

Massimiliano Matteuzzi, Corso di Astrofisica, 28/02/2025

Onde Gravitazionali

Ultima serata del Corso di Astrofisica

Cosa vedremo stasera

Stelle di neutroni

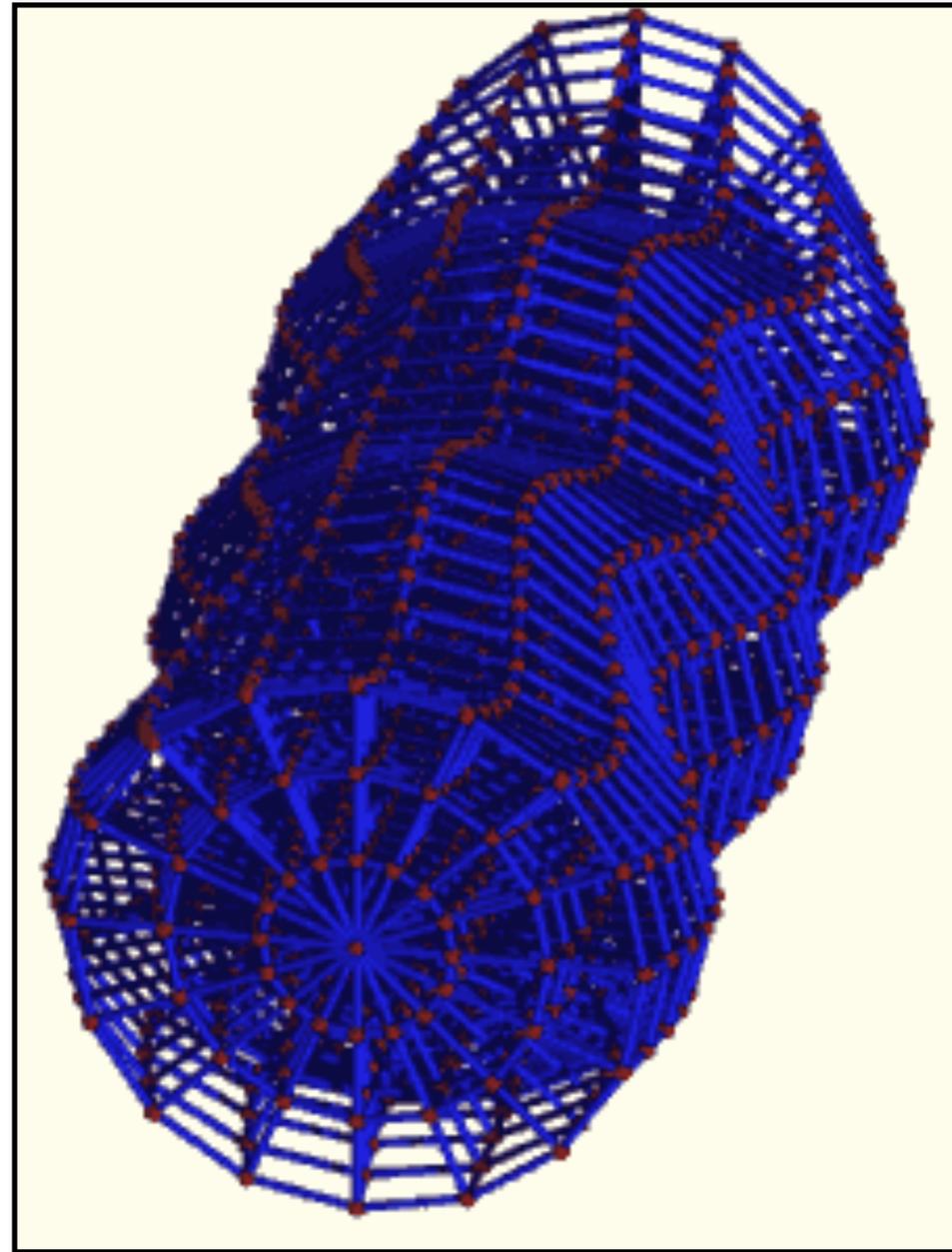


Struttura interna (astrosismologia)

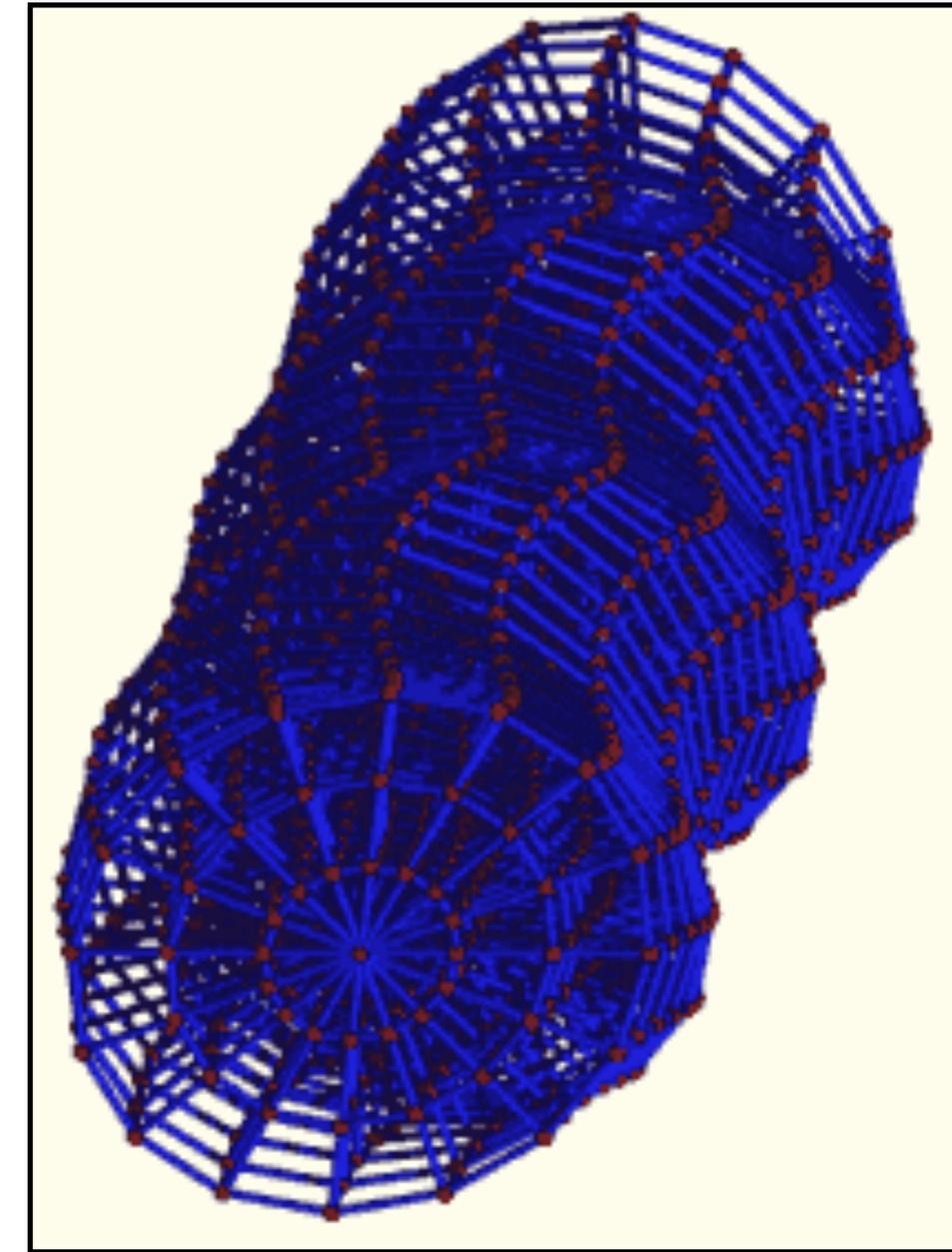


VIRGO, LIGO, EINSTEIN e LISA

Propagazione delle onde gravitazionali



$$h_+ : h_{xx} = -h_{yy}$$



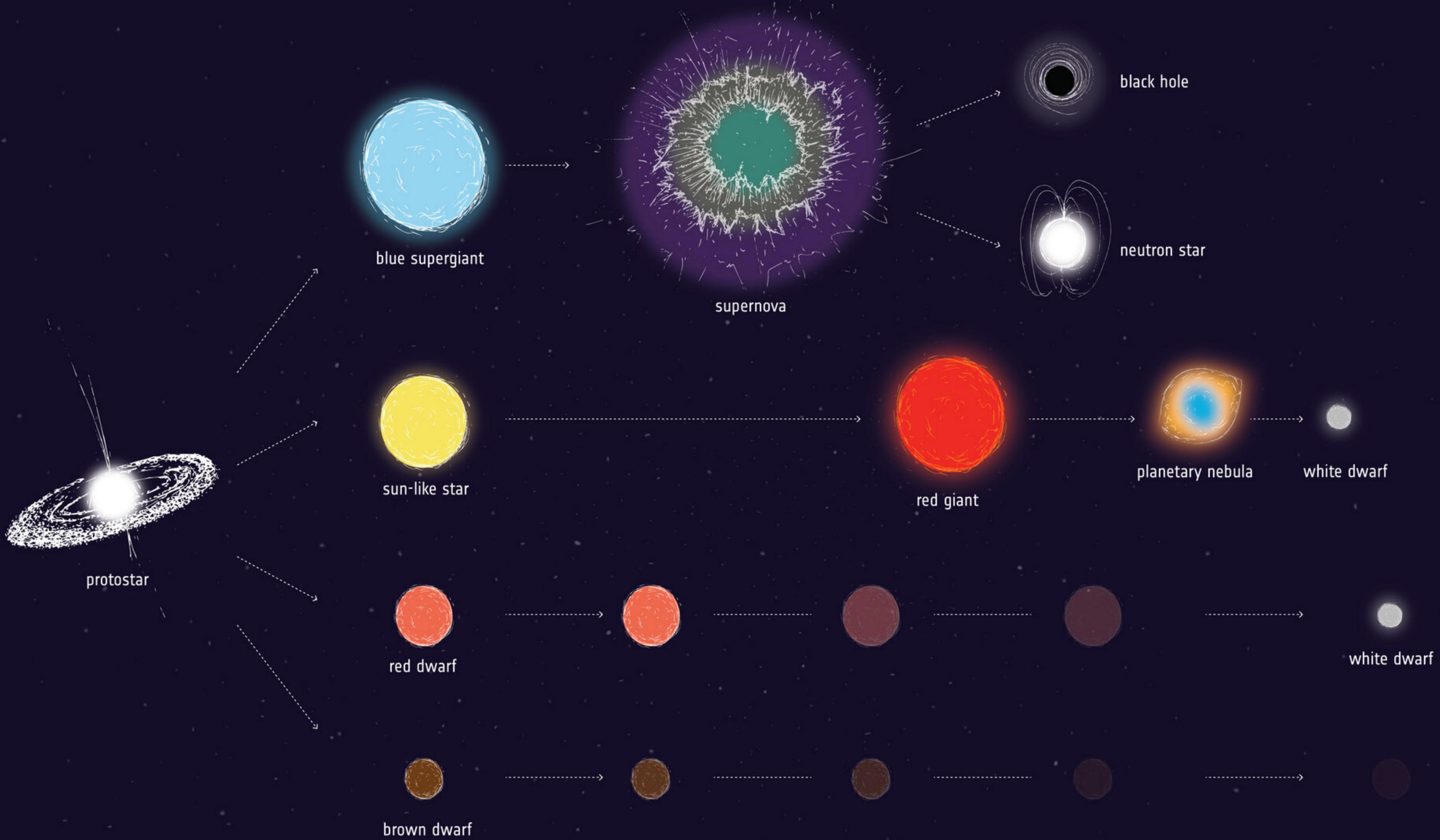
$$h_x : h_{xy} = h_{yx}$$

Strain: $h(t) = h_0 \cos(2\pi\nu_{\text{GWT}}t)$ con $h_0 \approx \Delta L/L \approx 10^{-22}$

Interferometri LIGO/VIRGO



Come nascono le stelle di
neutroni?

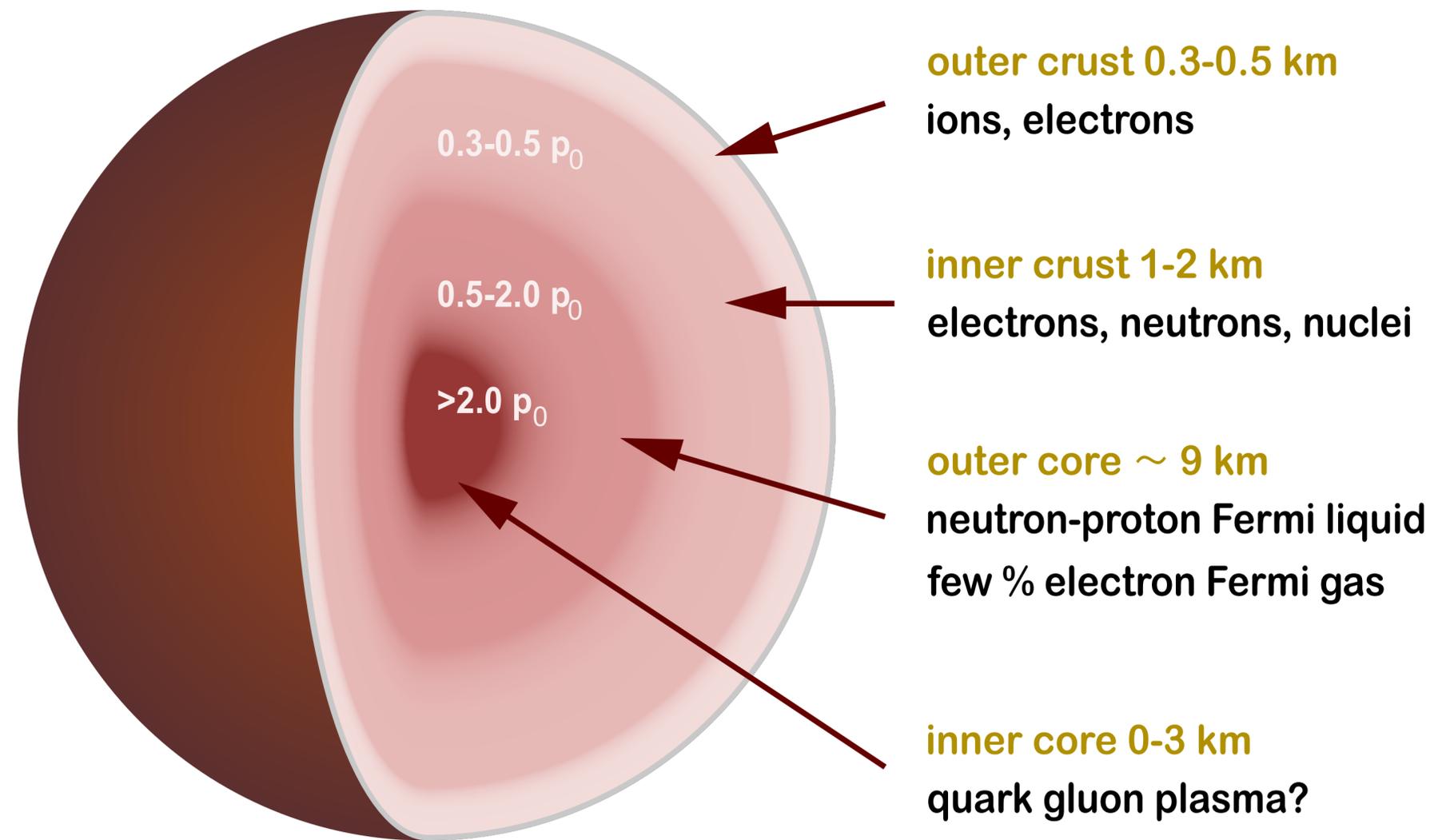


Stelle di neutroni

- **Neutroni degeneri:** densità del nucleo atomico ($\rho \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3$ circa costante);
- Generalmente $T_{\text{eff}} \approx 10^{6-7} \text{ K}$, $P_{\text{rot}} < 30 \text{ s}$, $B \approx 10^{4-11} \text{ T}$ (**pulsar**) e neutrini;
- Esiste un **limite superiore alla massa:**
limite di Tolman–Oppenheimer–Volkoff ($M \approx 2.2 - 2.9 M_{\odot}$);
- Mediamente $M \approx 1.4 M_{\odot}$ e $R \approx 10 \text{ km}$
(PSR J0952–0607 la **più massiccia nota** con $M = 2.35 \pm 0.17 M_{\odot}$).

Come ci aspettiamo che siano
stratificate?

Stratificazione interna



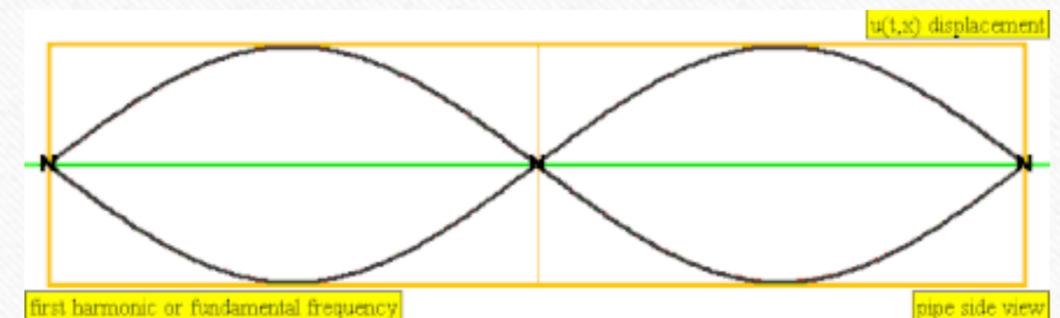
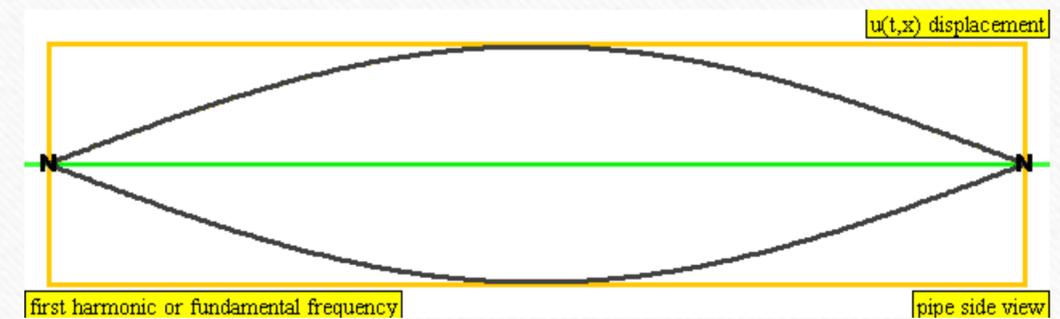
Credits: Robert Shulze

Stelle di neutroni: laboratori di Fisica

- Equazioni di stato in ambienti così densi sono poco note;
- Relatività generale + cromodinamica quantistica + **superfluidità** + superconduttività;
- Non sono note le transizioni di fase e la natura della materia nei vari strati;
- Laboratorio perfetto per studiare la fisica fondamentale (tra cui la **birifrangenza del vuoto, condensati di kaoni e pioni, iperoni**).

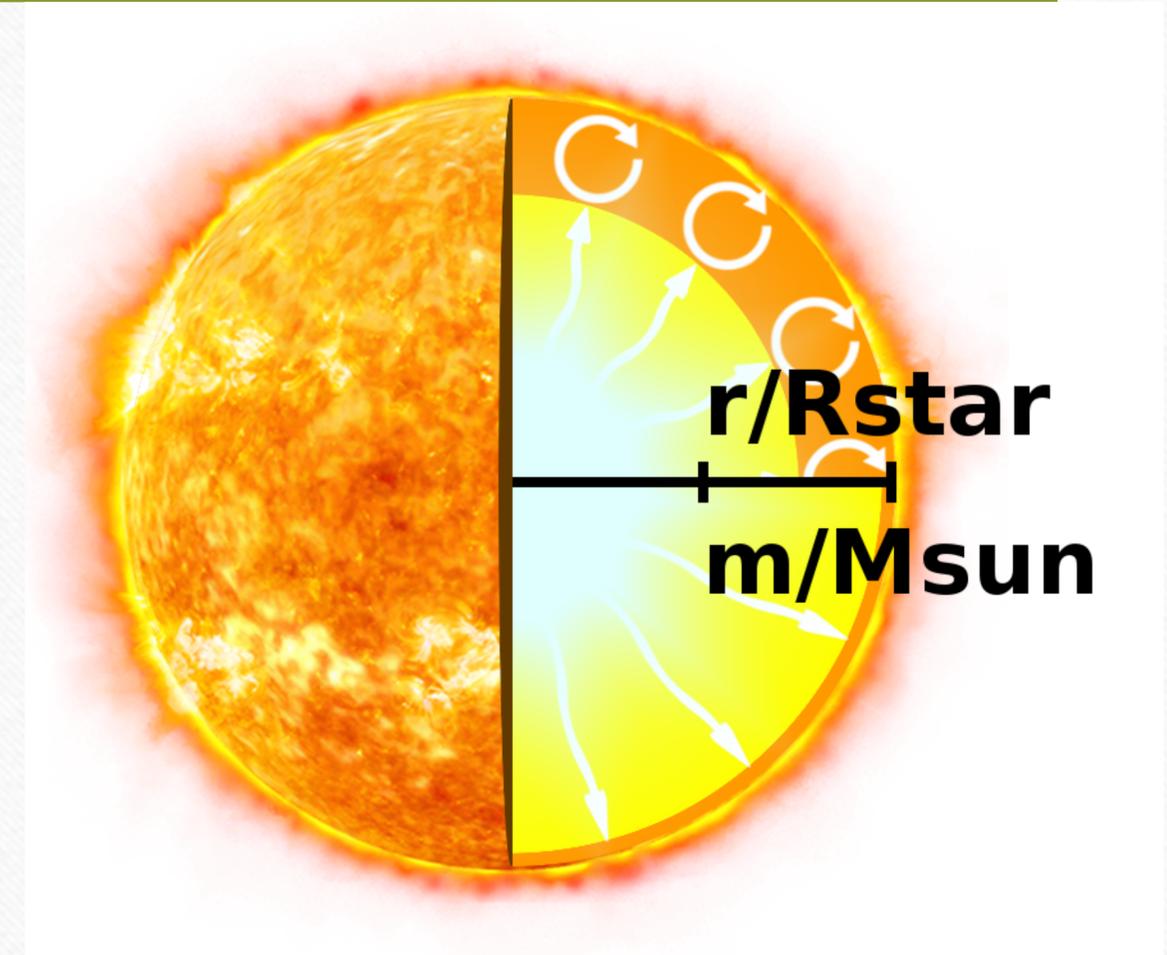
Oscillazioni in una corda con estremi fissi

- **Frequenza fondamentale:**
onda stazionaria a più bassa frequenza;
- **Ipertoni:**
multipli della frequenza fondamentale.

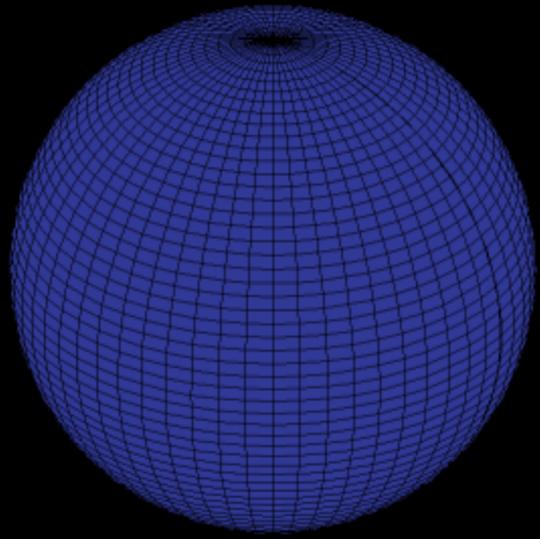


Oscillazioni nel Sole

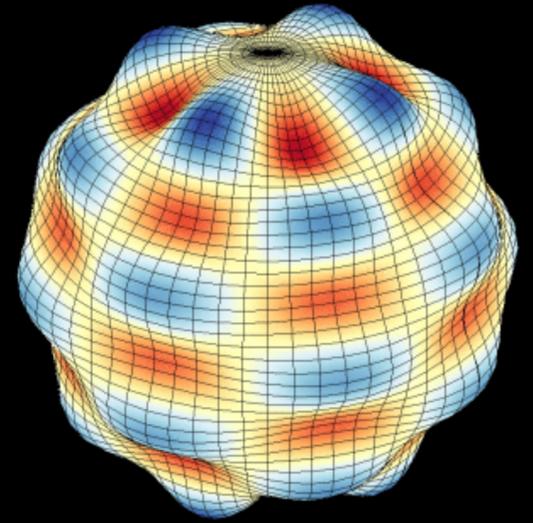
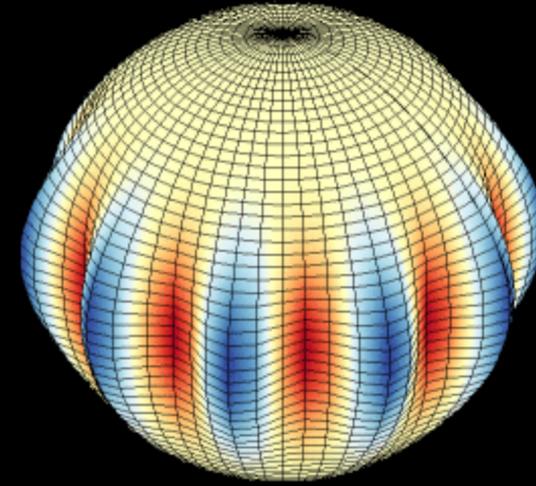
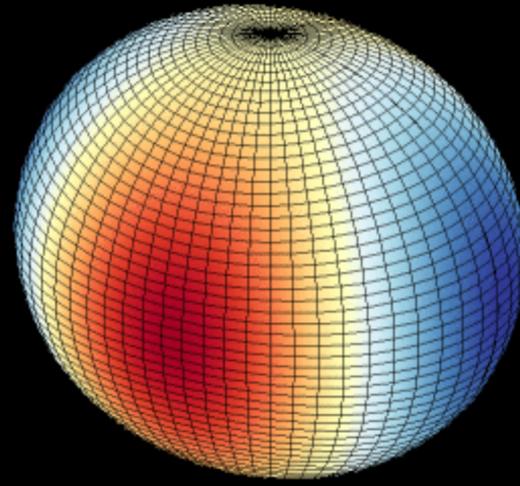
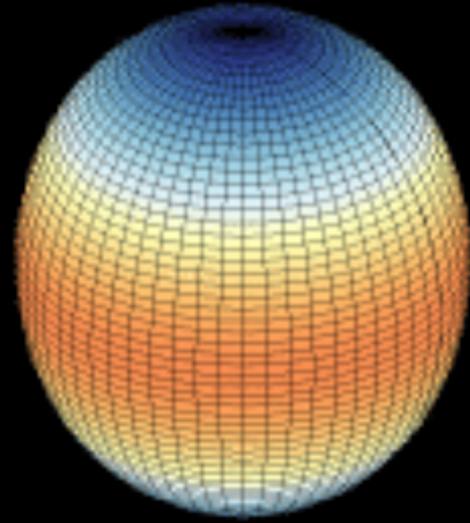
- Zona convettiva superficiale: moto turbolento;
- Generate casualmente e smorzate;
- Oscillazioni molto piccole:
4 ppm in L oppure 15 cm/s in velocità
d'espansione;
- Periodi di oscillazioni attorno ai 5 minuti.



Armoniche sferiche nelle stelle

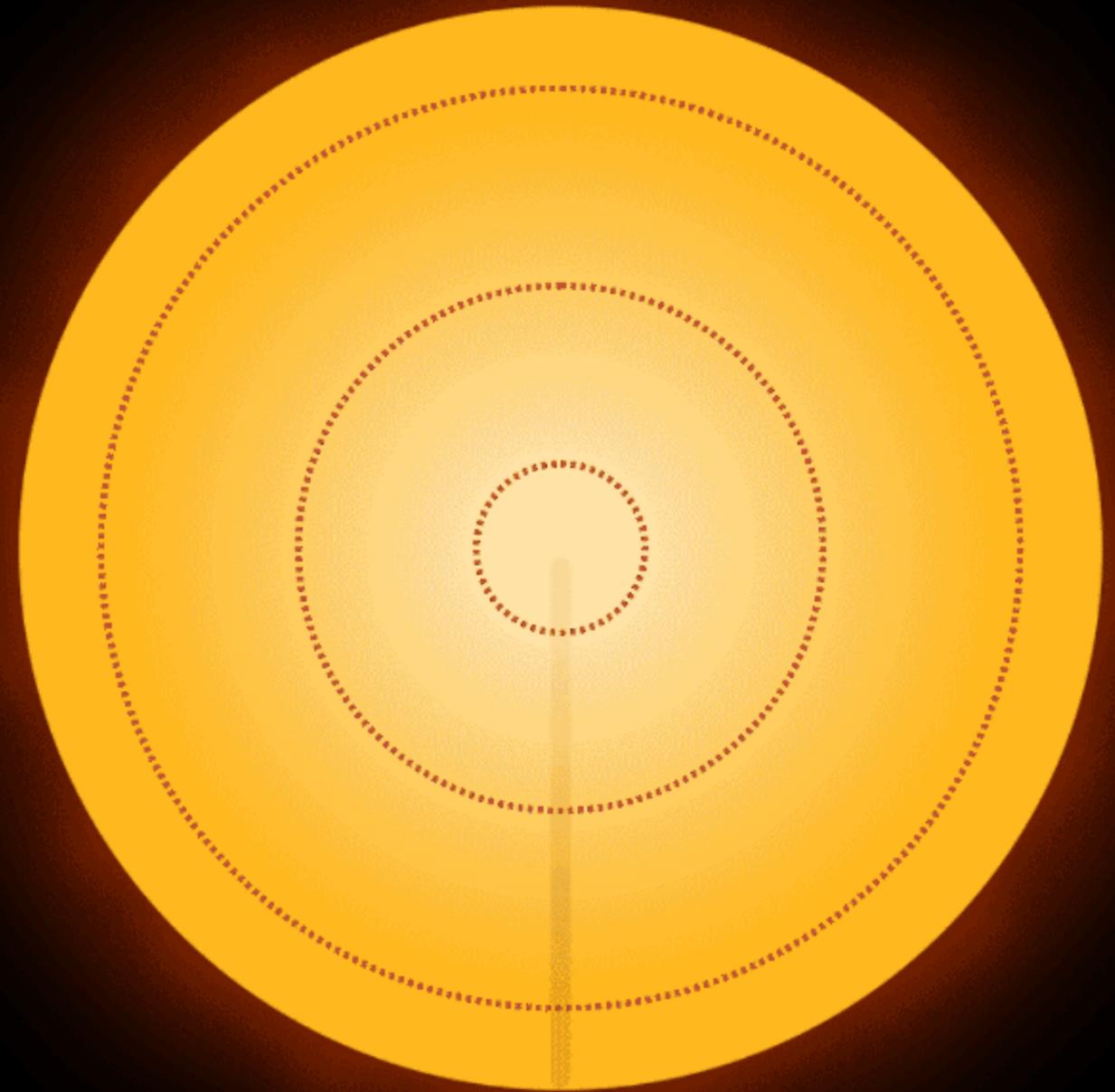


Oscillazioni
radiali

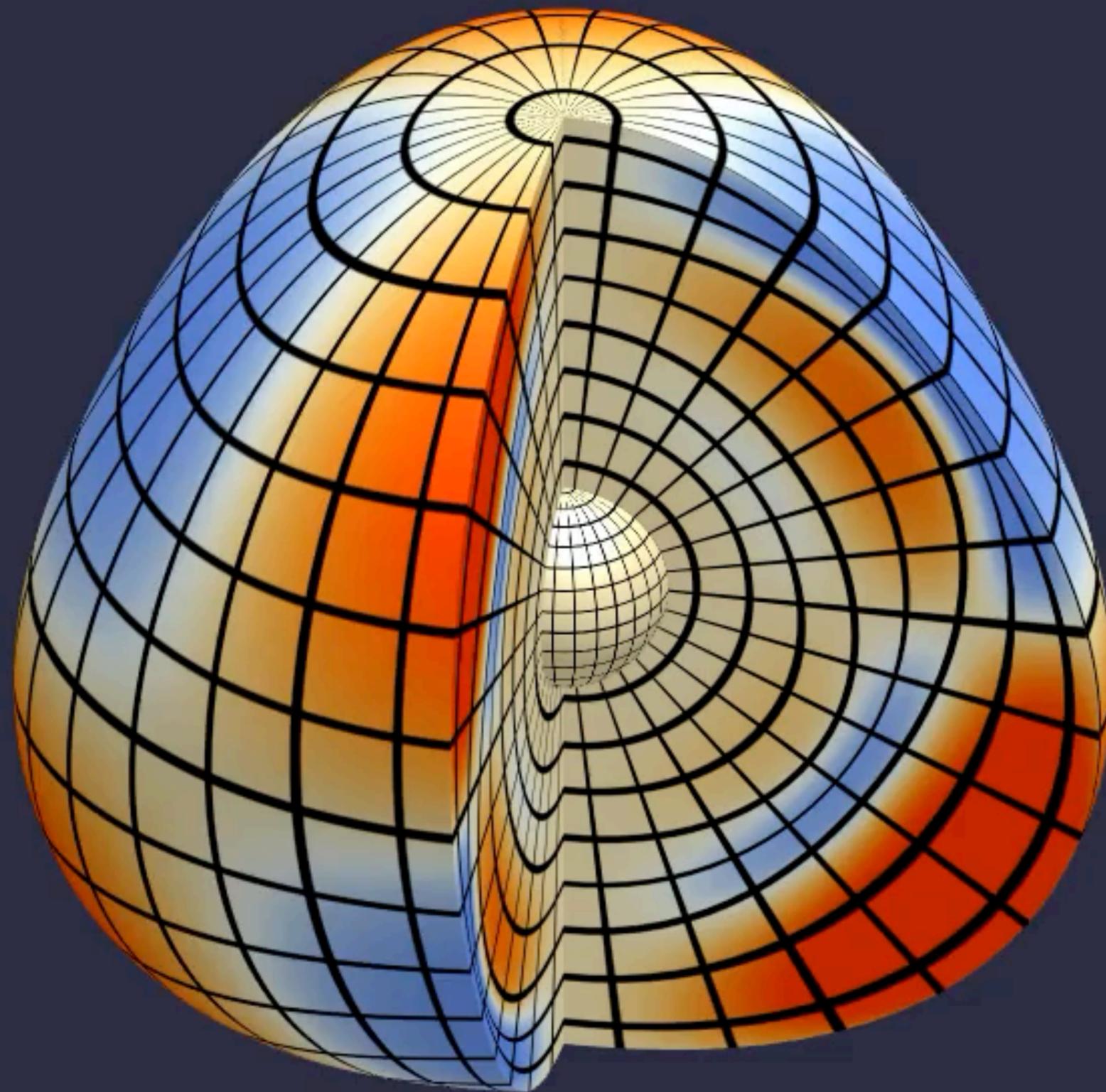


Oscillazioni
non radiali

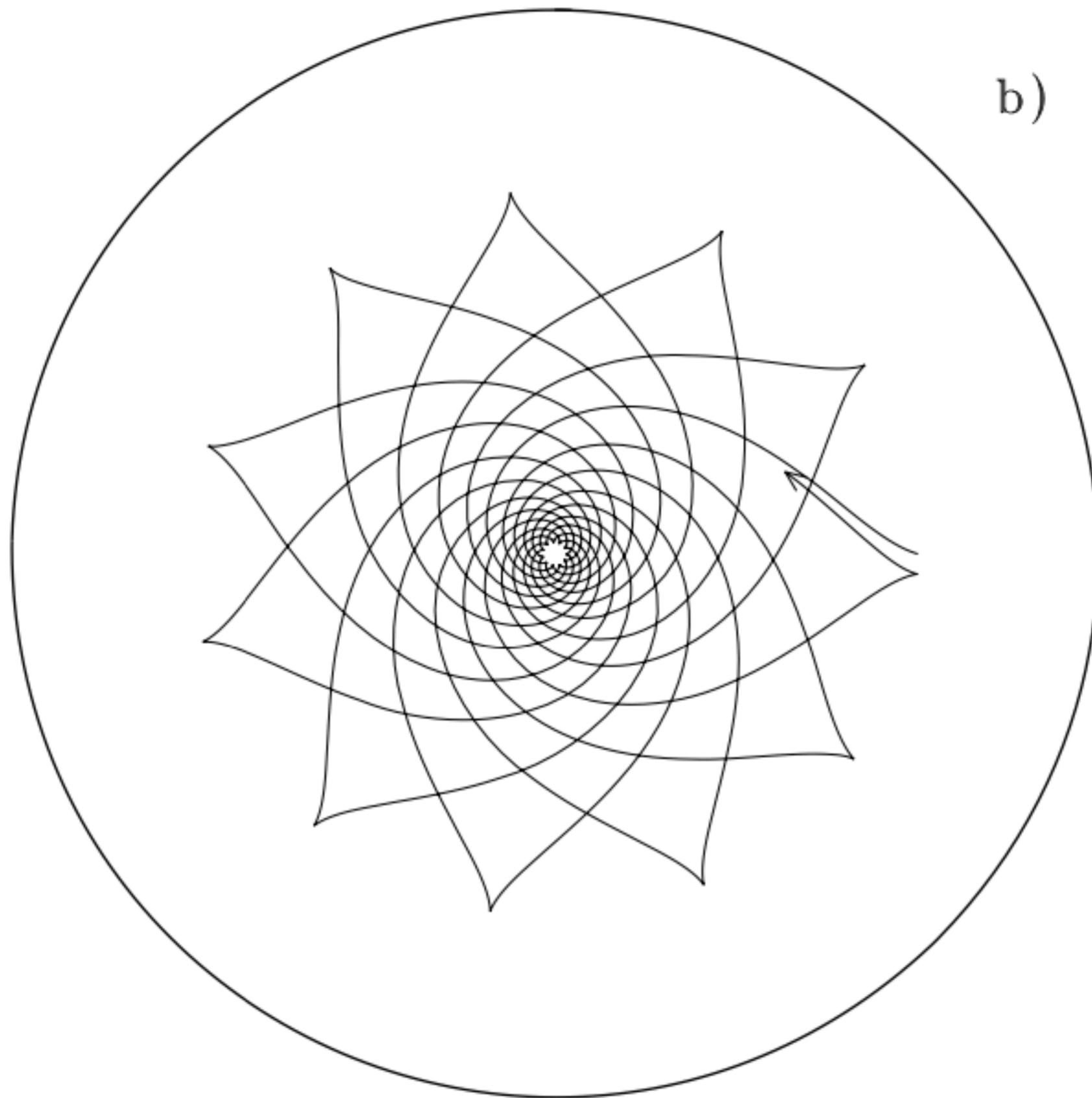
Propagazione delle onde



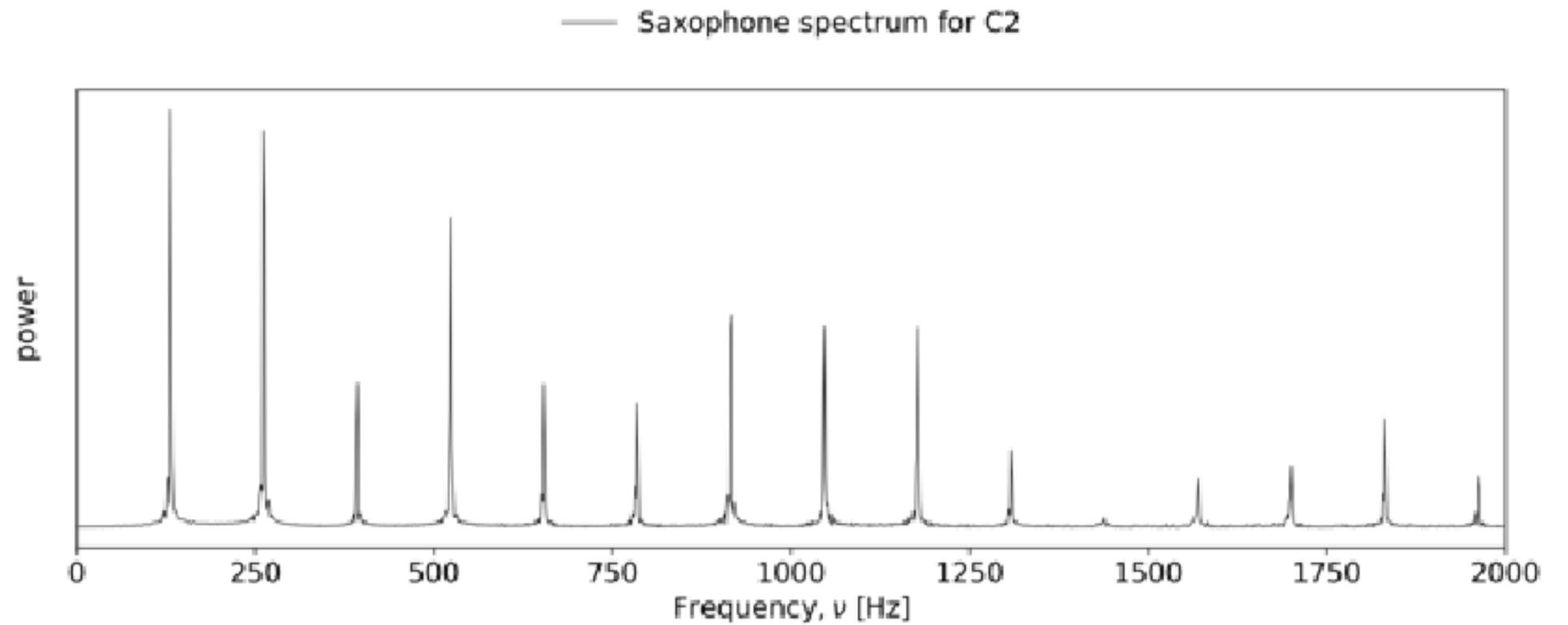
Cassa di risonanza:
modi di pressione



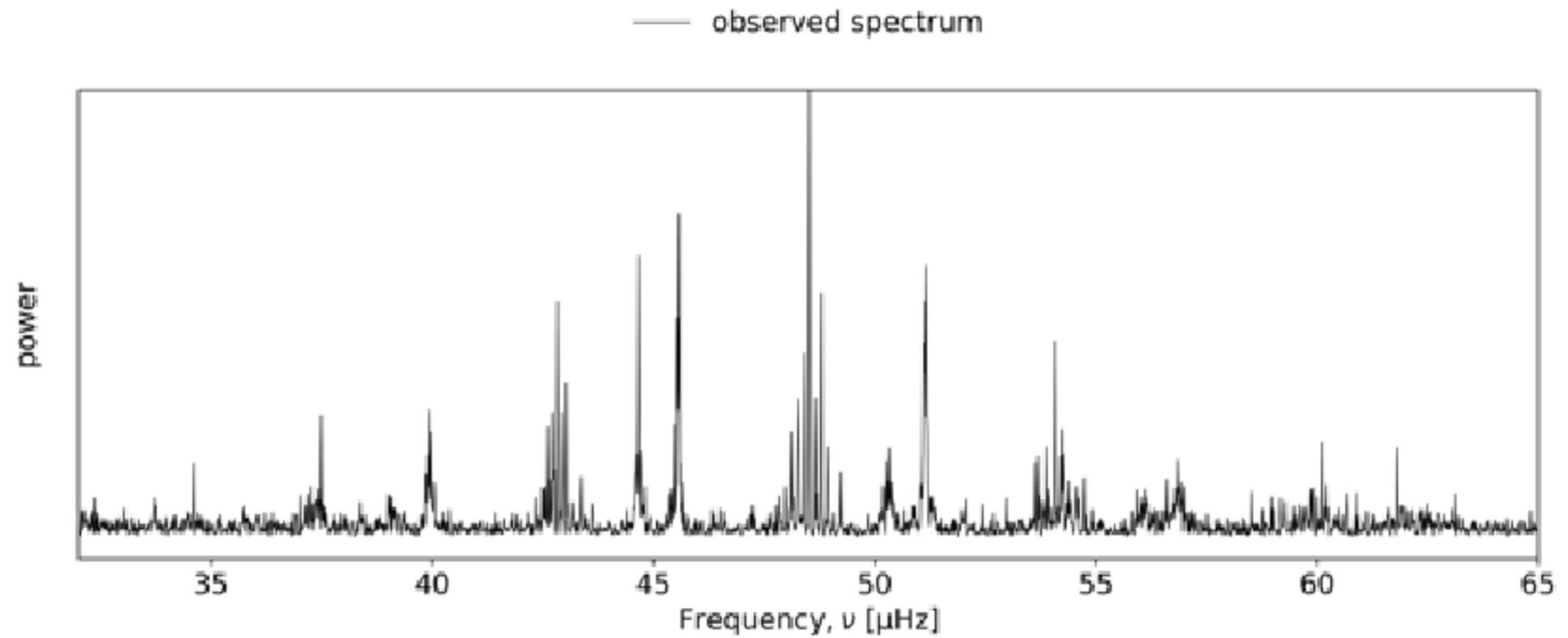
Cassa di risonanza:
modi di gravità



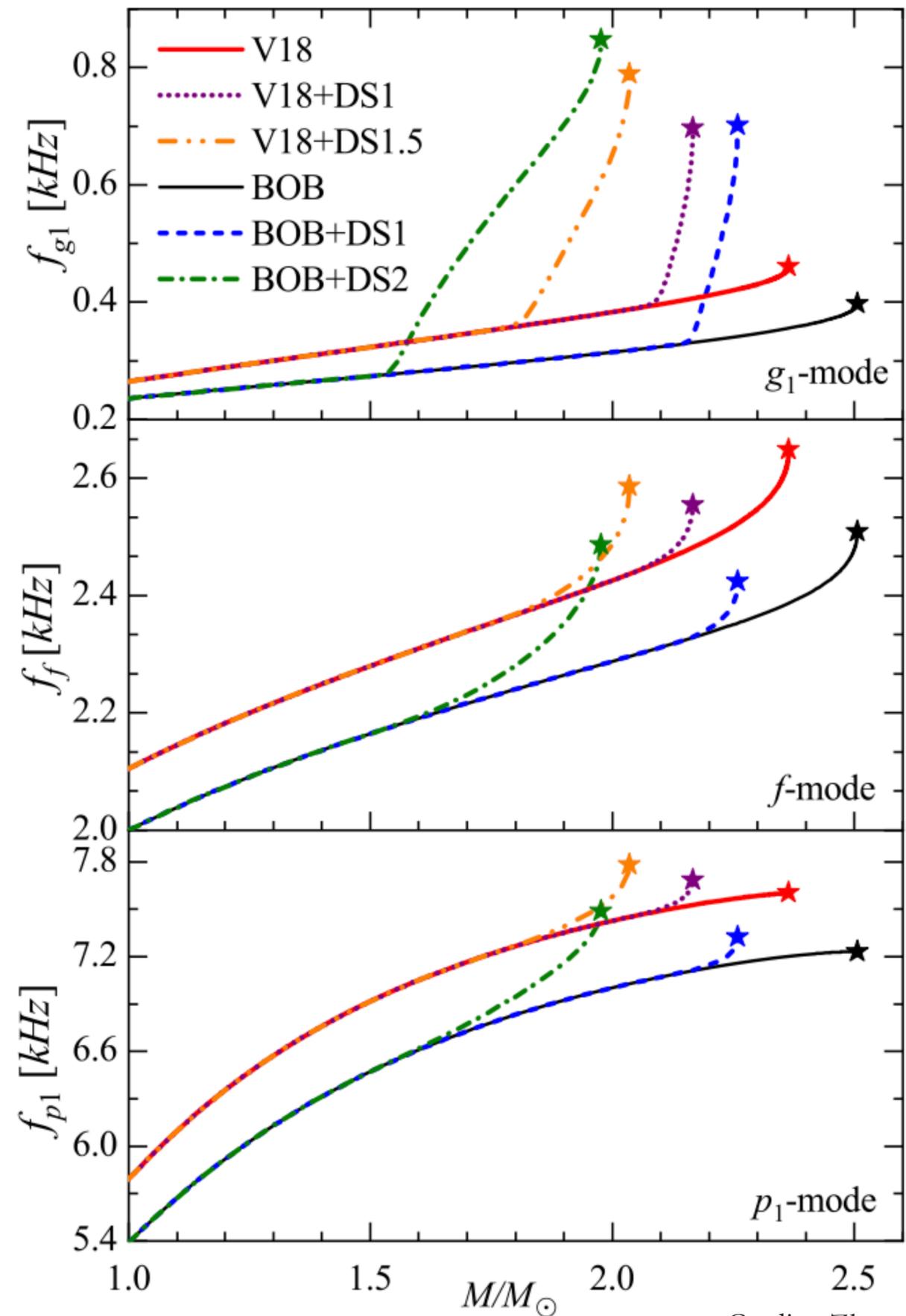
Che suono
fanno le stelle?

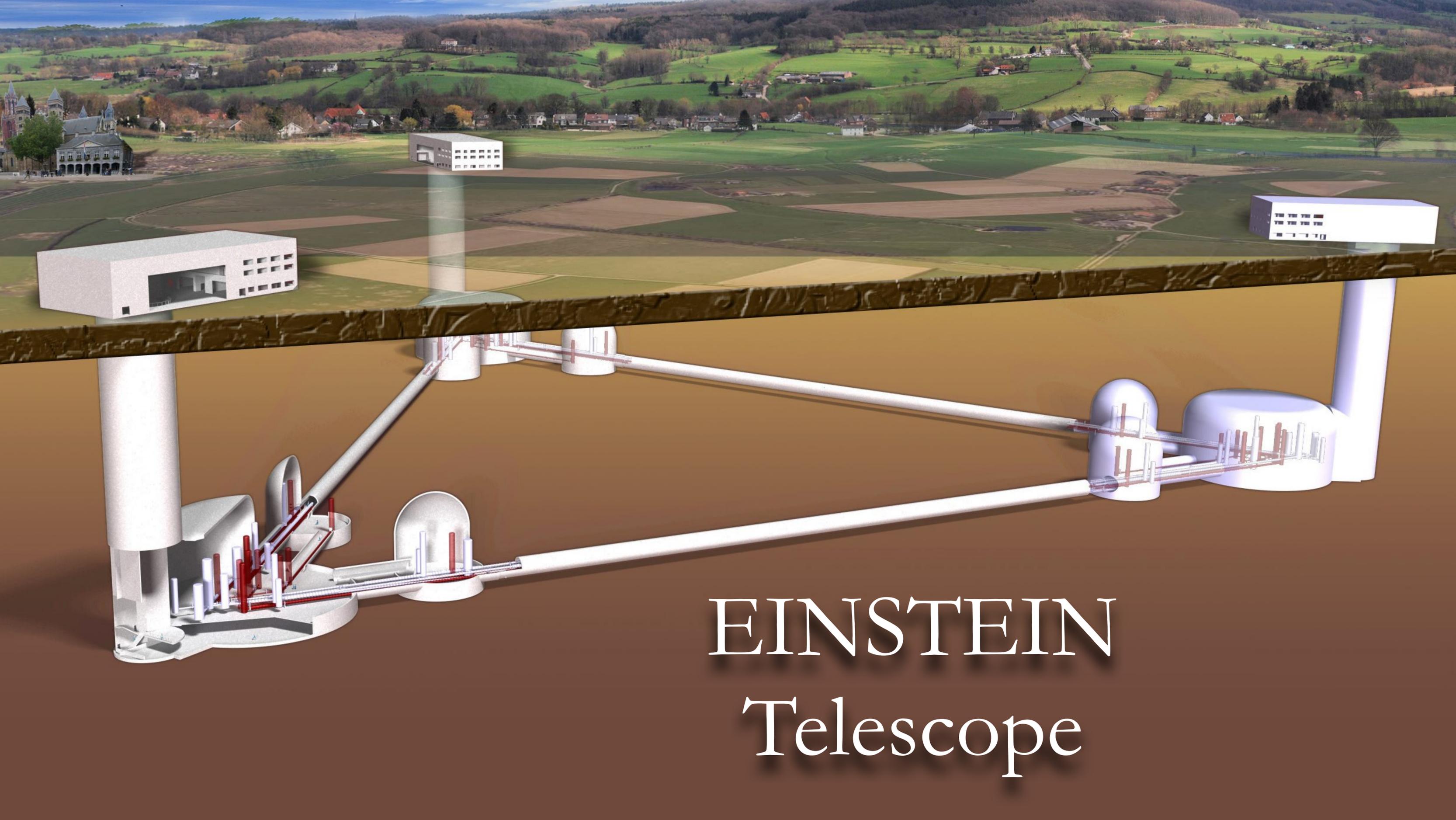


Che suono
fanno le stelle?



Oscillazioni nelle stelle di neutroni

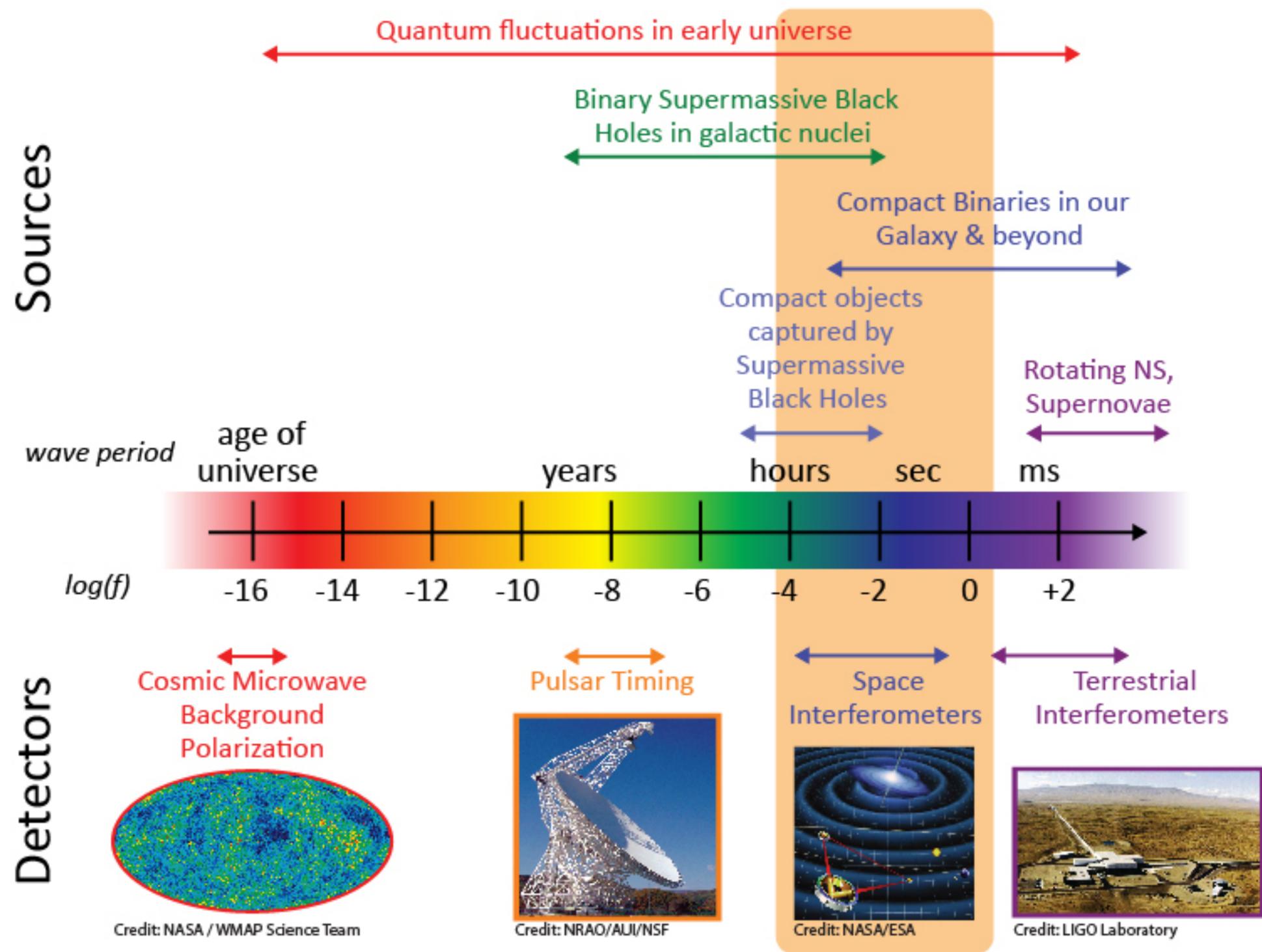


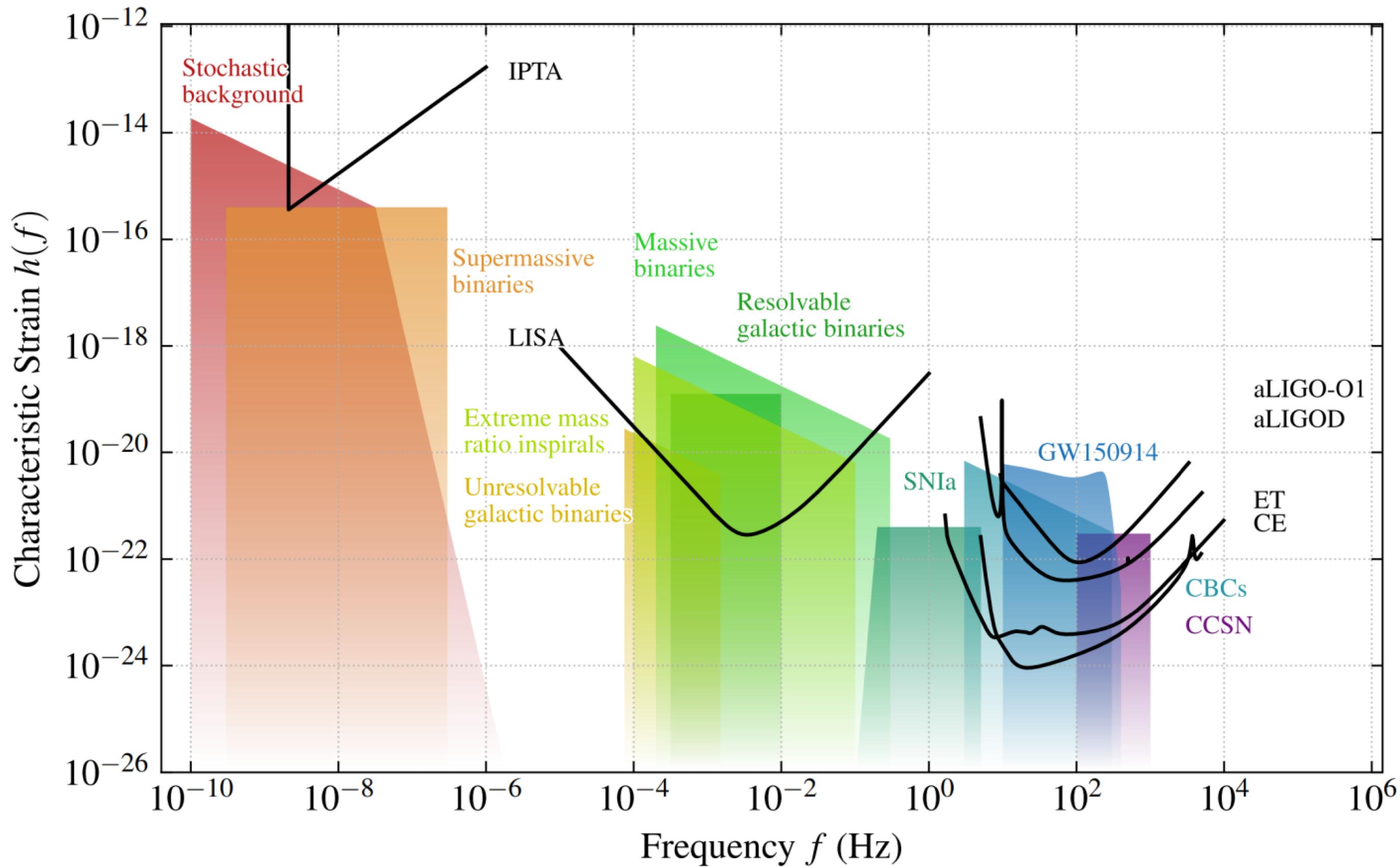


EINSTEIN Telescope

Lo spettro delle onde gravitazionali

The Gravitational Wave Spectrum





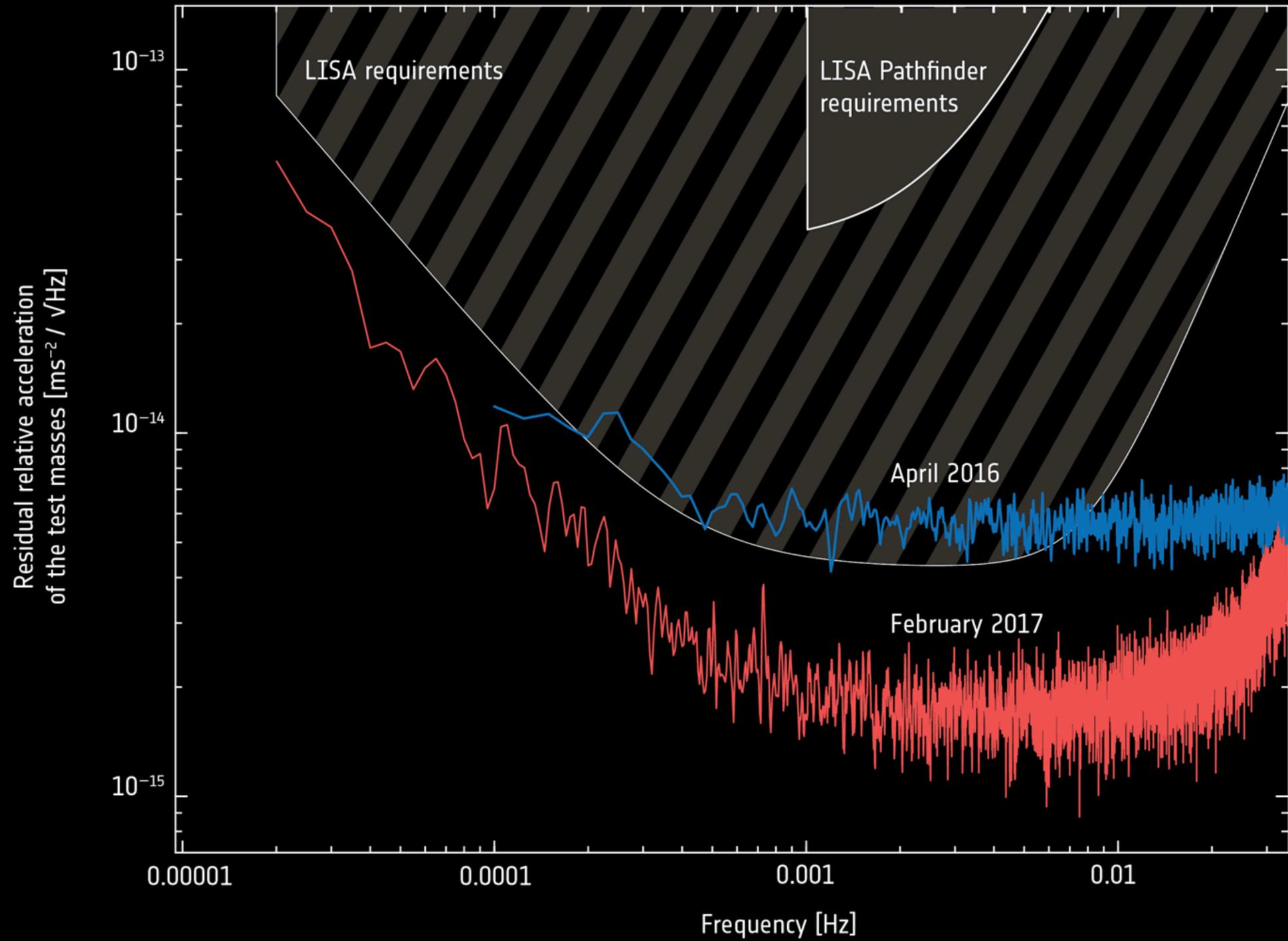
Telescopio spaziale LISA

Onde gravitazionali con LISA: esempi

- **Test della relatività generale** usando binarie di SMBHs;
- Test dell'**inflazione** a partire dal background delle GWs;
- Formazione dei **SMBHs** e co-evoluzione con la galassia;
- Dischi di accrescimento negli **AGN**;
- **Binarie** della Via Lattea, tra esse le stelle di neutroni (**precessione di Lense–Thirring**).



LISA Pathfinder



Massimiliano Matteuzzi, Corso di Astrofisica, 28/02/2025

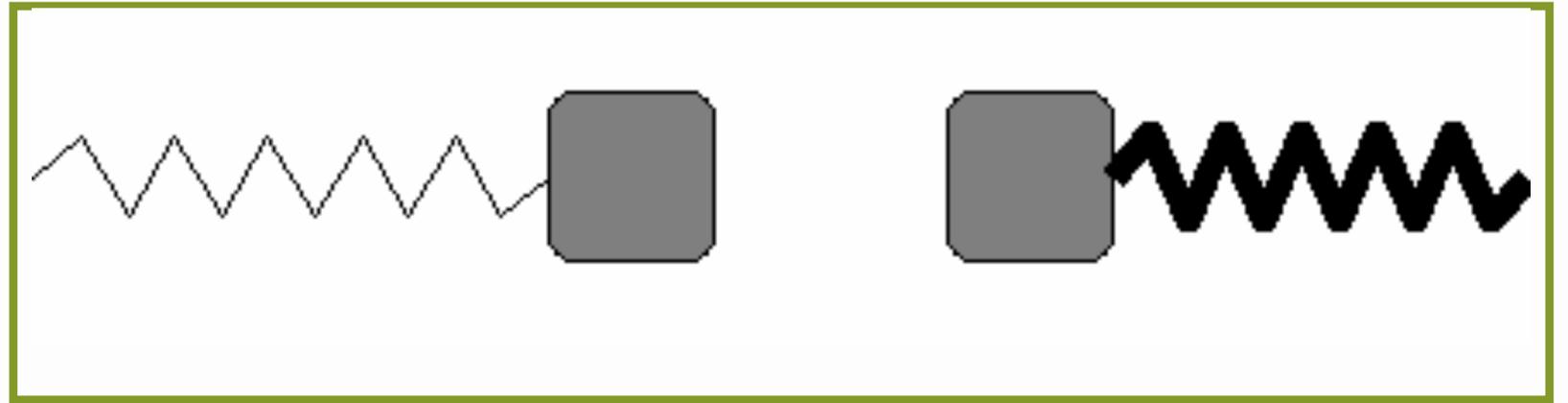
Grazie mille per l'attenzione!

Domande?

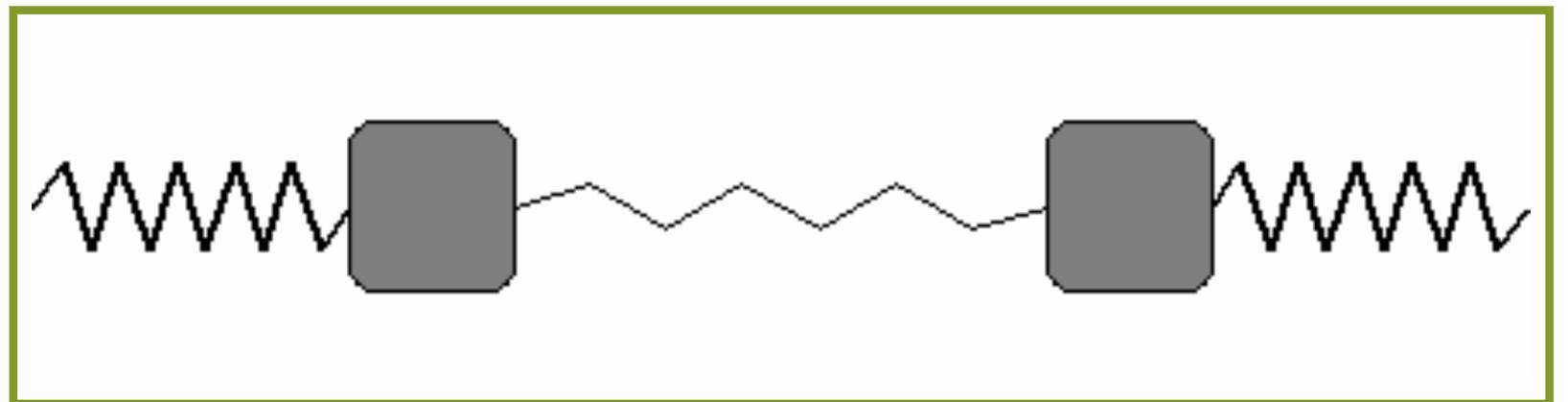
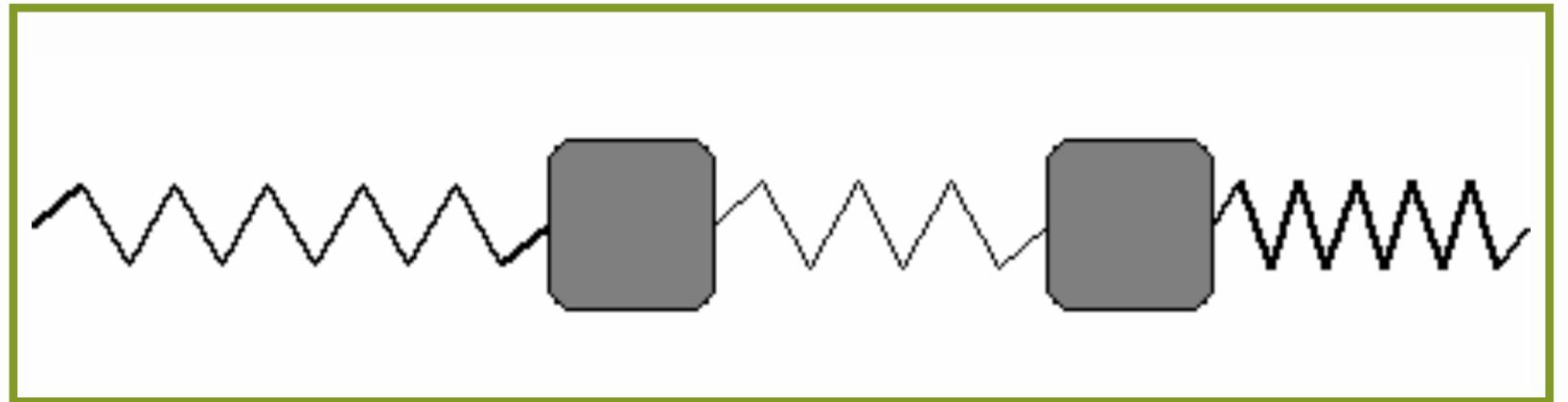
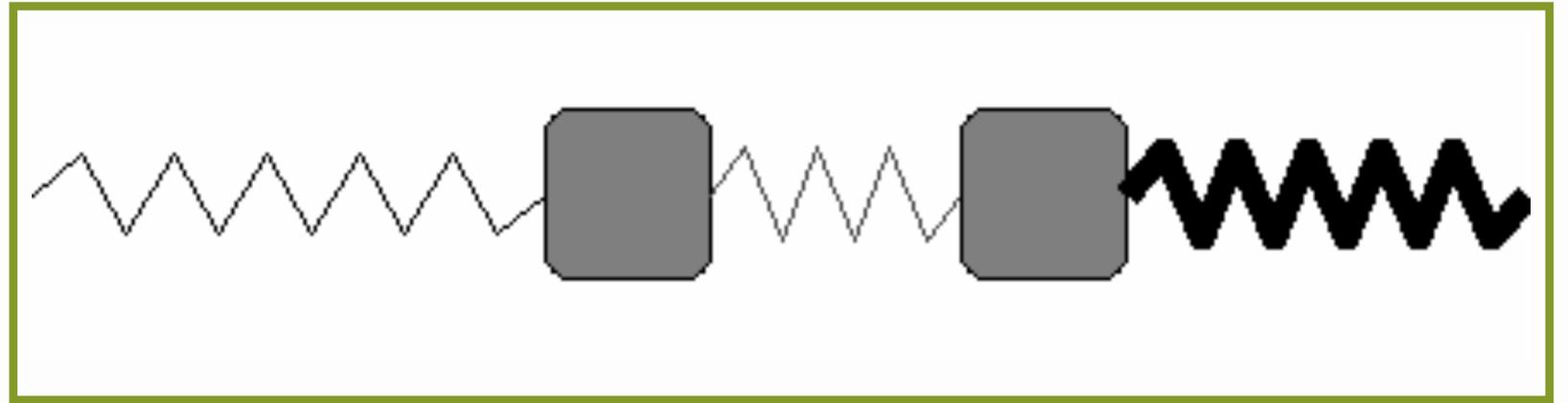
Bibliografia

- <https://www.virgo-gw.eu>
- <https://www.ligo.caltech.edu/images>
- <https://lisa.nasa.gov>
- <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>
- <https://www.einstein-telescope.it>

Accoppiamento
tra cavità risonanti



Accoppiamento
tra cavità risonanti



Casse di risonanza:
modi misti

