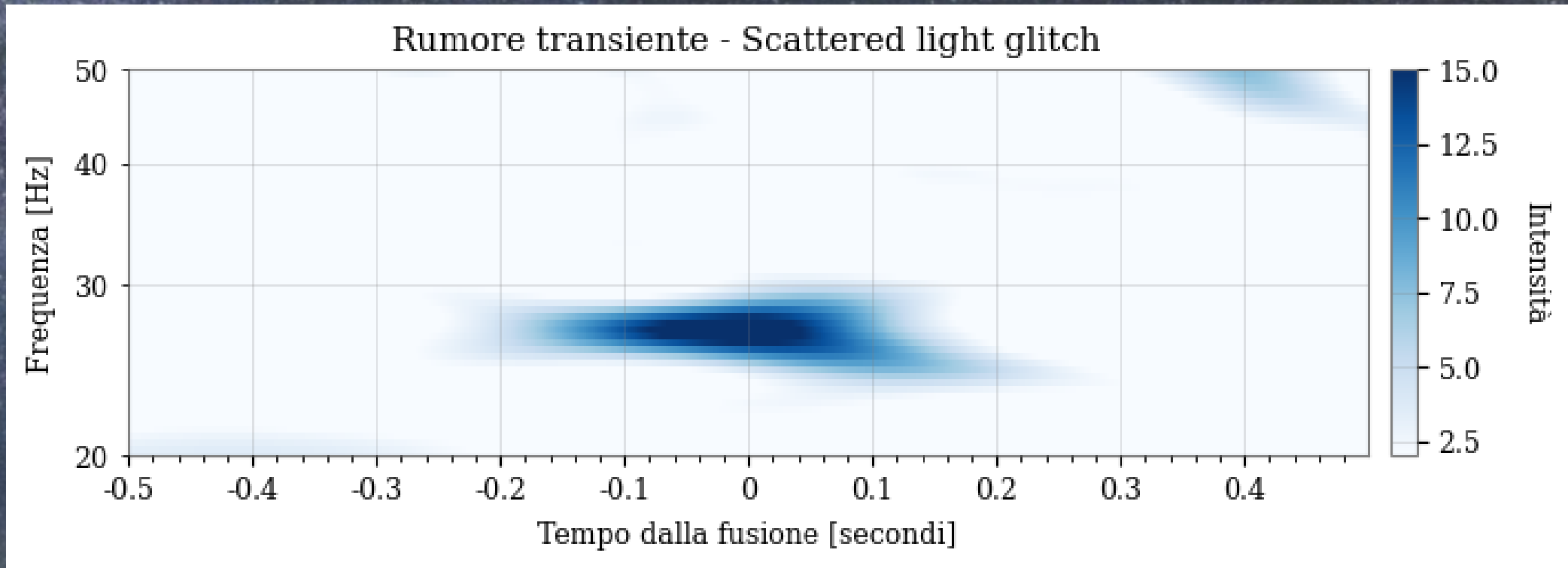
Ancora rumori...

Rumore transiente: in gergo questo si chiama un ``Blip glitch''

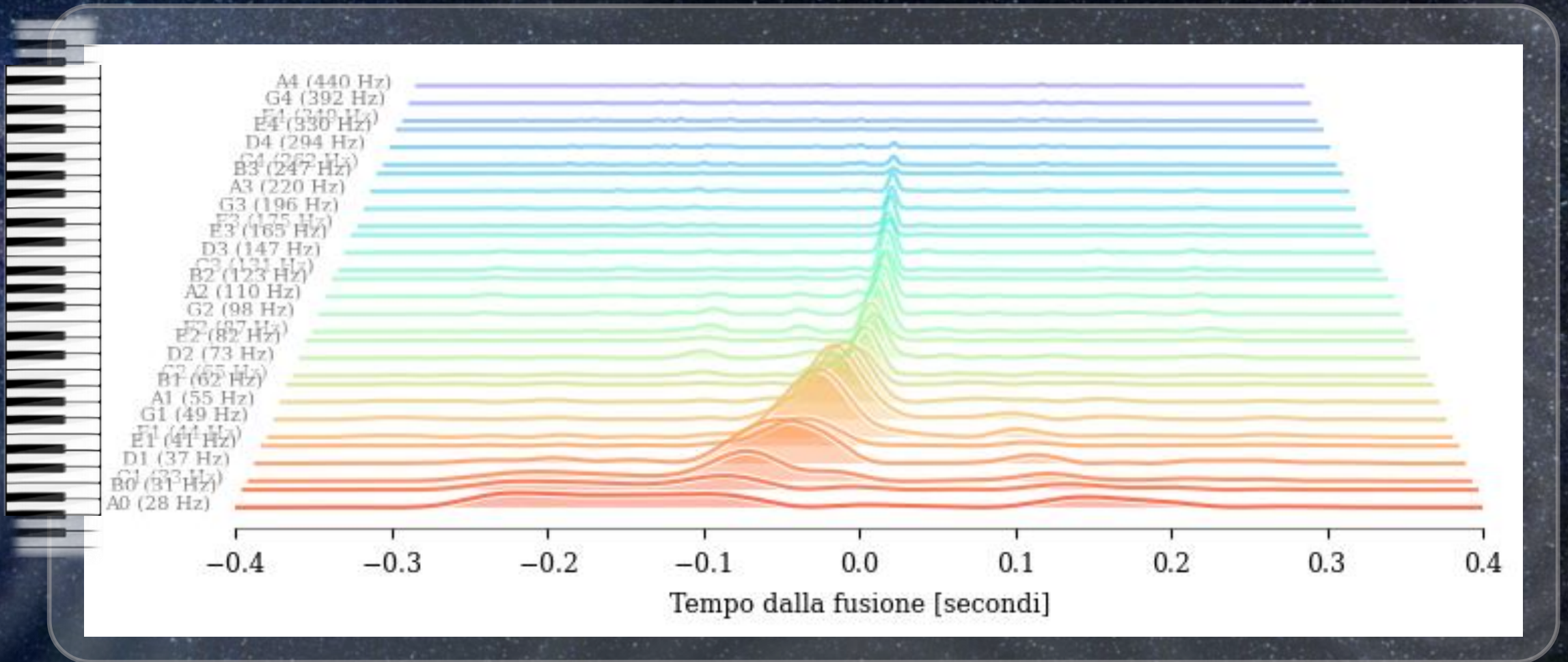


Ancora rumori...

Rumore transiente: questo si chiama "Scattered Light glitch"

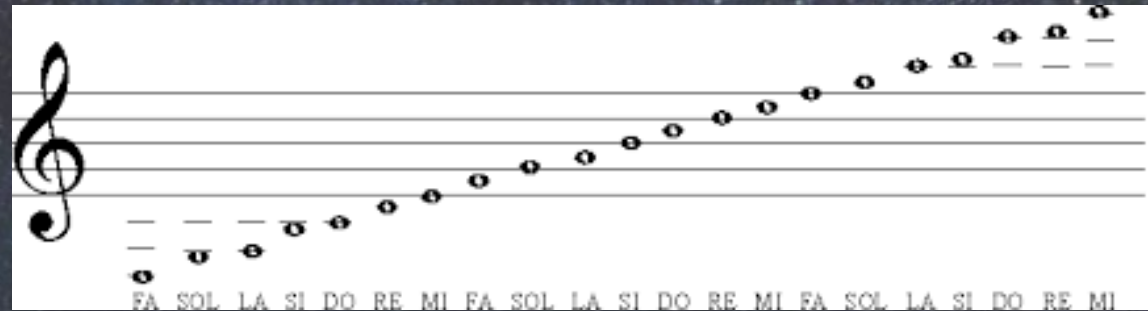
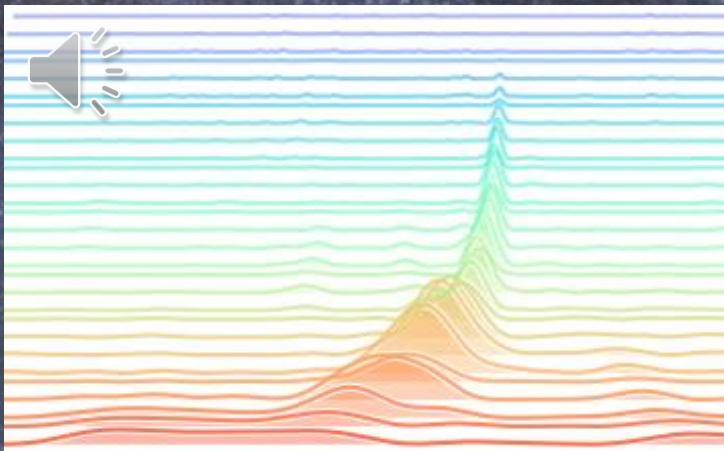


Spettrogrammi alternativi



Spettrogrammi alternativi

Gli spettrogrammi non sono molto diversi dagli spartiti musicali: i segnali gravitazionali sono brevi composizioni che descrivono la sorgente che li ha prodotti.



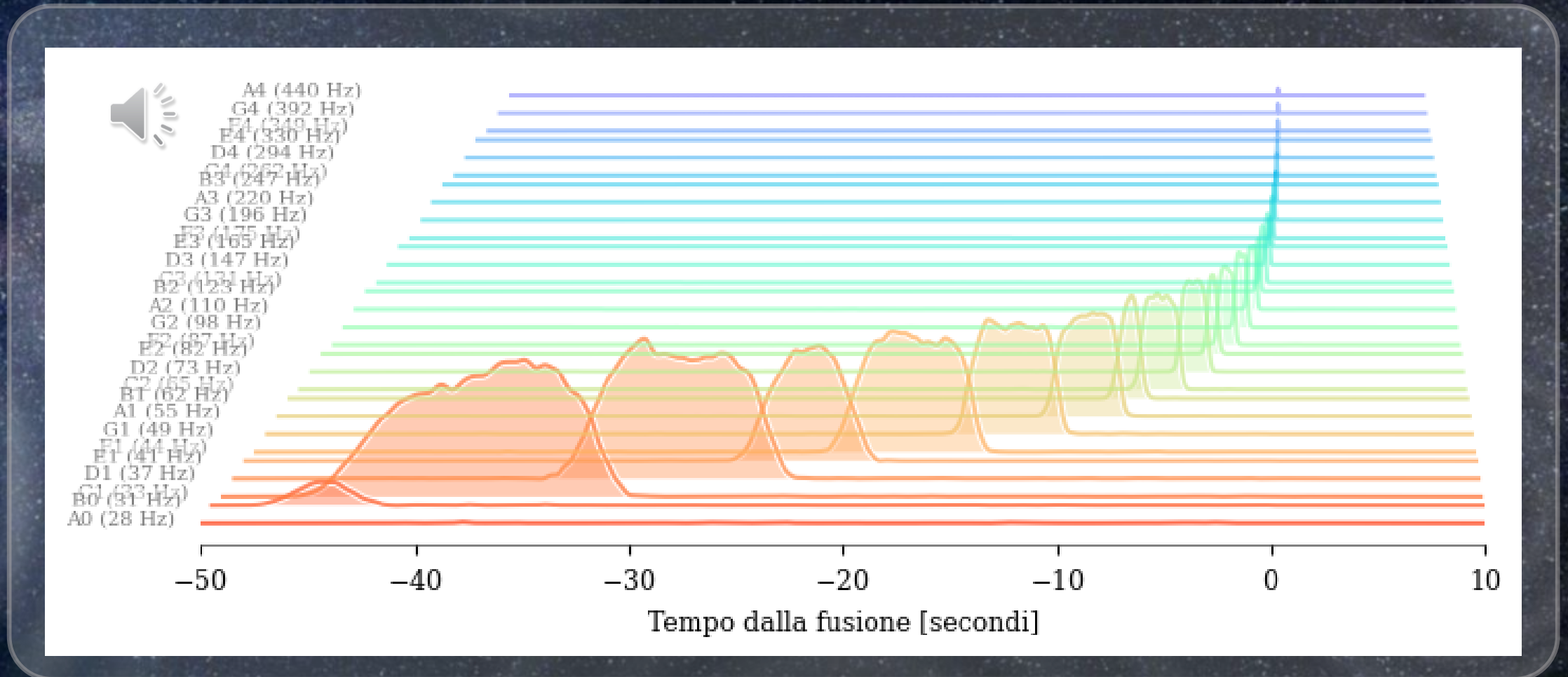
Alfabeto musicale internazionale:

A: La, B: Si, C: Do, D: Re, E: Mi, F: Fa, G: Sol

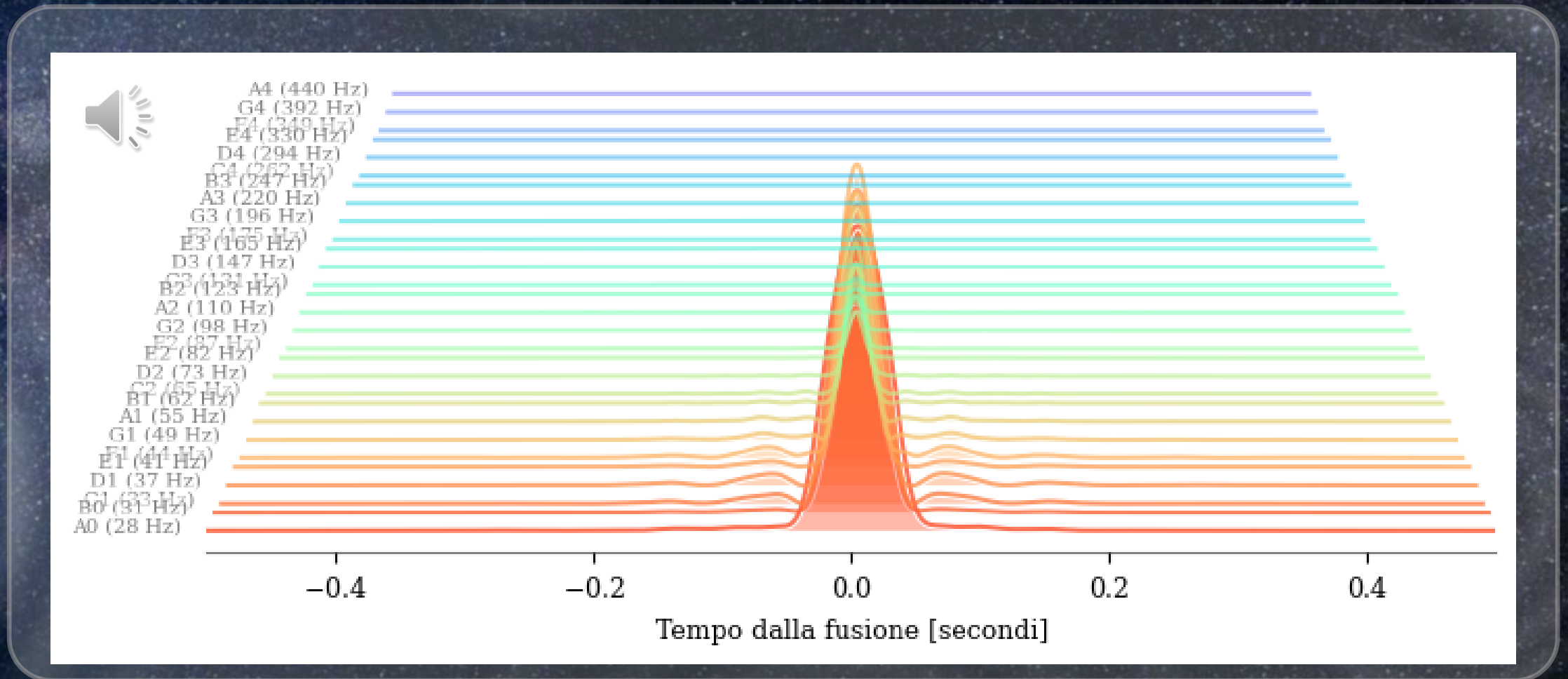
La lettera dopo ogni nota rappresenta l'ottava:

0: grave, 8: acuto

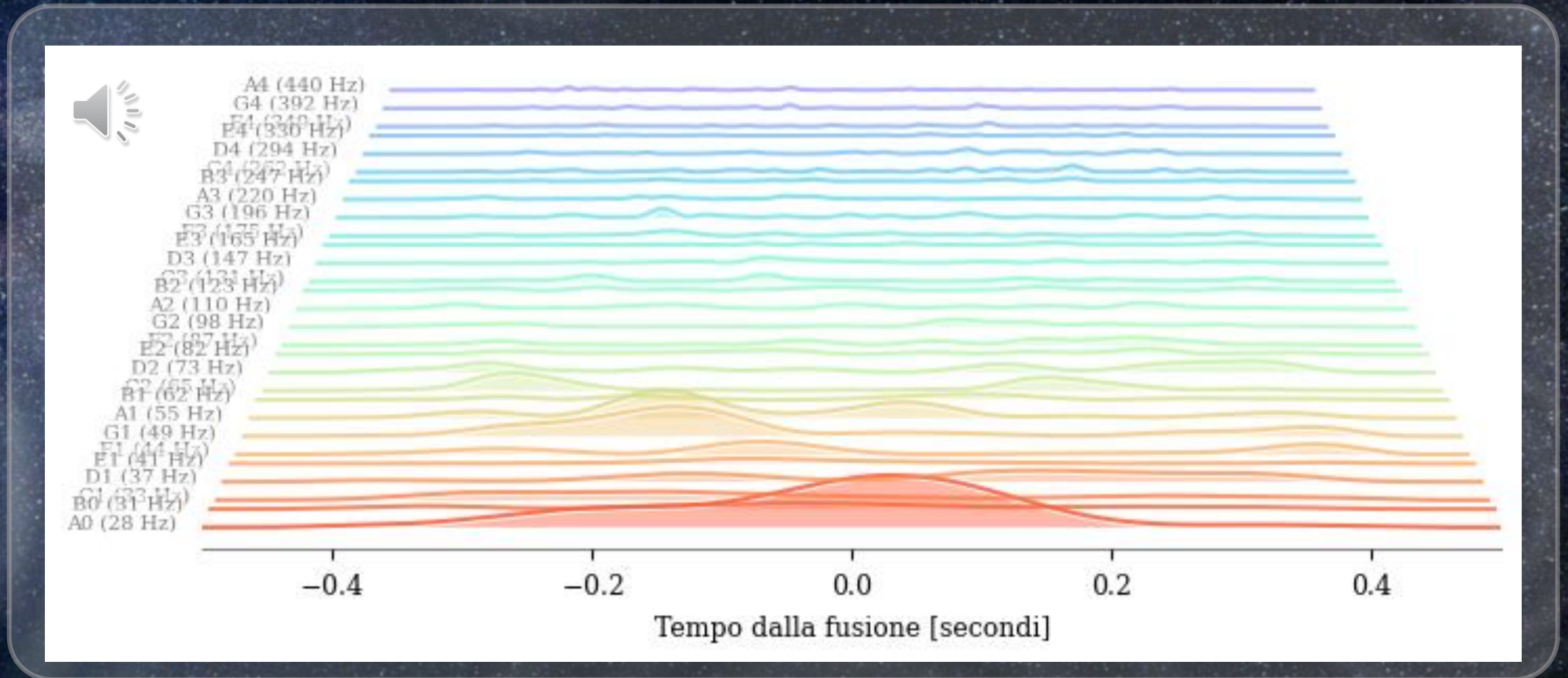
Spettrogrammi alternativi



Spettrogrammi alternativi



Spettrogrammi alternativi

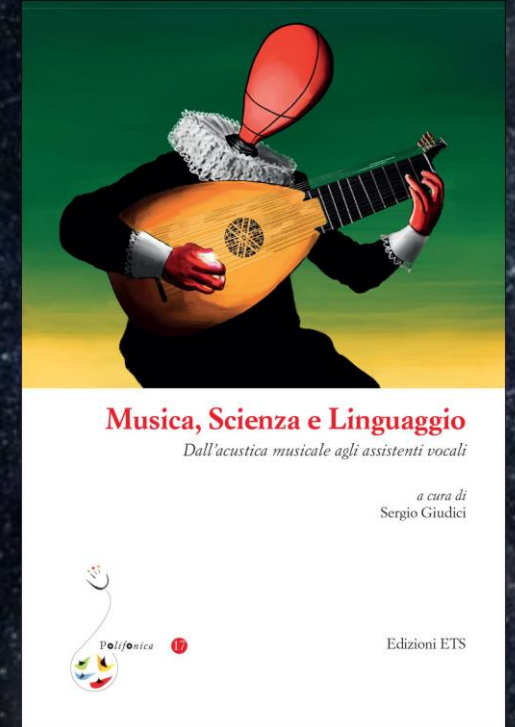


Per approfondire

- ☞ Altri progetti di sonificazione a EGO. [Link](#)
- ☞ Progetto REINFORCE. [Link](#)
- ☞ Citizen science, accessibility, art & science, critical thinking, policy and engagement
EPJ, Vol. 139, 868, (2024)
- ☞ Musica, Scienza e Linguaggio
Dall'acustica musicale agli assistenti vocali
A cura di: [Sergio Giudici](#)
Anno: 2022
ISBN: 9788846761330

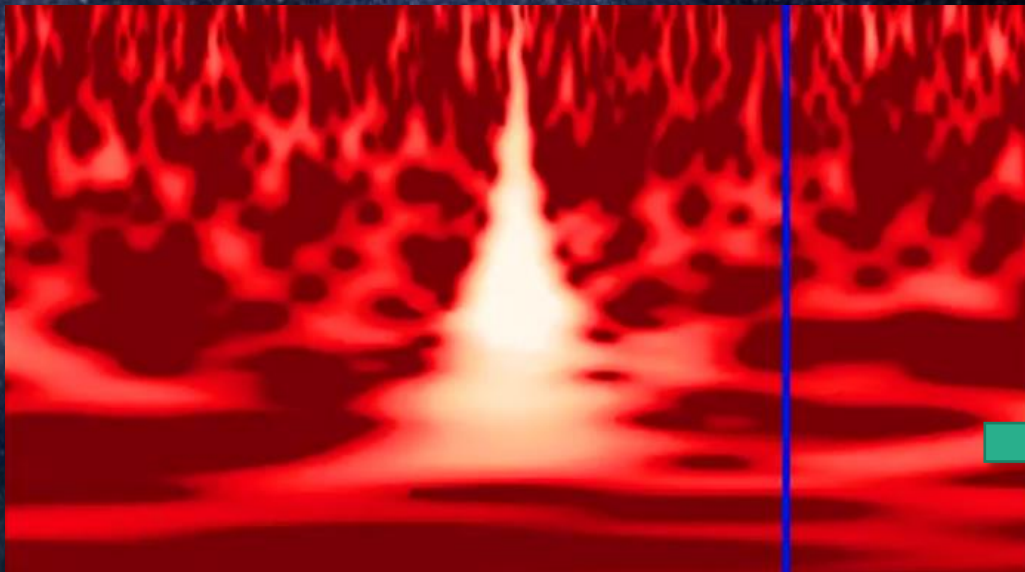
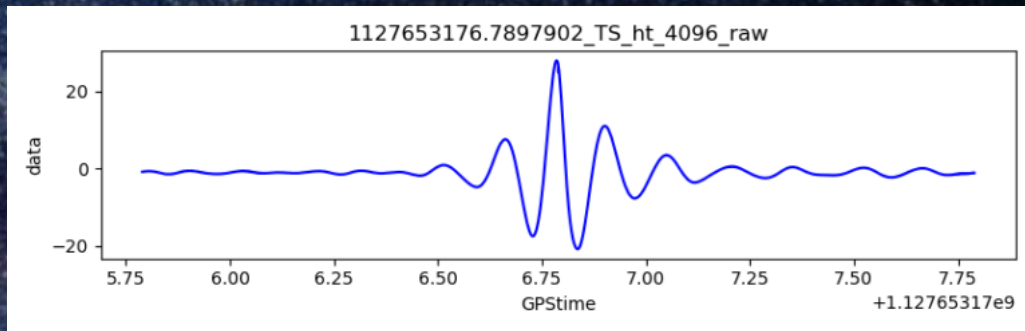


REINFORCE
REsearch INfrastructures FOR Citizens in Europe



Il Progetto sonoUno

<https://www.sonouno.org.ar/>



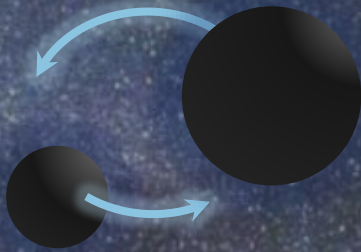
sonoUno include esempi di:

- Particles data (include particles from the LHC, Muongraphy and Neutrinos)
- Astrophysical data (include Galaxies, Variable Stars, Light Curves and Gravitational Waves)
- Math functions (include lineal, sinusoidal and cuadratic)
- Miscellaneous (include statistic data)



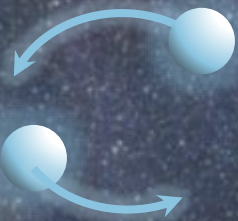
Approccio
multisensoriale
ai dati

Ricapitoliamo



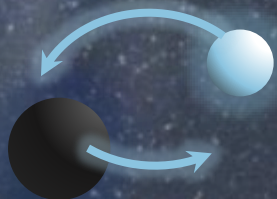
Coalescenze di buchi neri

- ☞ I segnali durano da pochi secondi a decimi di secondo: maggiori sono le masse, più brevi sono
- ☞ Anche la massima frequenza raggiunta dipende dalle masse: più grandi sono, più piccola la frequenza (grave la nota)



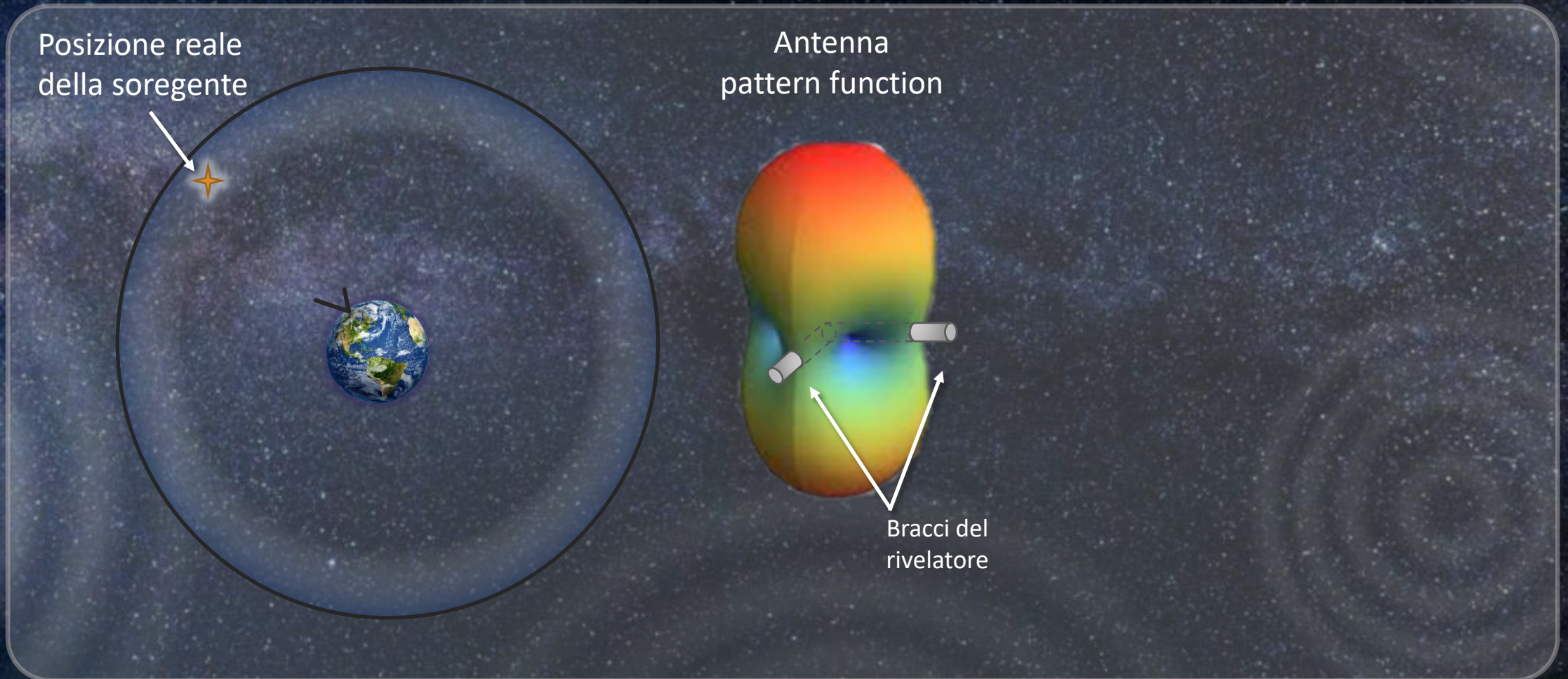
Coalescenze di stelle di neutroni

- ☞ I segnali durano da pochi secondi a decimi di secondo: maggiori sono le masse, più brevi sono
- ☞ Anche la massima frequenza raggiunta dipende dalle masse: più grandi sono, più piccola la frequenza (grave la nota)



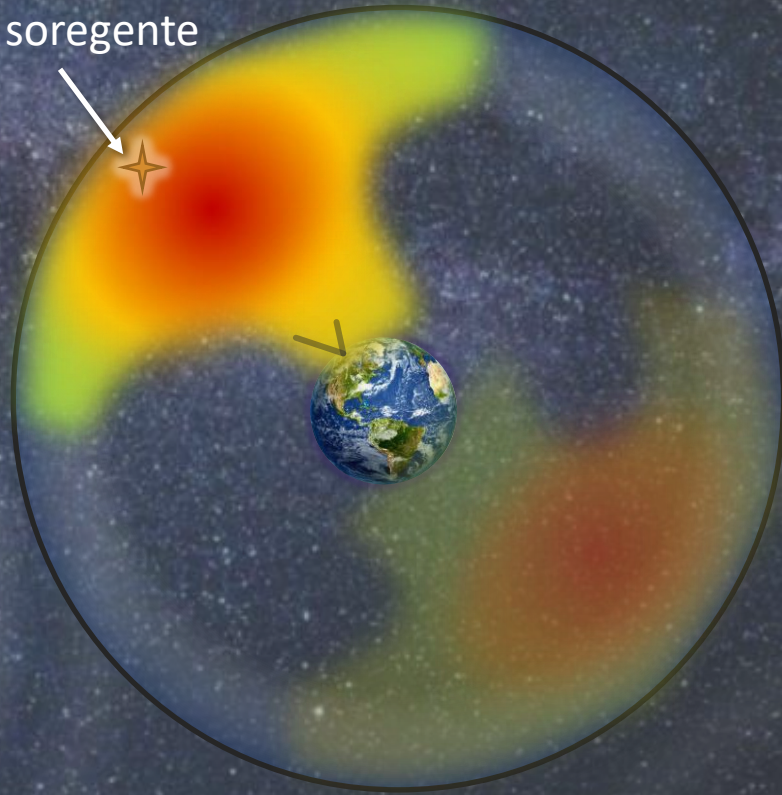
E sistemi misti buco nero – stella di neutroni?

Triangolazione nel cielo: singolo rivelatore

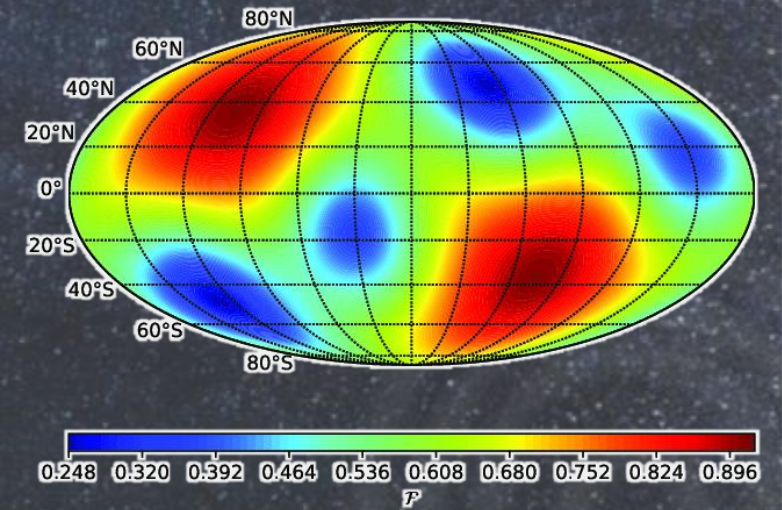
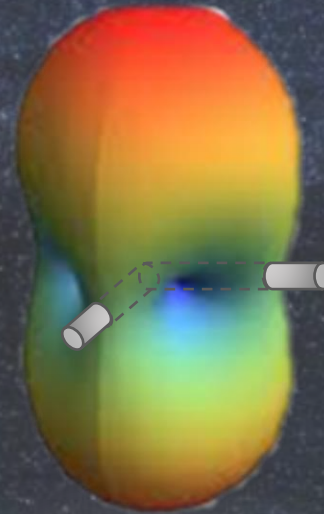


Triangolazione nel cielo: singolo rivelatore

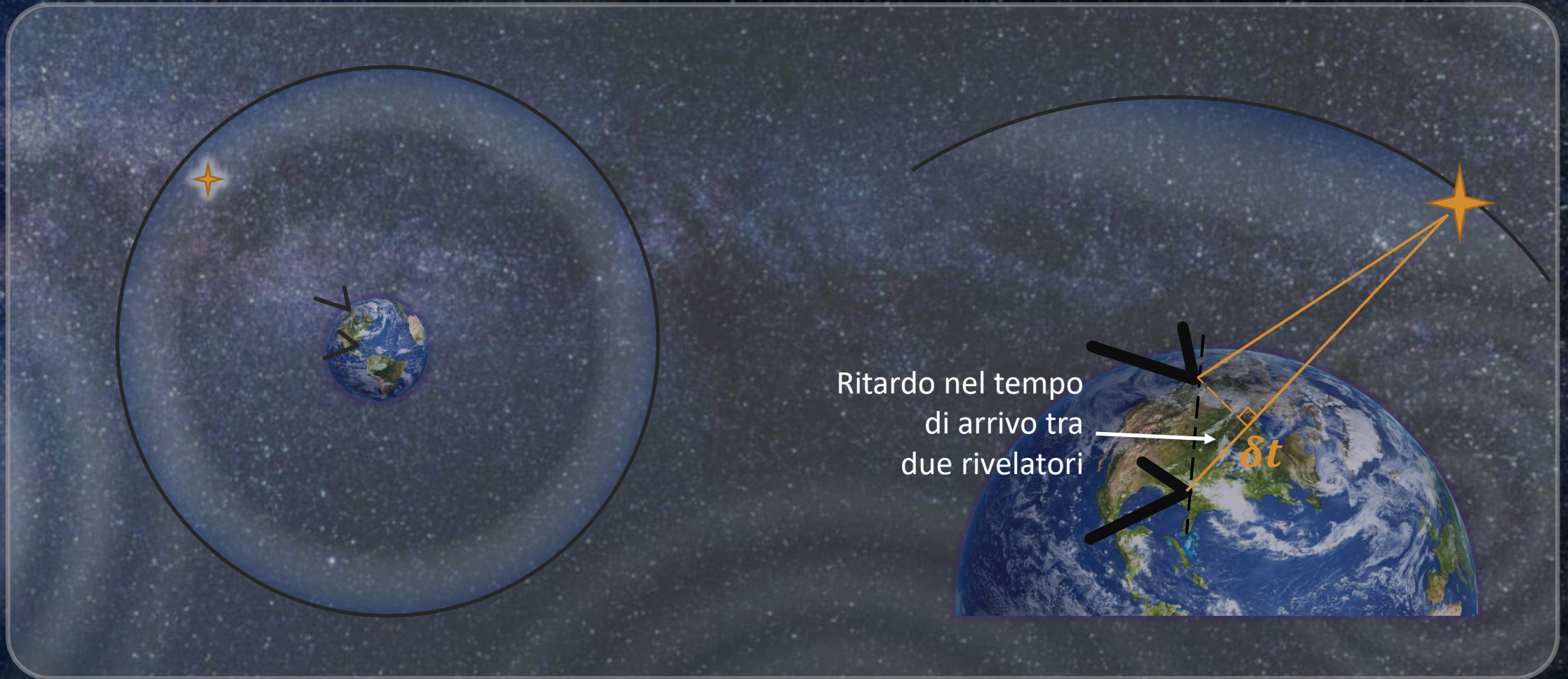
Posizione reale
della sorgente



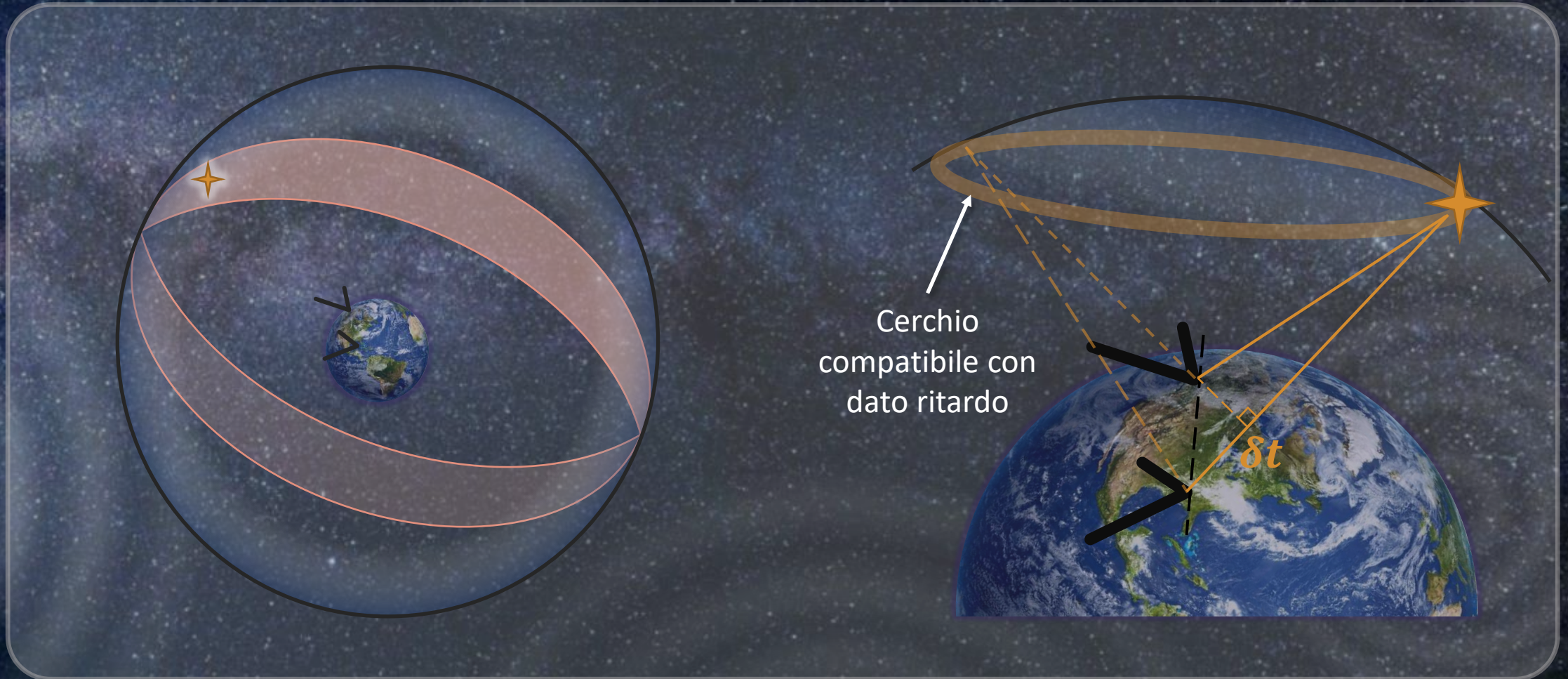
Antenna
pattern function



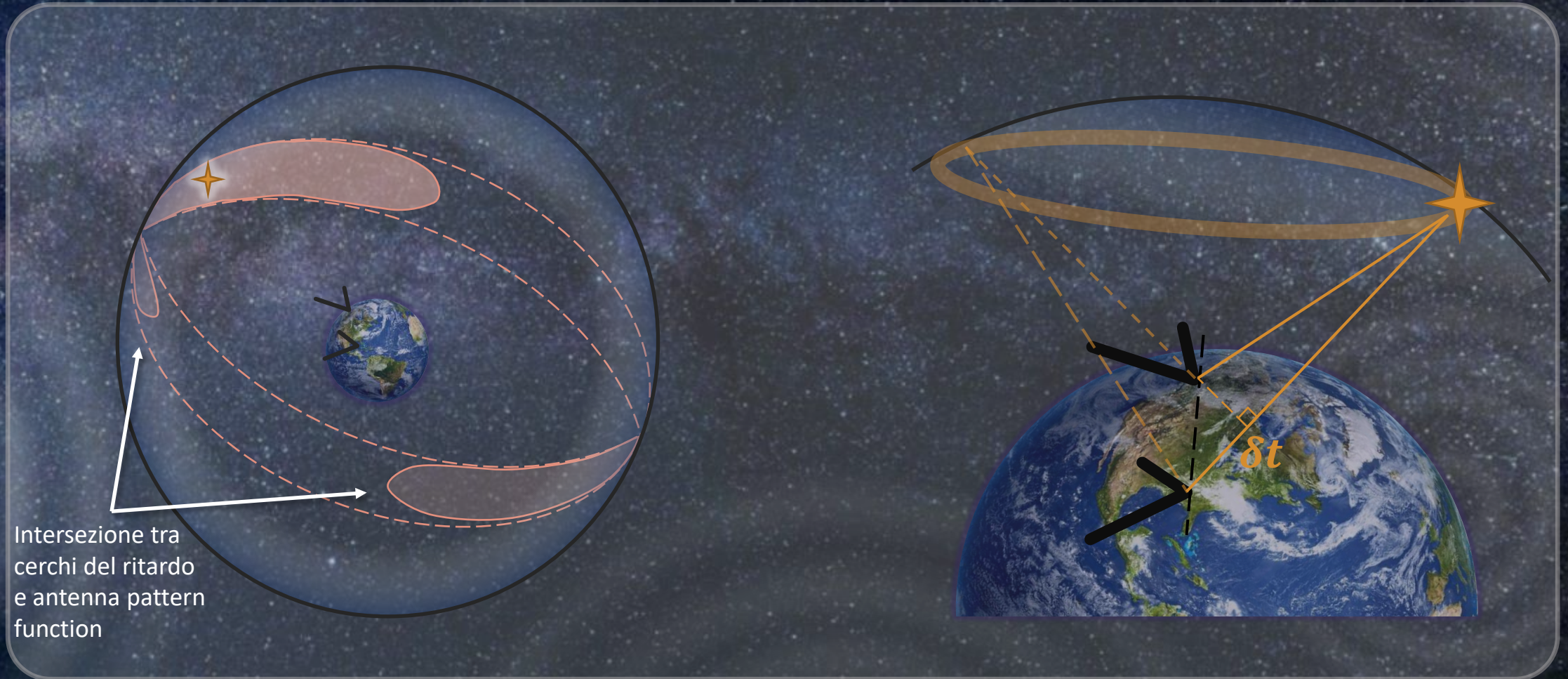
Triangolazione nel cielo: due rivelatori



Triangolazione nel cielo: due rivelatori

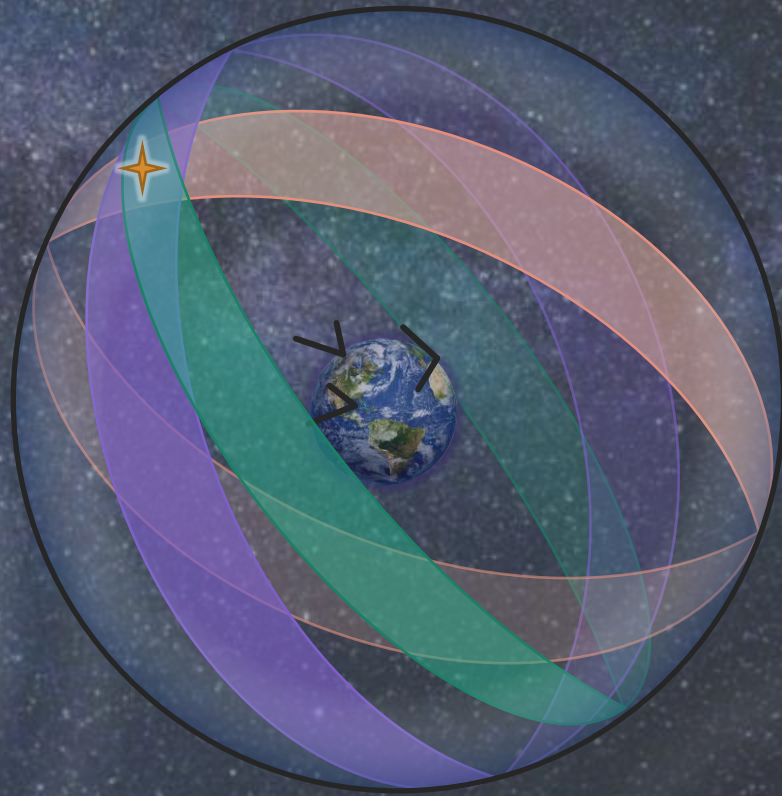


Triangolazione nel cielo: due rivelatori



Triangolazione nel cielo: tre rivelatori

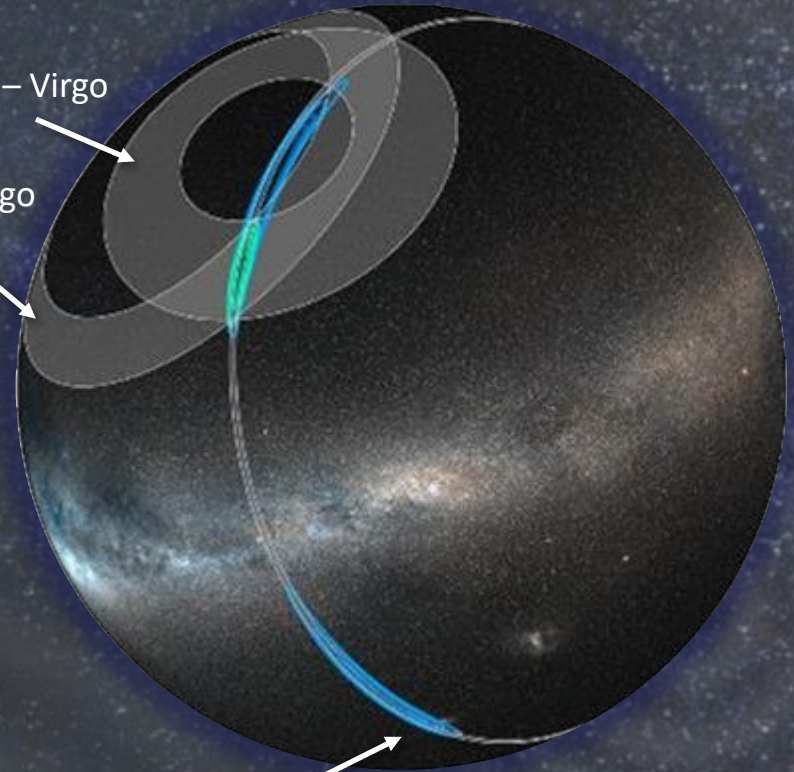
Localizzazione nel Cielo di GW170817



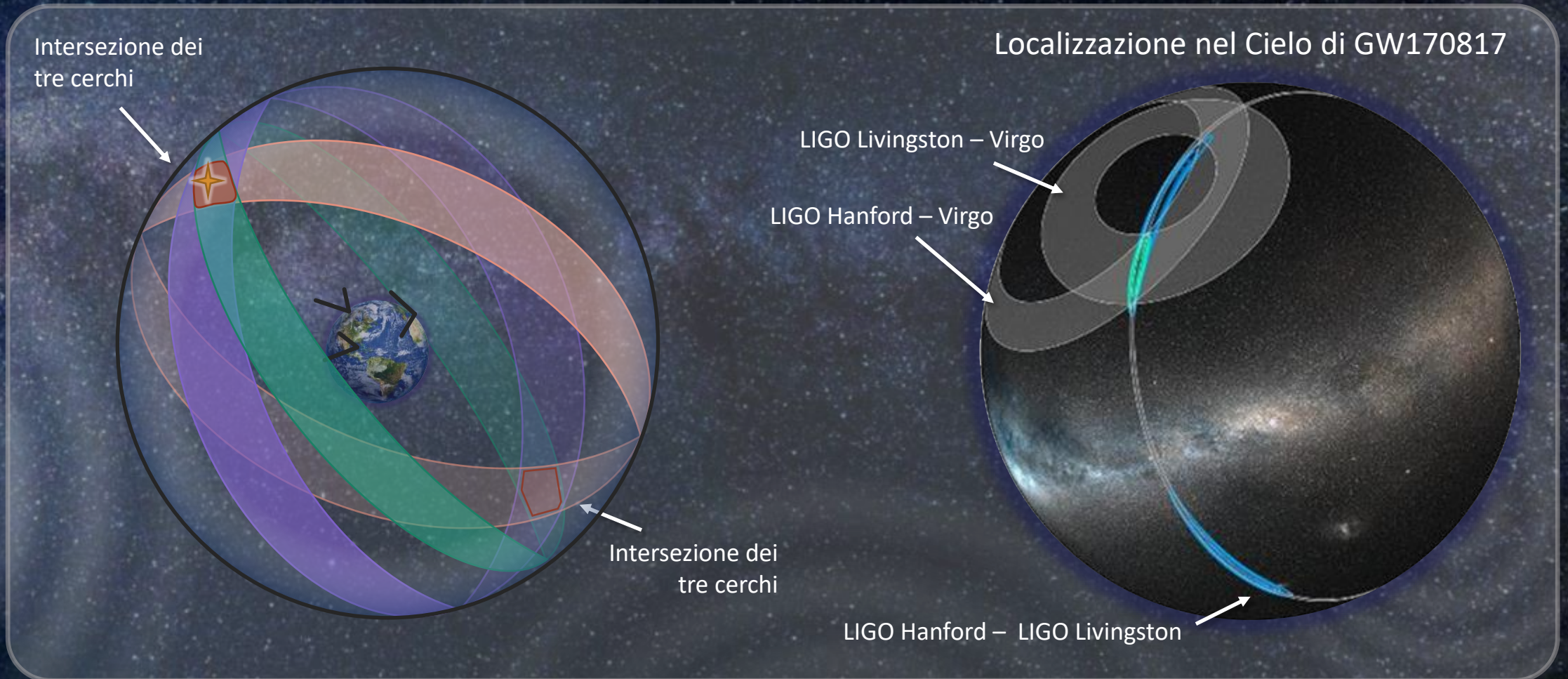
LIGO Livingston – Virgo

LIGO Hanford – Virgo

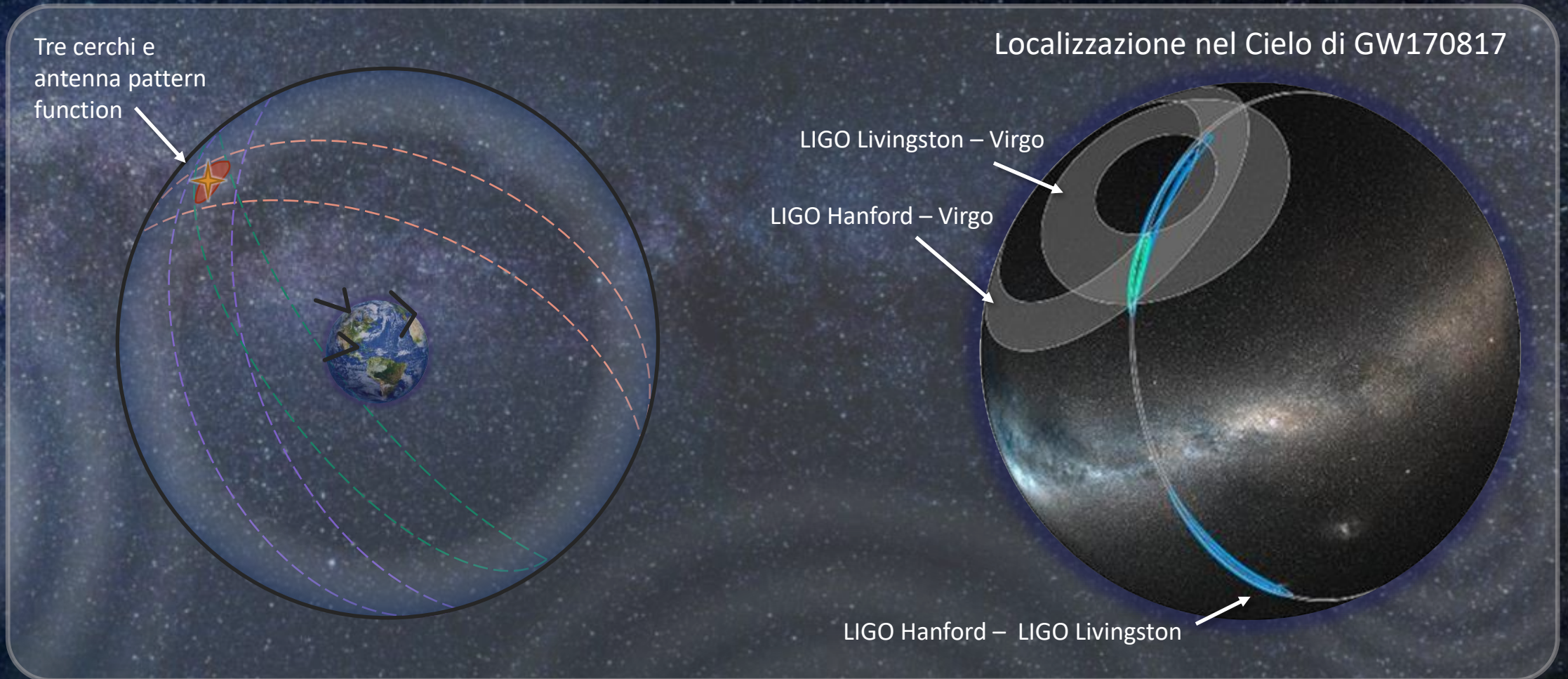
LIGO Hanford – LIGO Livingston



Triangolazione nel cielo: tre rivelatori



Triangolazione nel cielo: tre rivelatori



Buon ascolto della sinfonia del cosmo!

