

-ONDE GRAVITAZIONALI DAL COSMO- ALLA SCOPERTA DI UN UNIVERSO INVISIBILE

2015: GW150914

2030-2034: eLISA

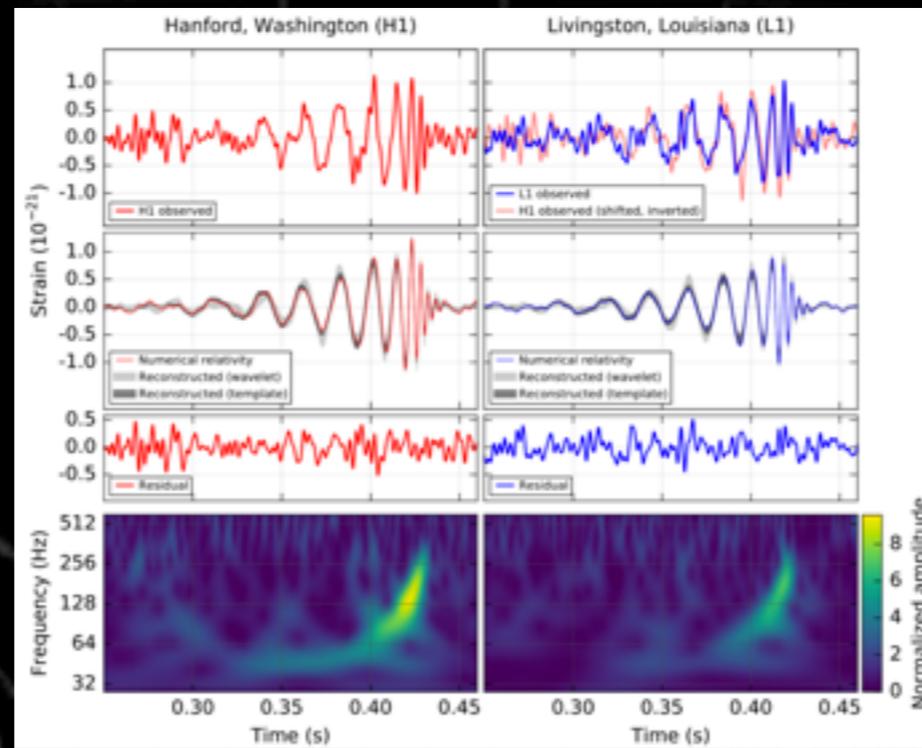
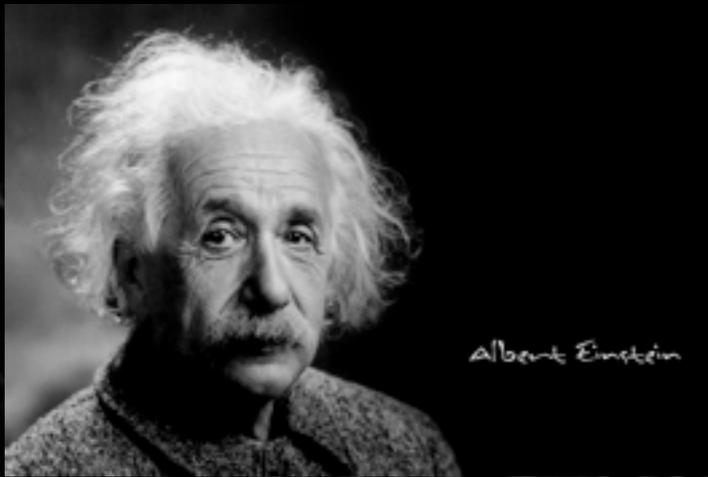
Monica Colpi
Dipartimento di Fisica G. Occhialini
Università di Milano Bicocca
eLISA Consortium Board

*I cieli di Brera
13 Aprile 2016*



The Visible Universe





14 Settembre 2015
9:50:45 UTC
09:50:45 UTC
**NASCITA DI UNA NUOVA
ASTRONOMIA**

fisica fondamentale - astrofisica - cosmologia
conoscenza complementare

Indice

- gravità: cos'è?
- onde gravitazionali: cosa sono ?
- GW150914 - una scoperta di immensa portata scientifica
- l'universo gravitazionale di LIGO-Virgo
- 2034: l'universo gravitazionale di eLISA: quale scienza? quali domande? quali scoperte? che informazione?
- universo multi-banda: eLISA, LIGO-Virgo insieme



GALILEO
1564-1642



GALILEO
coglie l'unità della Natura

" La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci stà aperto innanzi agli occhi -io dico l'Universo - ma non si può intendere se prima non si impara a intendere la lingua e conoscere i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica."



Il Saggiatore



NEWTON
1642-1726



spazio

*Lo spazio assoluto,
per sua natura senza
relazione ad alcunché
di esterno, rimane
sempre uguale e
immobile
(Newton, Principia)*

tempo

*Il tempo assoluto
vero e matematico in
sé e per sua natura
senza relazione ad
alcunché di esterno.
Tempo scorre
uniformemente
(Newton, Principia)*

gravità

forza a distanza fra masse

CHE COSA È LA GRAVITÀ ?

The way of Newton
mass tells gravity how to exert a force
“force tell mass how to accelerate”

azione a distanza fra masse
istantanea e senza “tocco”



1915: gravità è manifestazione
della geometria dello spazio tempo

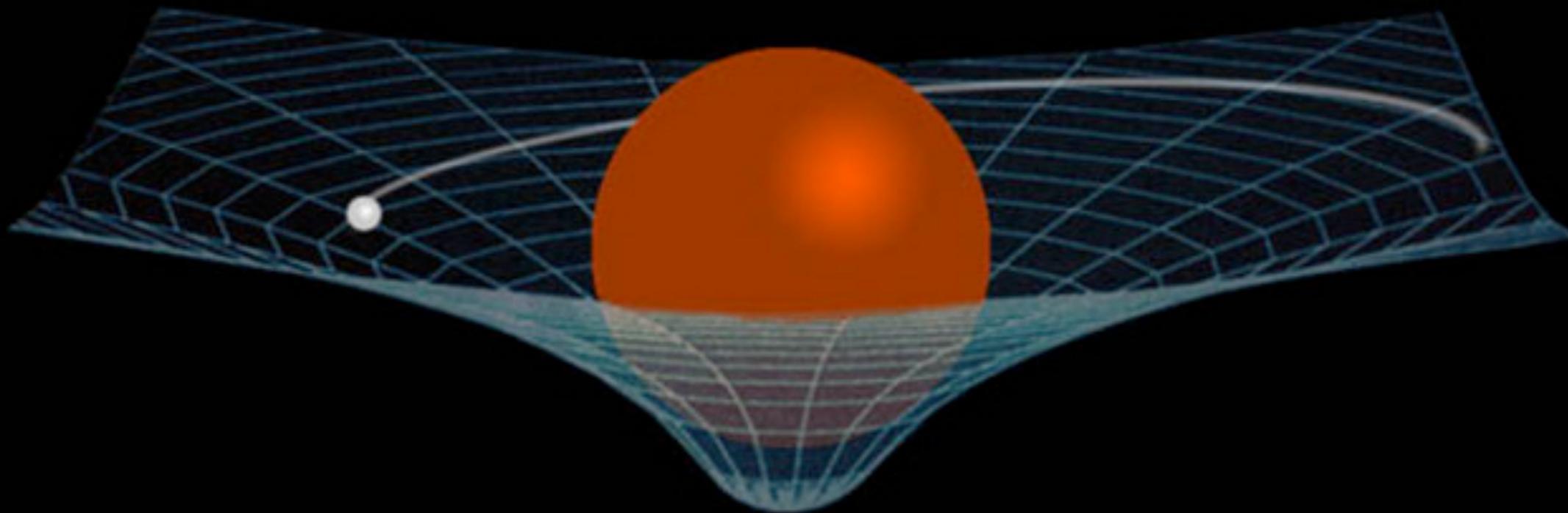
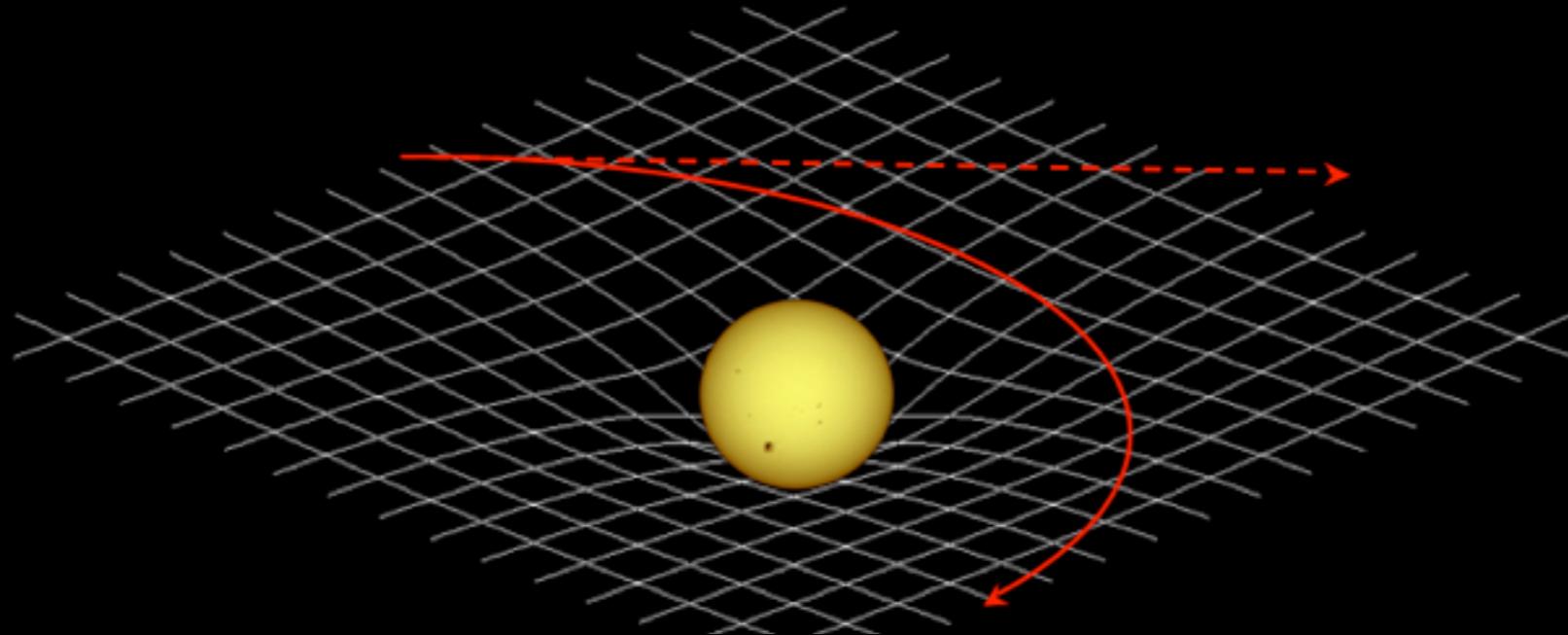
curvatura dello spaziotempo

contenuto di massa energia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

matter tells spacetime how to curve

spacetime tells matter how to move

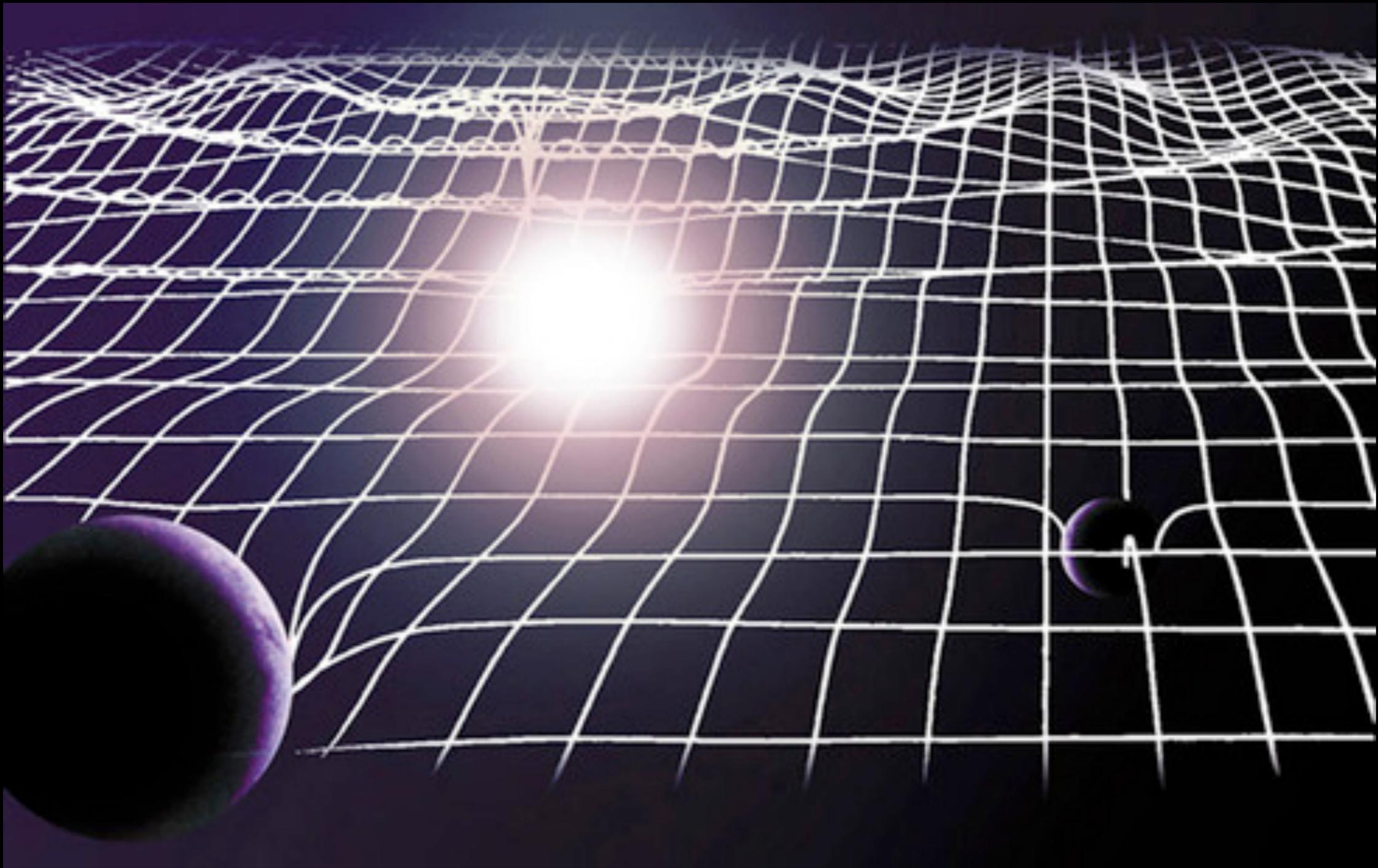


ONDE GRAVITAZIONALI

DISTURBI NELLA CURVATURA DELLO
SPAZIO TEMPO CAUSATI DAL MOTO DI
GRANDI MASSE

SI PROPAGANO ALLA VELOCITA' DELLA LUCE

IN REALTA'
NON VIAGGIANO ATTRAVERSO
LO SPAZIO E'
**LA TESSITURA DELLA
SPAZIO TEMPO STESSO CHE OSCILLA**



**CORRENTI DI MASSA-ENERGIA
INDUCONO PERTURBAZIONI NELLA
TESSITURA DELLO SPAZIO TEMPO
che propagano alla velocità della luce**

$$\nabla^2 h_{\mu\nu} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2} = -16\pi T_{\mu\nu}$$

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

ANALOGIE E DIFFERENZE CON FENOMENI ELETTROMAGNETICI

SORGENTI

EM
**CARICHE
ELETTRICHE
ACCELERATE**

GW
**GRANDI MASSE
ACCELERATE**

EMISSIONE **INCOERENTE**
DA ATOMI
E/O MOLECOLE

EMISSIONE **COERENTE**
DA MASSE COSMICHE

FREQUENZA

EM

LUNGHEZZE D'ONDA

MOLTO MINORI

DIMENSIONI DELLA

SORGENTE

(stella!)

emesse da particelle

elementari

radio-gamma

GW

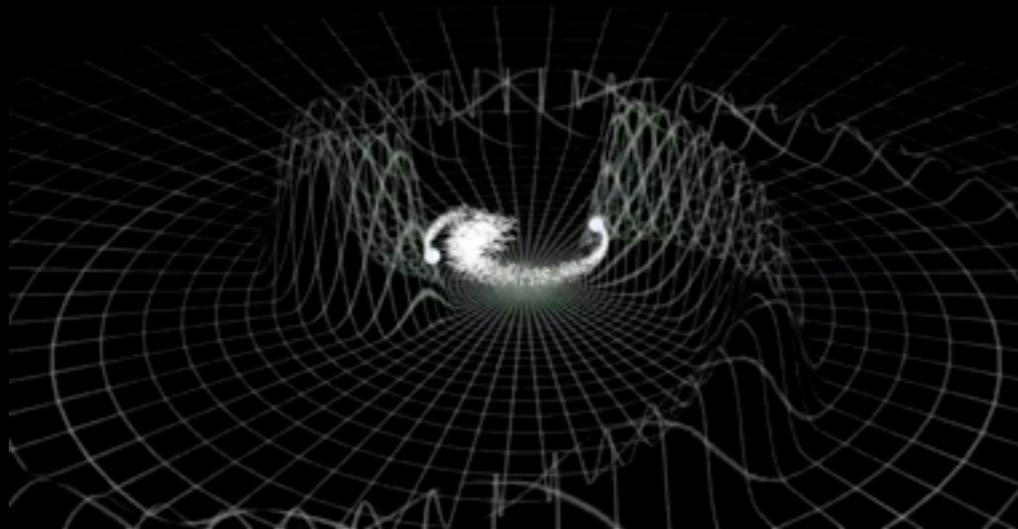
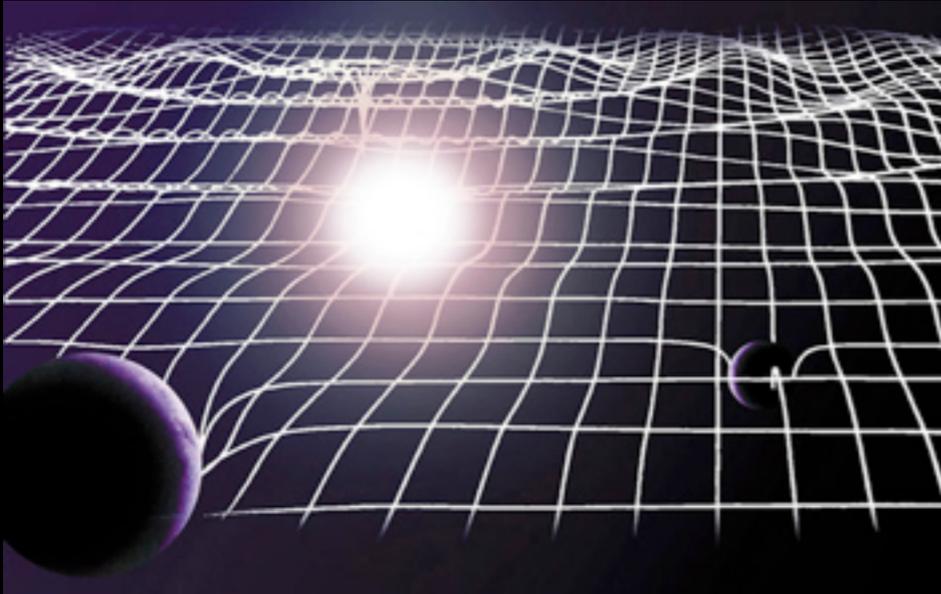
LUNGHEZZE D'ONDA

CONFRONTABILI

DIMENSIONI DELLA

SORGENTE

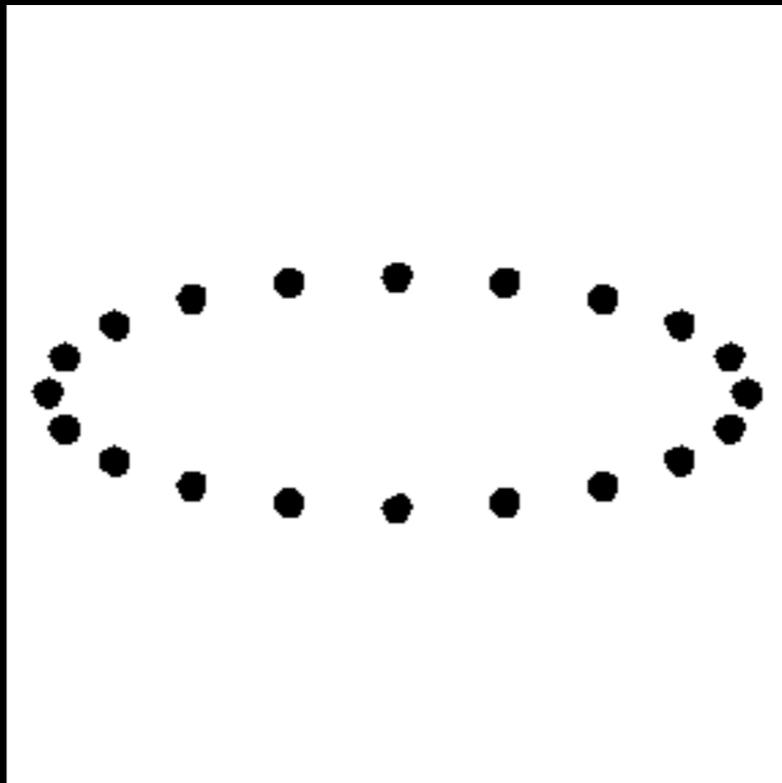
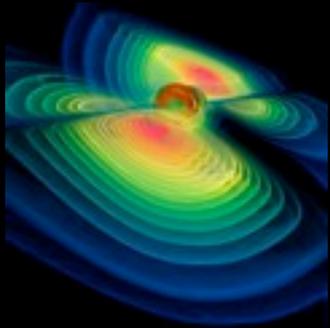
GRAVITÀ

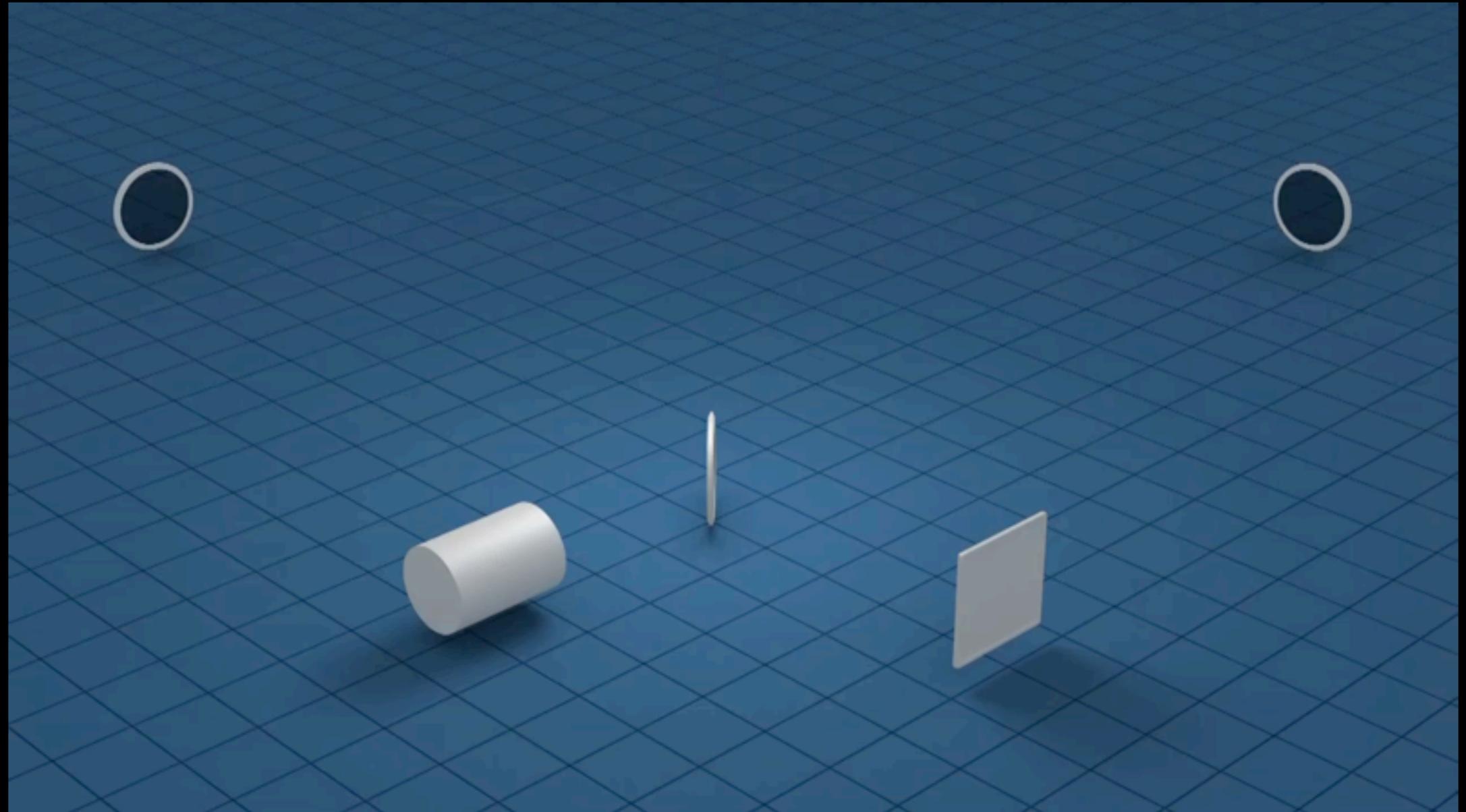


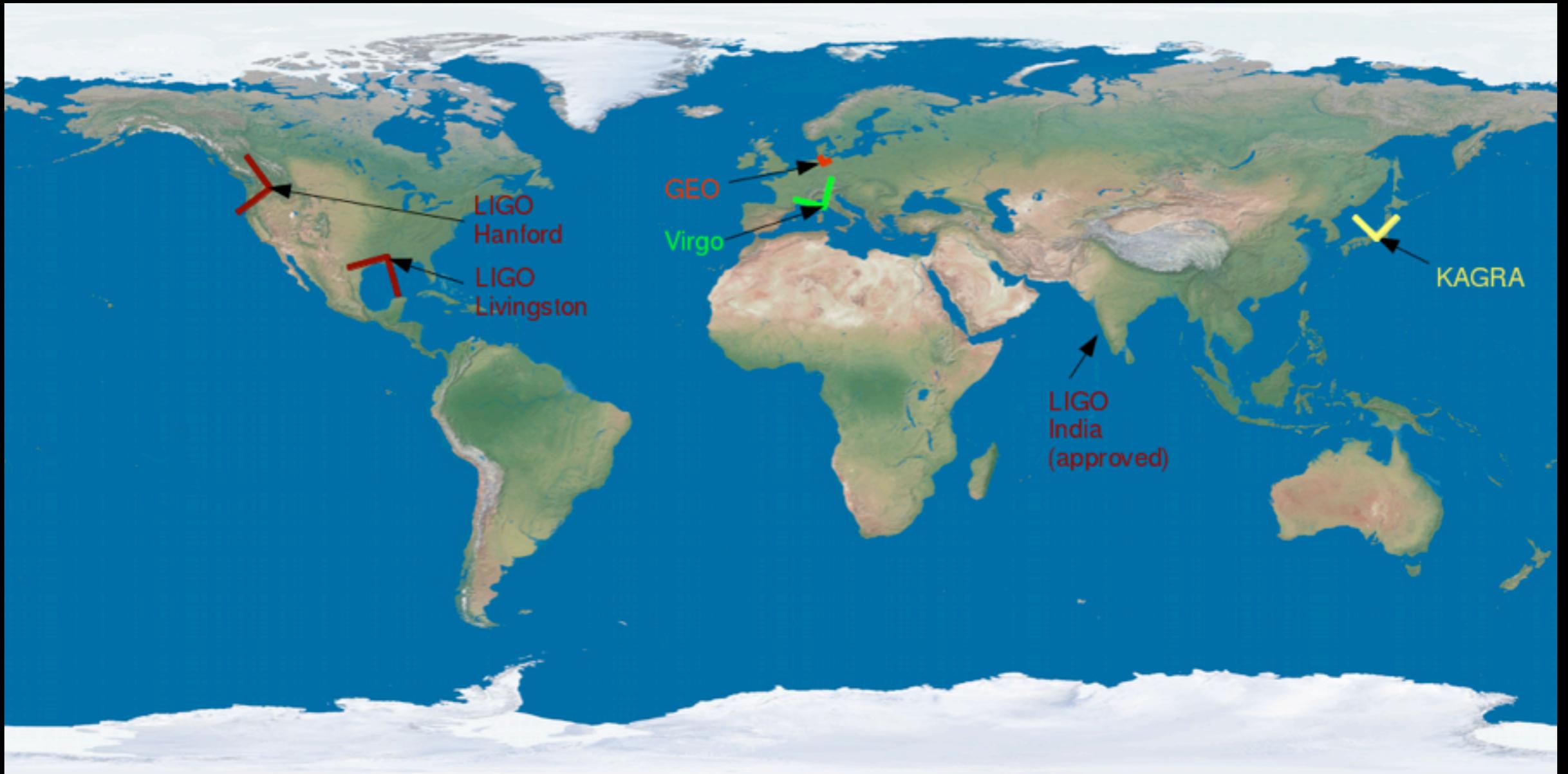
vedere masse
"NON LUMINOSE"
rivelando le oscillazioni
dello spaziotempo

l'onda intesa è rivelabile attraverso la misura di oscillazioni spaziali su un anello di masse in caduta libera

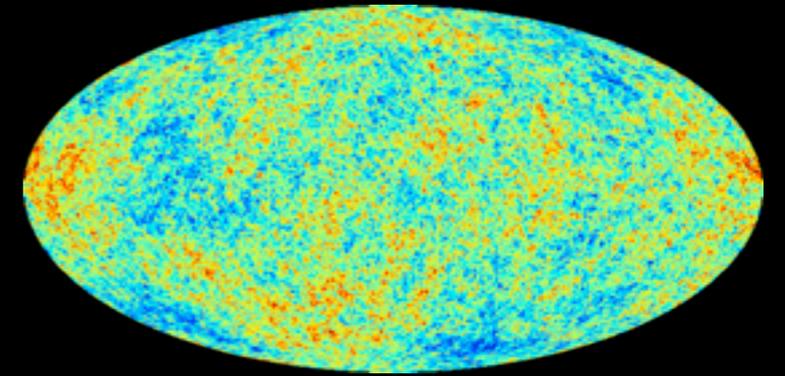
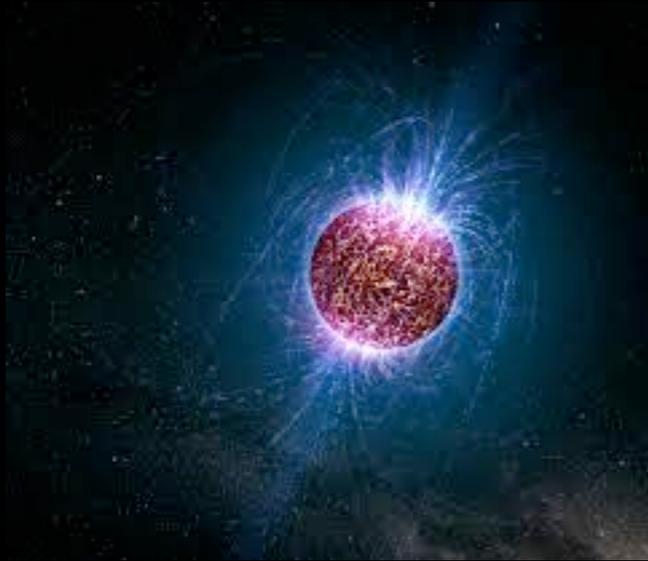
che fungono nel loro insieme da rivelatori "h" possiede 2 stati di polarizzazione indipendenti



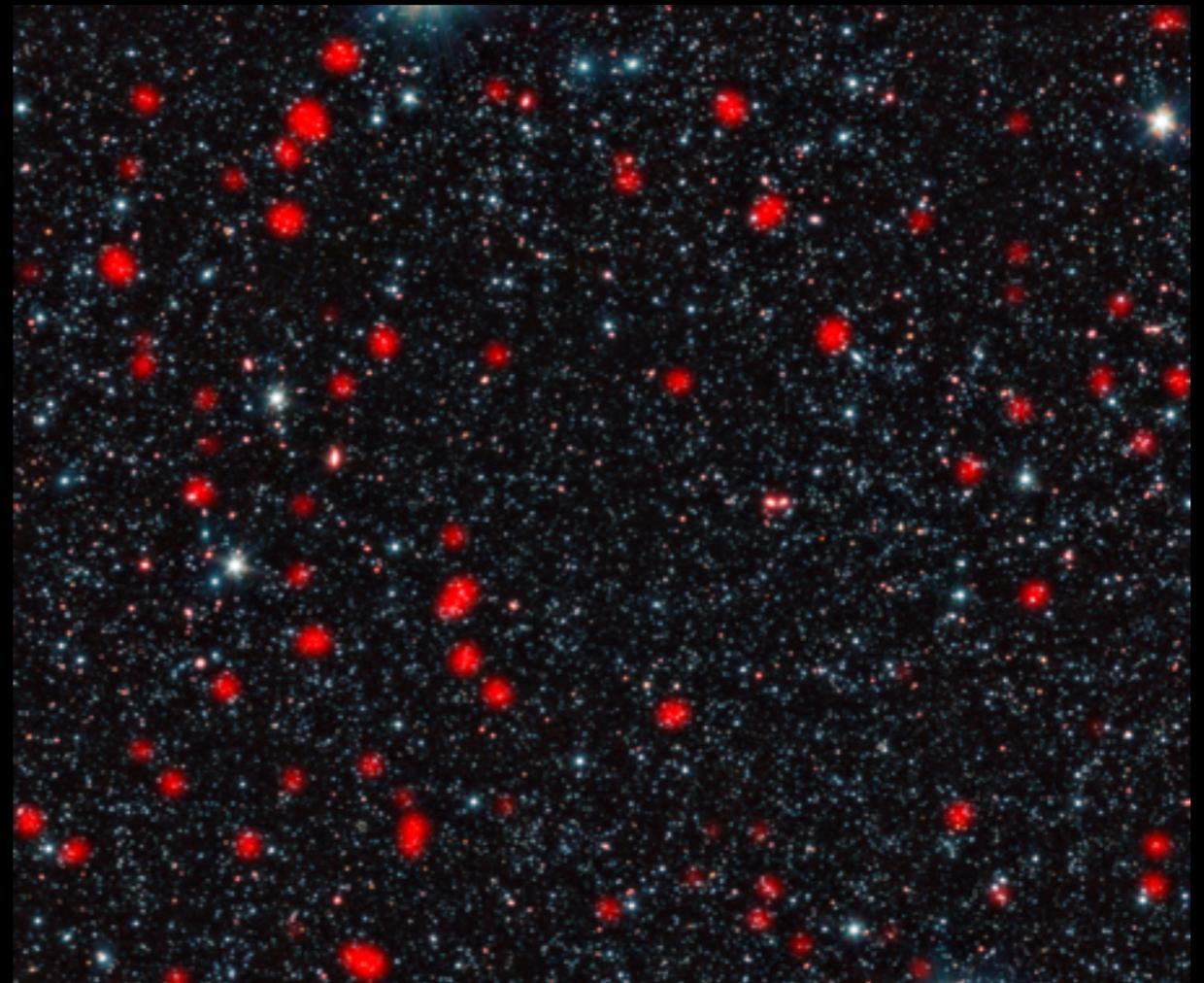




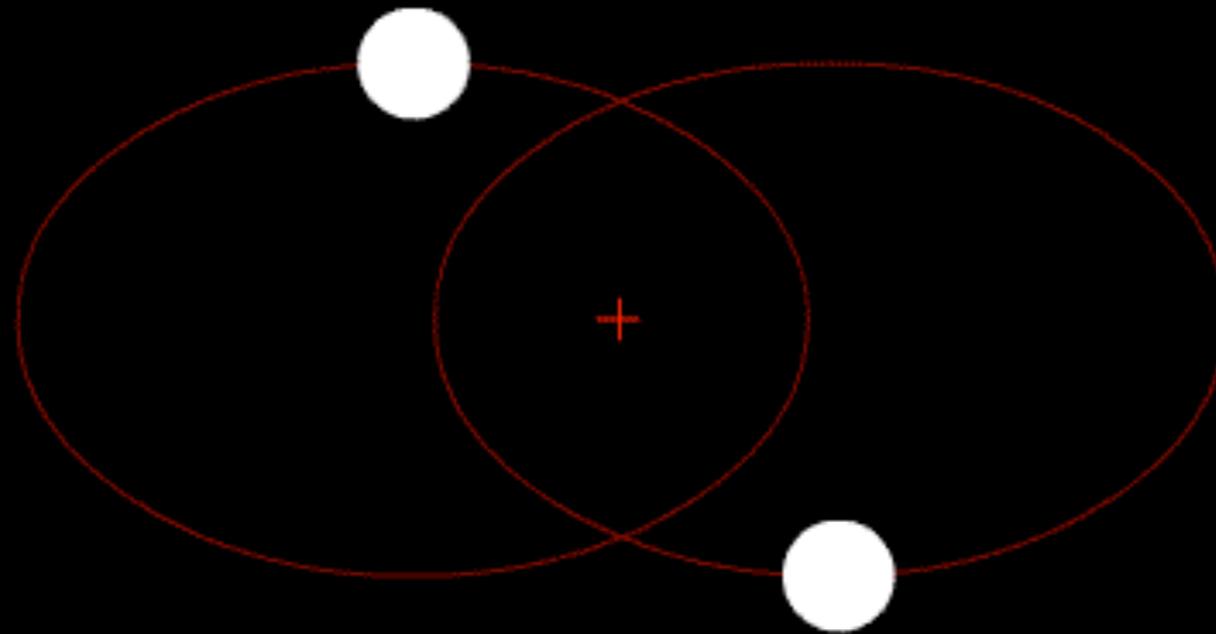
- QUALI SORGENTI?
- **tutte** ... ma le uniche "potenti" sono gli oggetti "collassati"
- lo spaziotempo è una struttura rigida e per "perturbarlo" sono necessari cambiamenti nella distribuzione là dove la gravità è estrema



- nane bianche
- stelle di neutroni
- buchi neri
- l'universo



Binarie



$$f_{\text{gw}} = 2f_{\text{orbit}} = \frac{1}{\pi} \frac{G^{1/2} (m_1 + m_2)^{1/2}}{a^{3/2}} \sim 2 \times 10^{-4} \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_{\odot}}{a} \right)^{3/2} \text{ Hz}$$

Rivelazione indiretta delle onde gravitazionali

Pulsar come orologi cosmici

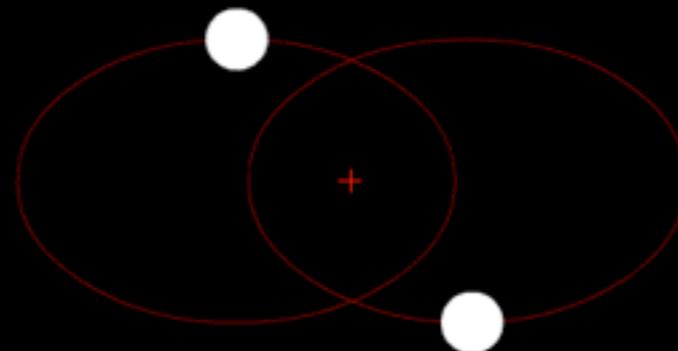
stabilita' su 1 parte su 10^{14}

sistematiche varizioni nei tempi di arrivo attribuite al moto orbitale

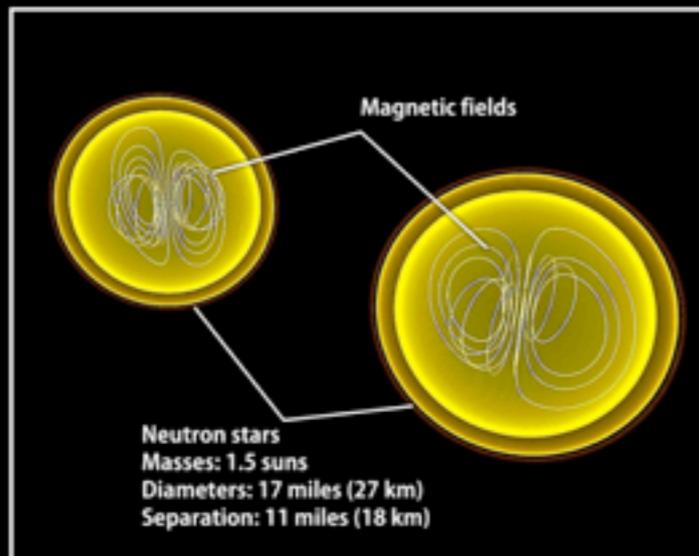
per PSR1913+16 di 7.75 ore

tasso di riduzione del periodo orbitale di 76.5 microsecondi per anno

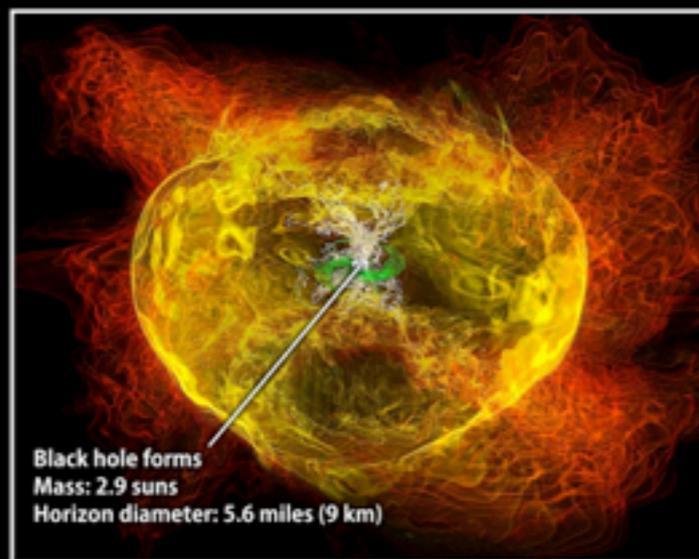
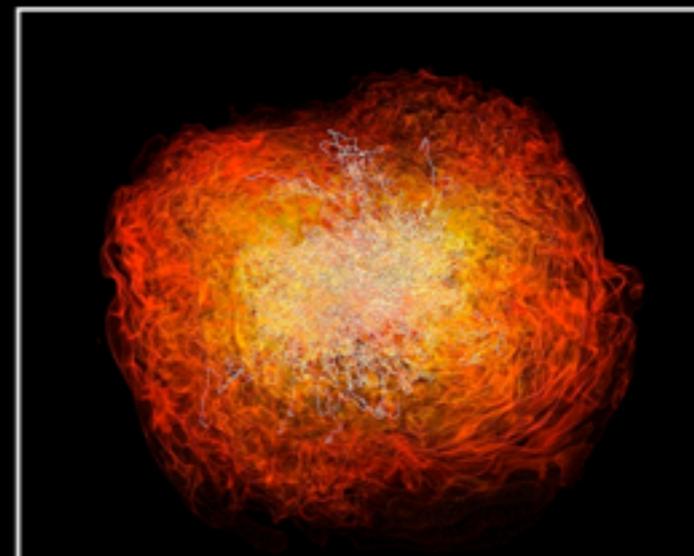
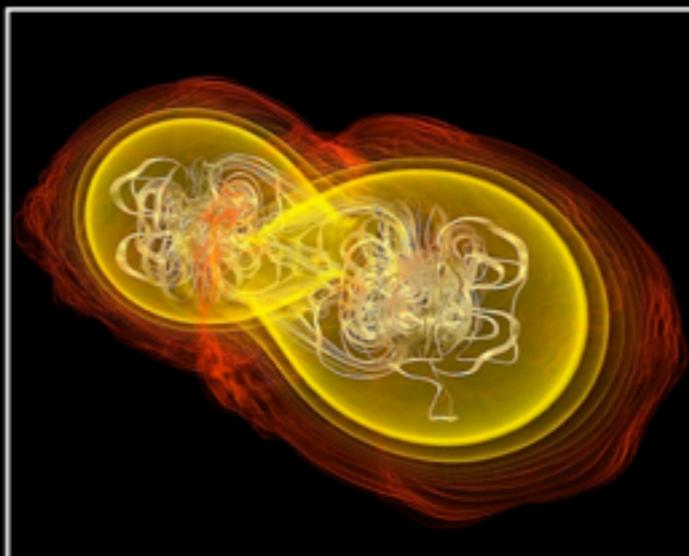
ossia 3.5 metri all'anno



Crashing neutron stars can make gamma-ray burst jets



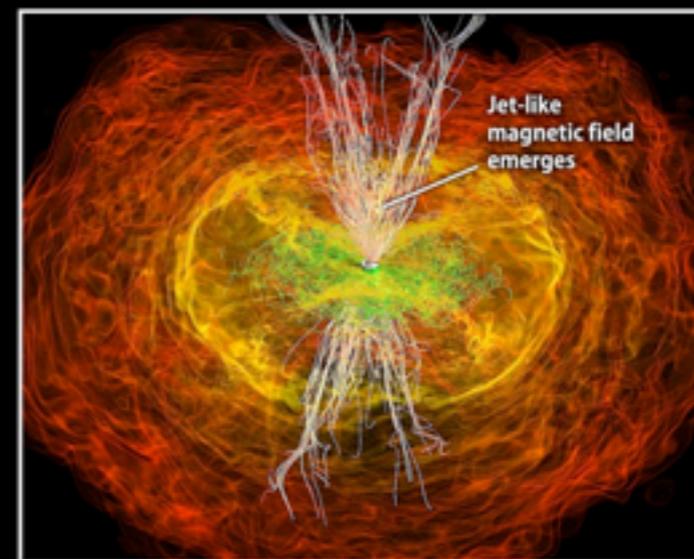
Simulation begins



15.3 milliseconds



21.2 milliseconds



26.5 milliseconds

Credit: NASA/AEI/ZIB/M. Koppitz and L. Rezzolla

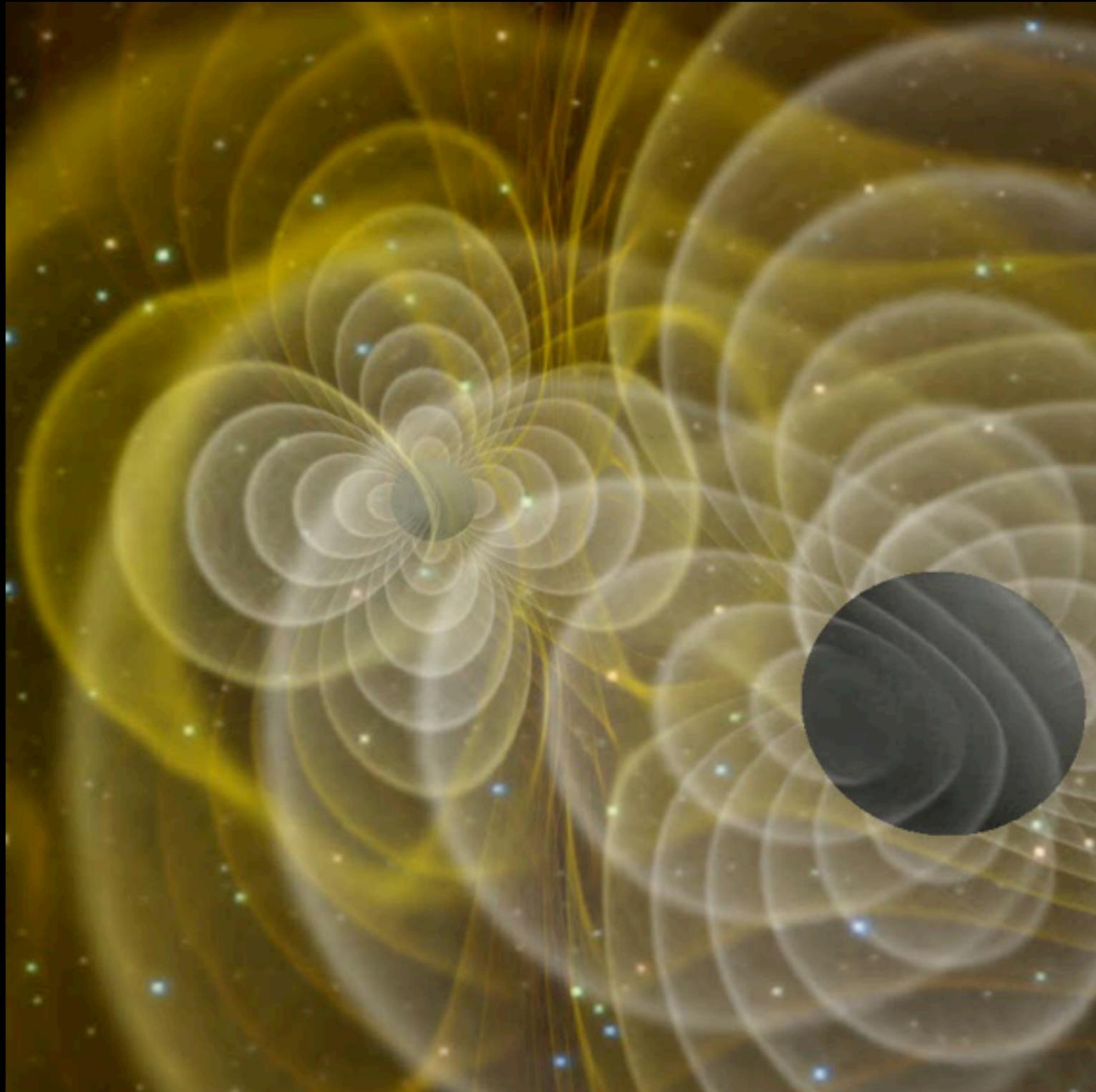
BUCO NERO

massa

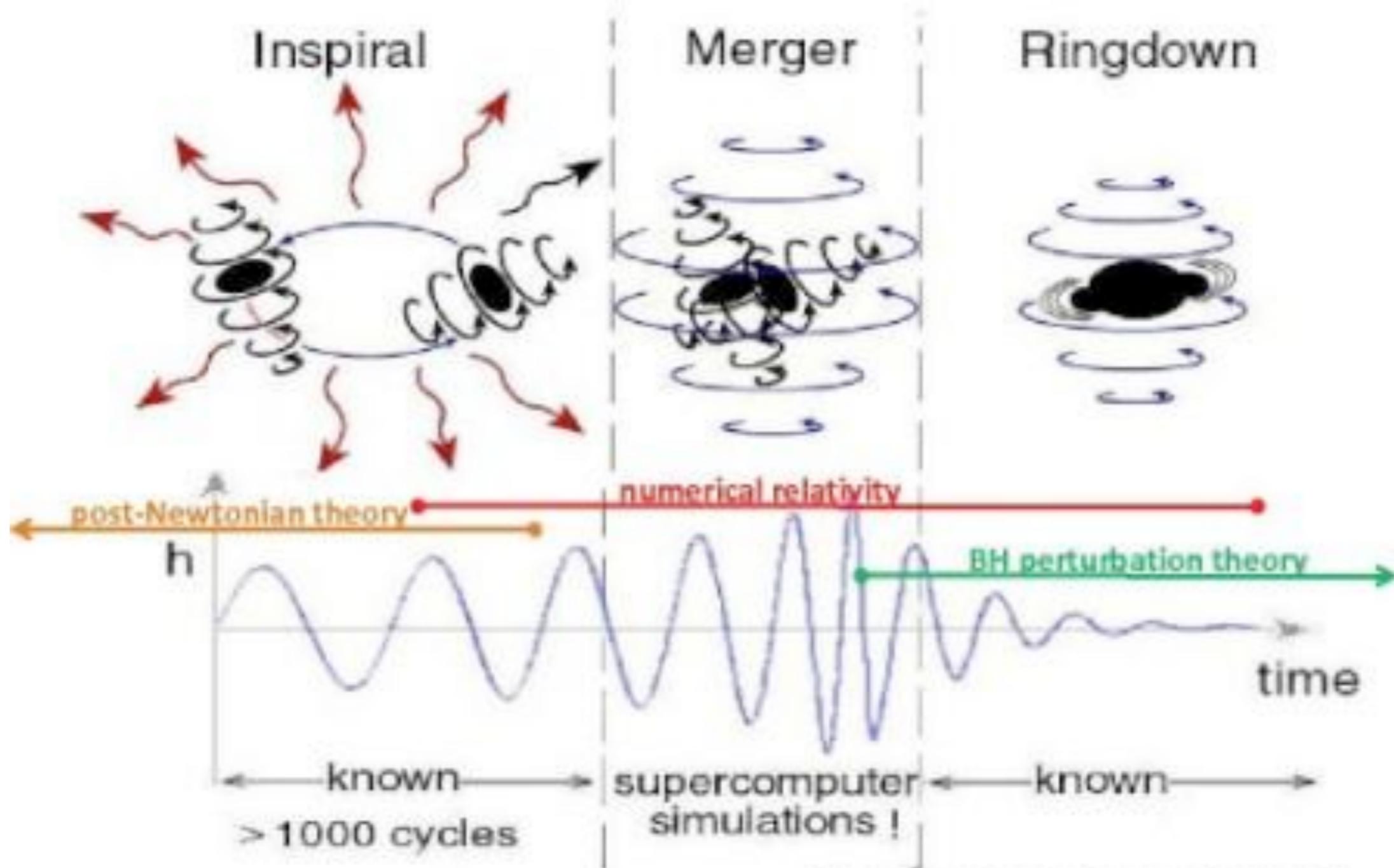
spin



BINARIE di buchi neri

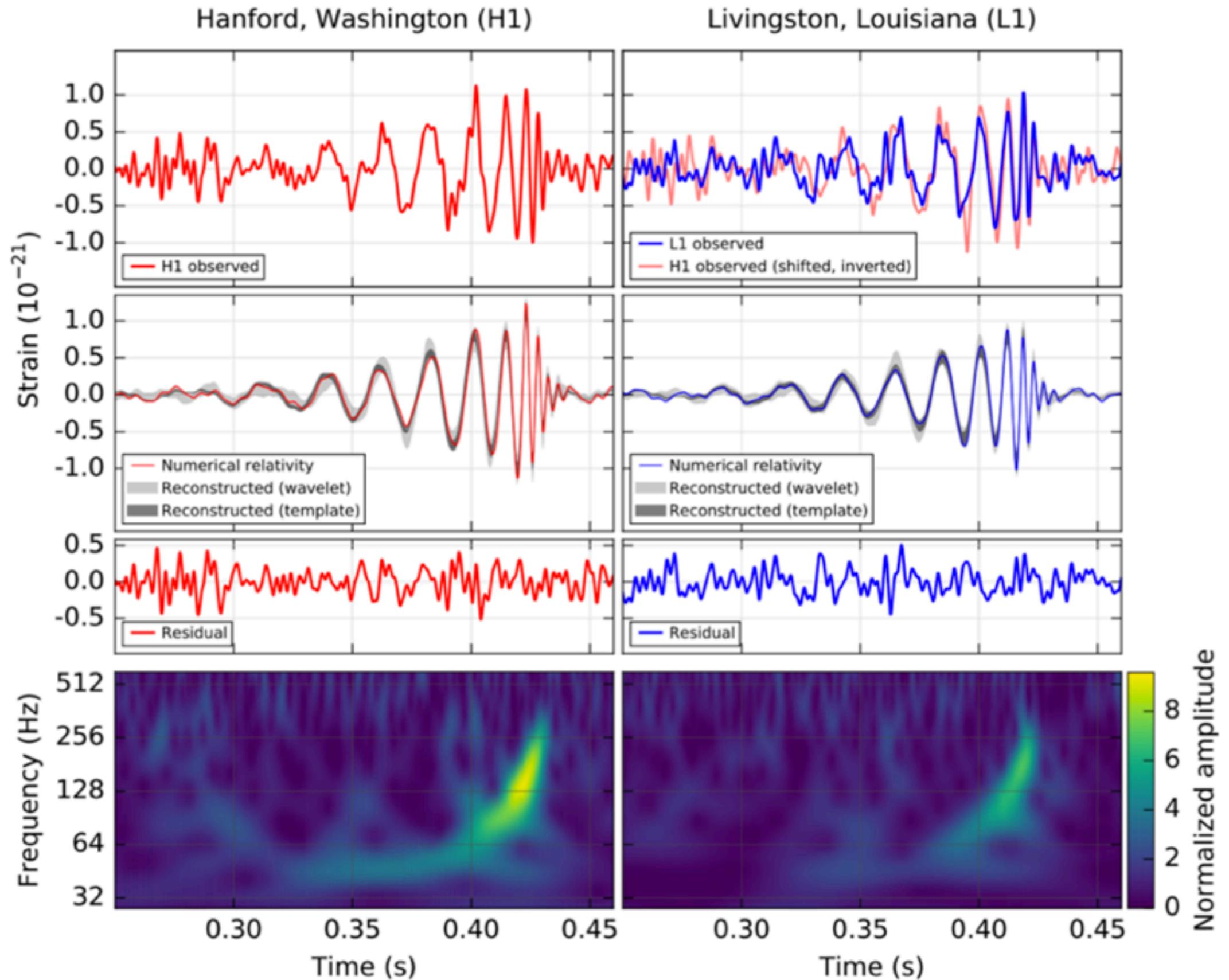


Cartoon of BH coalescence:



[slide adapted from Thorne, Centrella]

LA SCOPERTA



GW150914

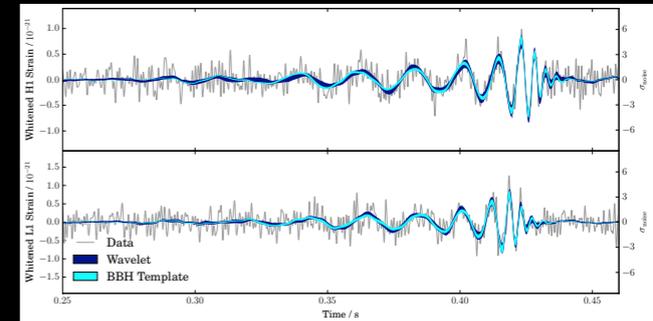
onde trasportano energia

$$L \simeq \frac{32}{5} \frac{c^5}{G} \left(\frac{v}{c} \right)^{10} \sim 3.6_{-0.4}^{+0.5} \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$$

$$E \simeq 3_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$$

$$\frac{\delta s}{L} \sim h(t) \sim 10^{-21}$$

GW150914



Primary black hole mass

$$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

Secondary black hole mass

$$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Final black hole mass

$$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Final black hole spin

$$0.67_{-0.07}^{+0.05}$$

Luminosity distance

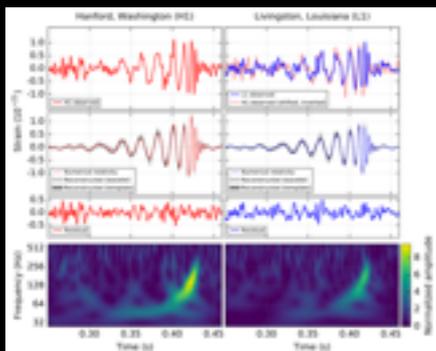
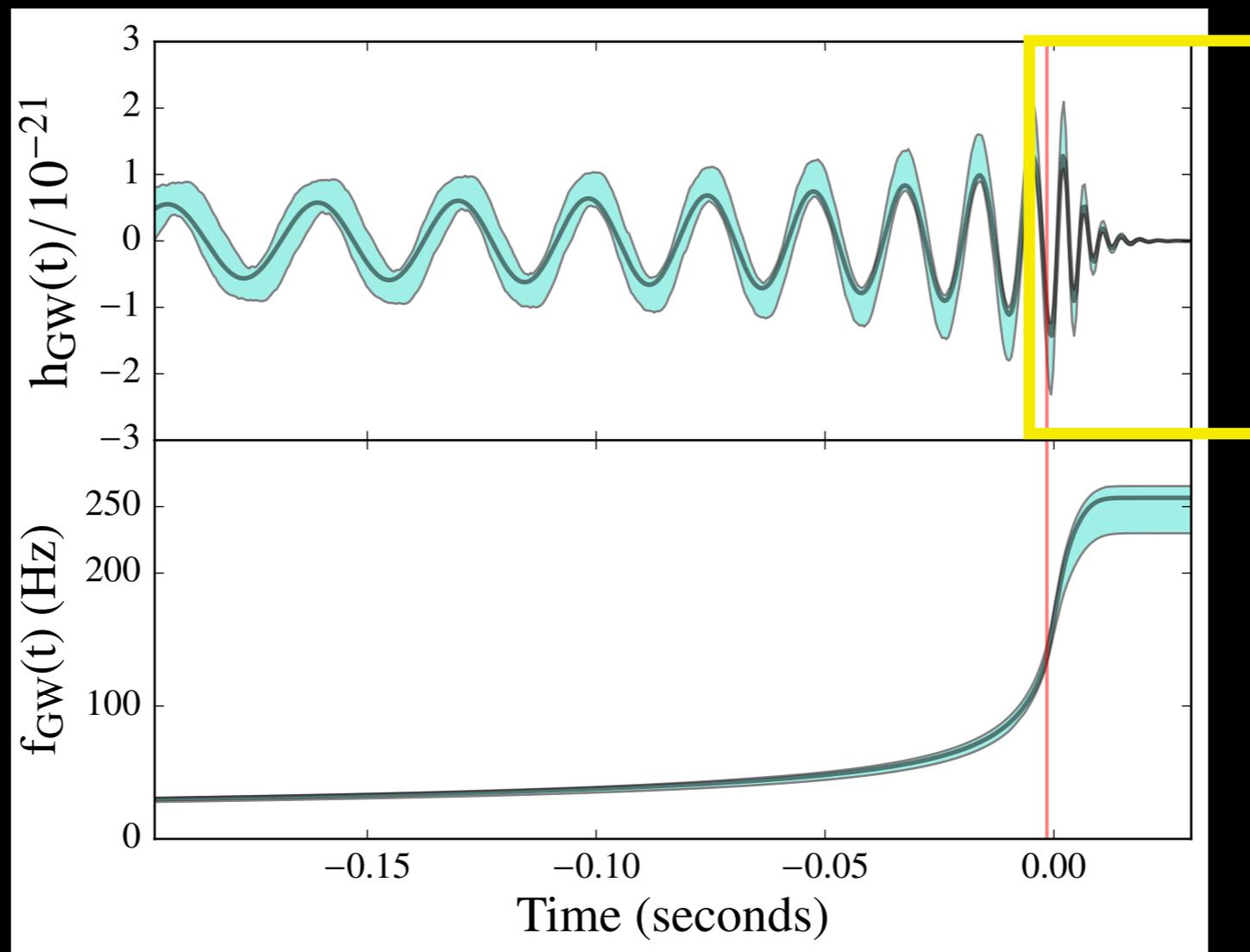
$$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

Source redshift z

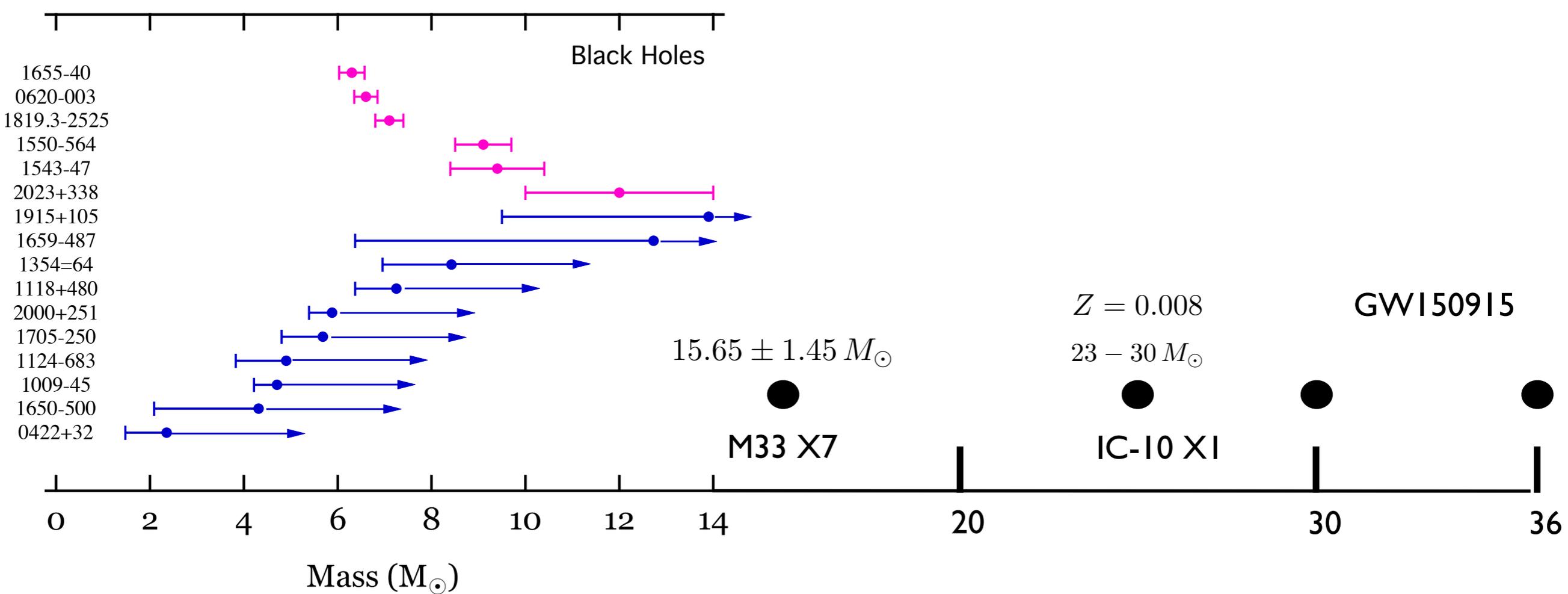
$$0.09_{-0.04}^{+0.03}$$

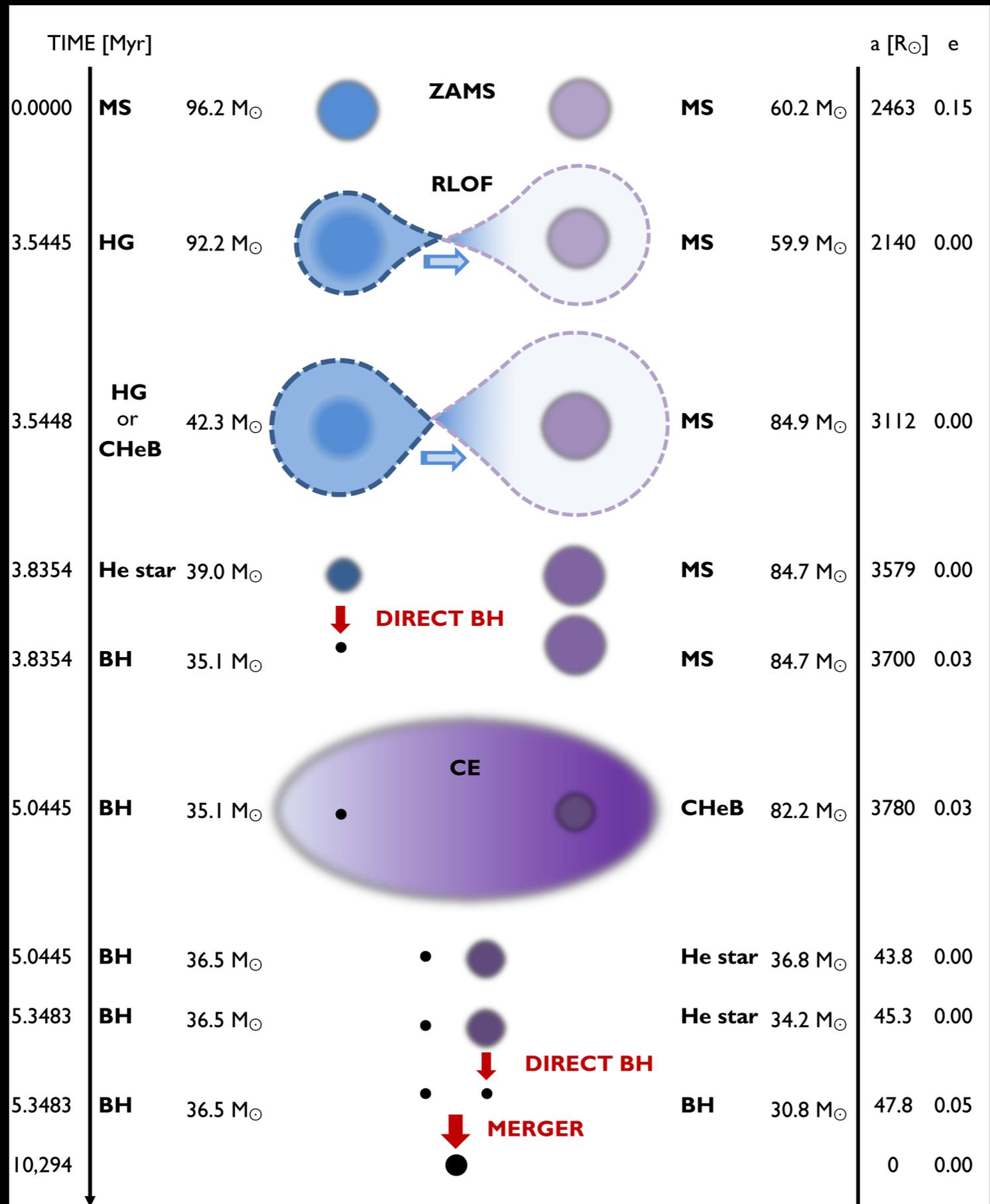
1,2 Gy fa

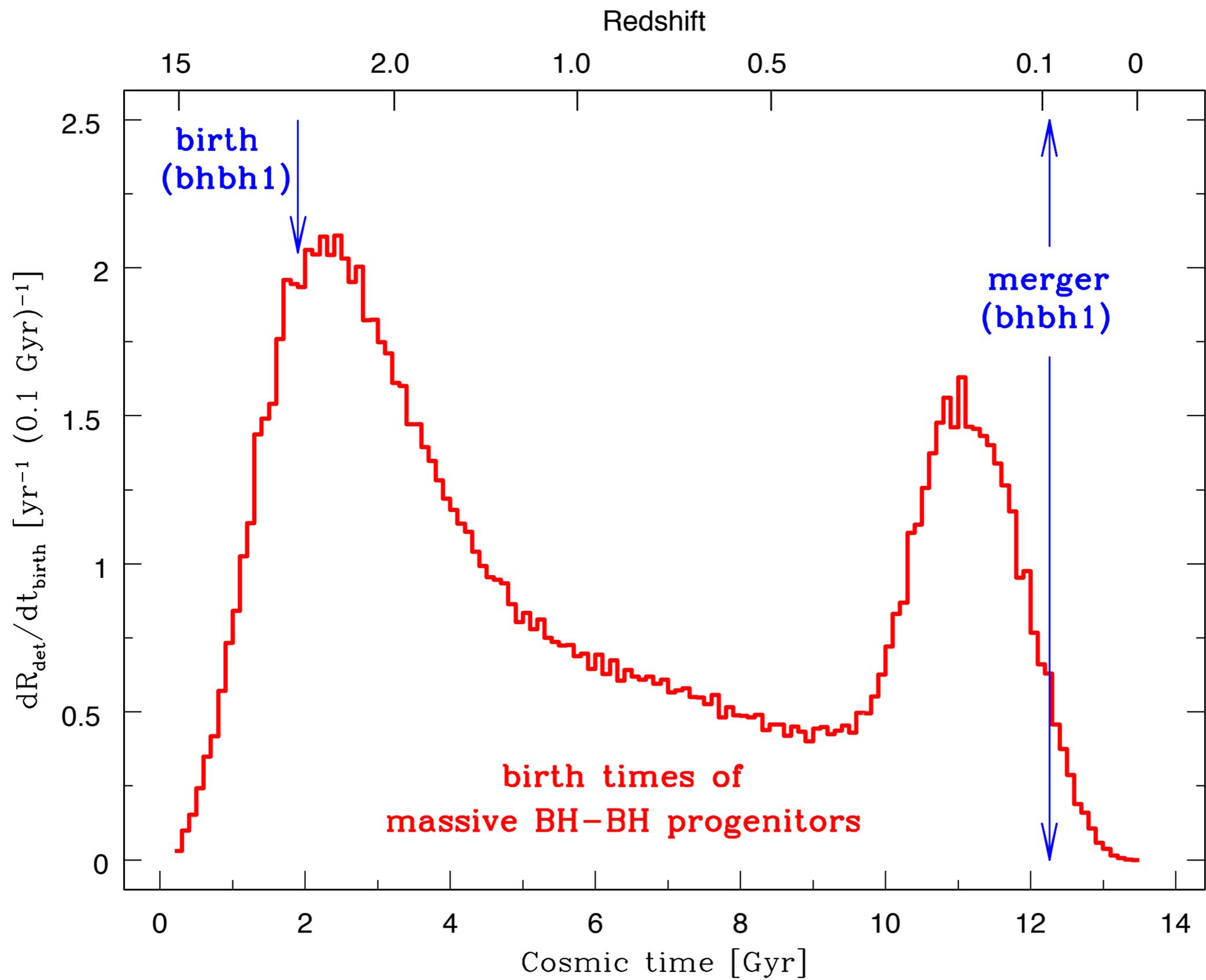
inspiral-merger-**ringdown**



- primo test di gravità in campo forte nel settore dinamico
- dati consistenti con la presenza di orizzonti
- nessuna evidenza di violazioni della GR

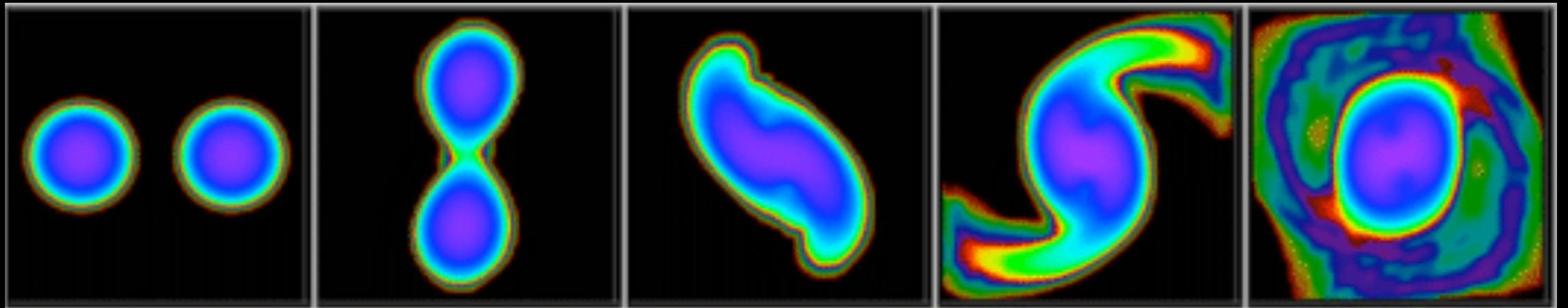




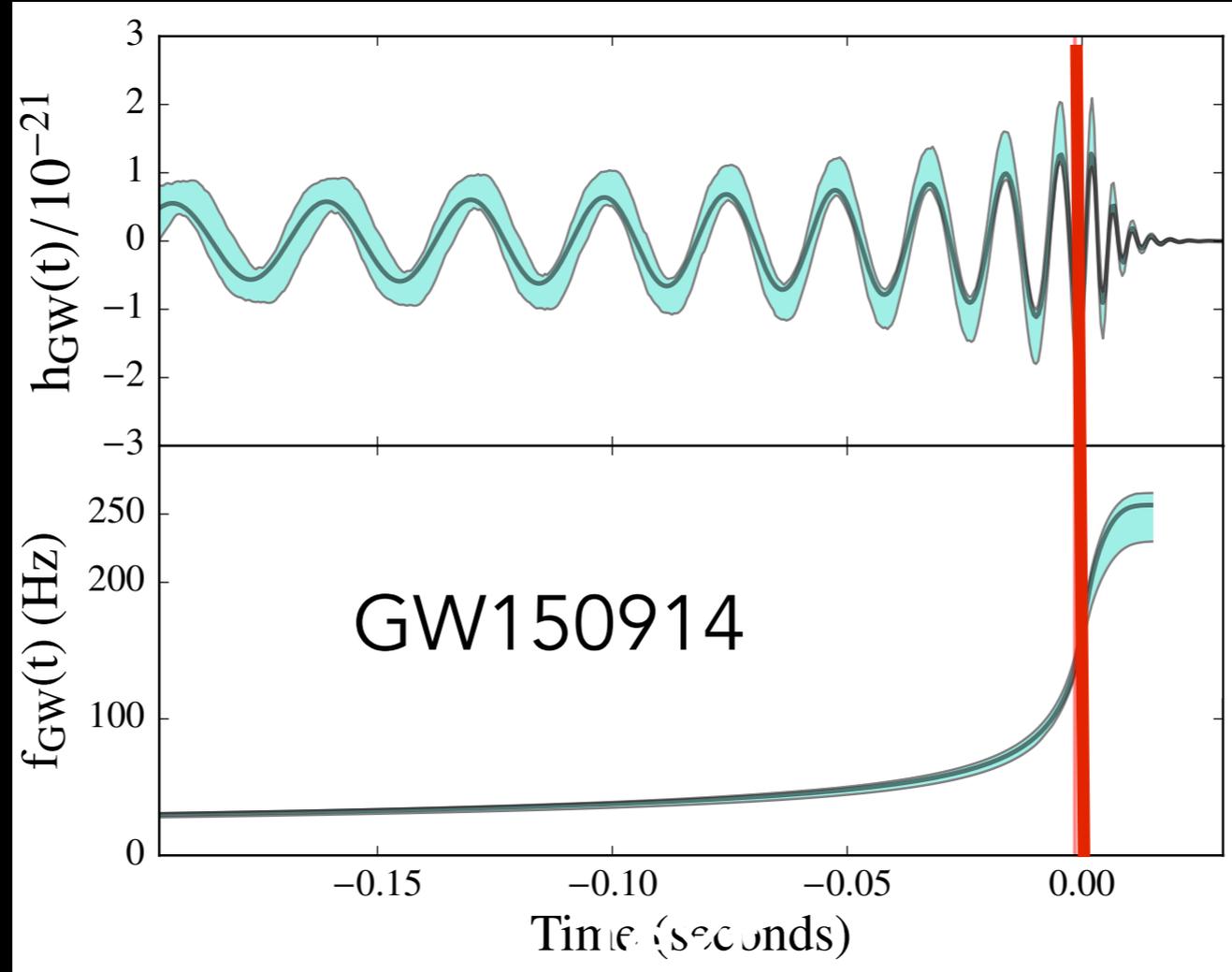


DOPO GW150914

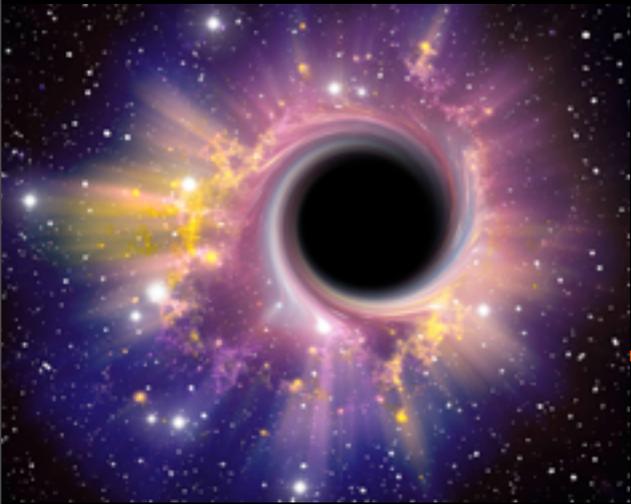
?



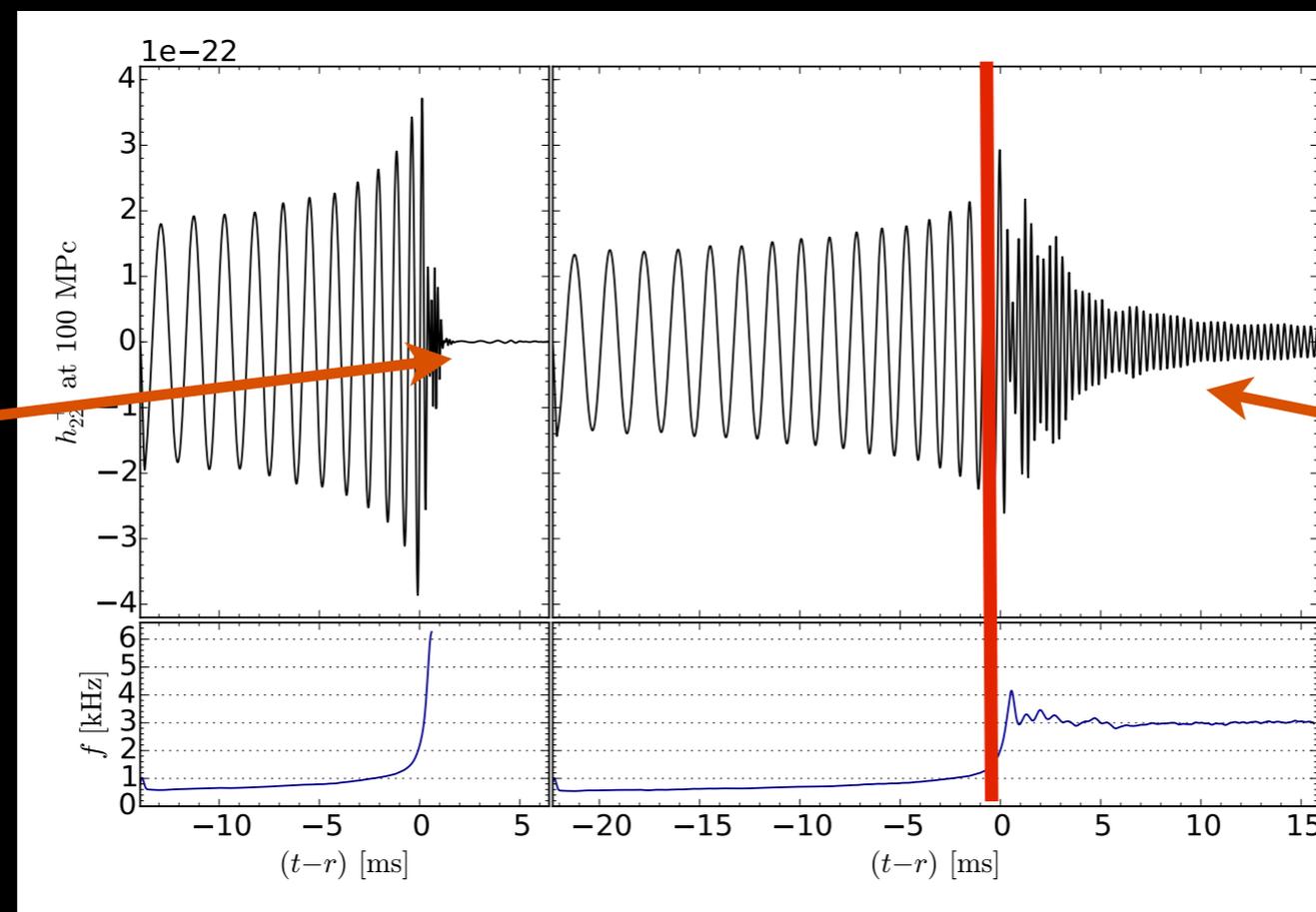
COALESCENZA DI STELLE DI NEUTRONI



RINGDOWN



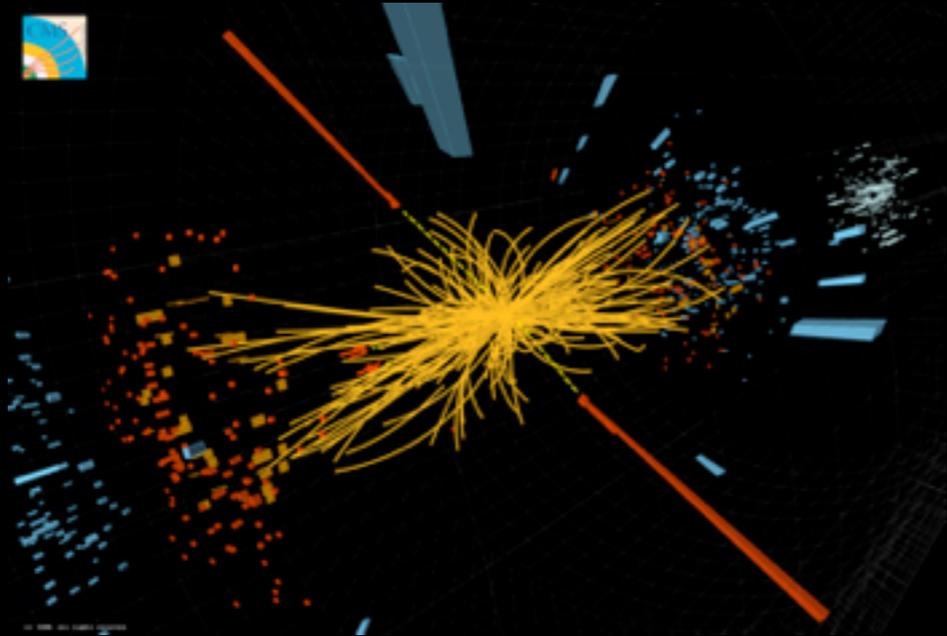
BUCO NERO



STELLA DI NEUTRONI
 “supra-massive”



COLLISIONI



MODELLO STANDARD
MICROCOSMO

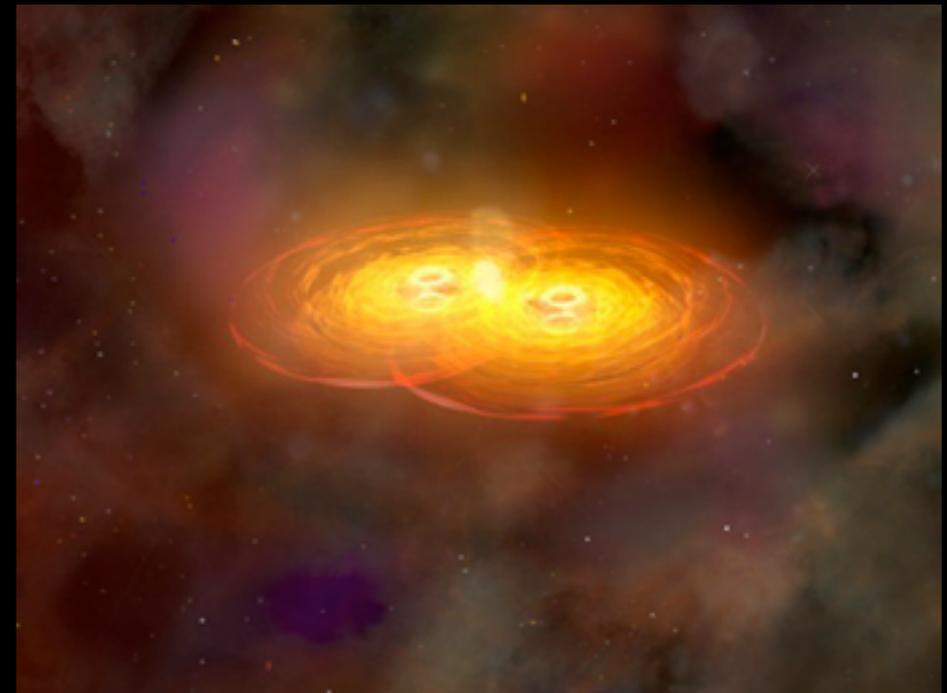
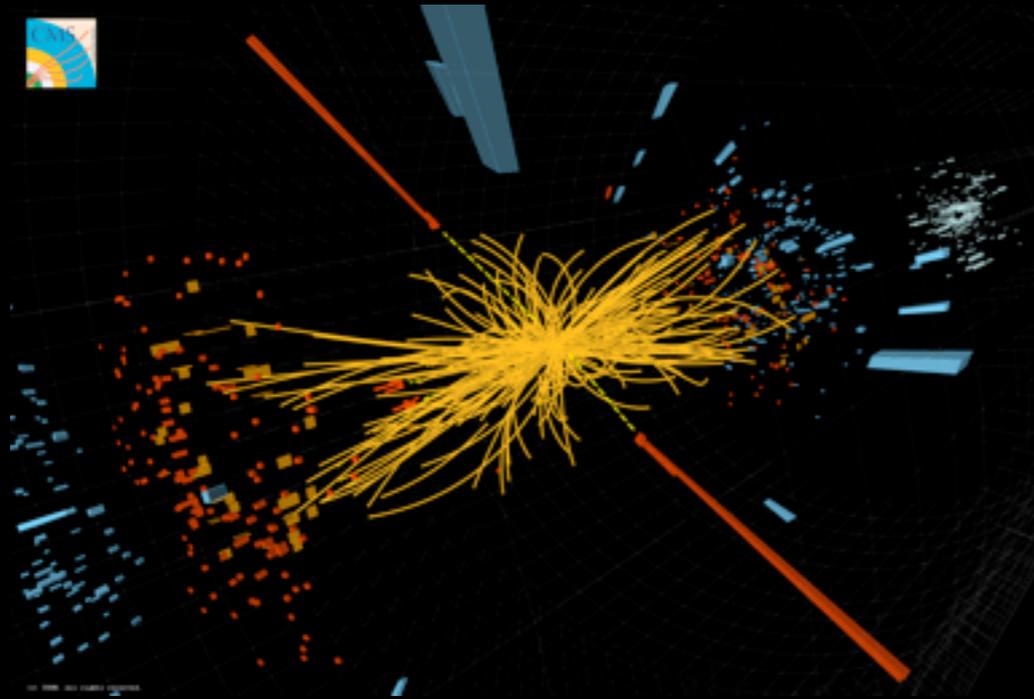
INTERAZIONE FORTE
INTERAZIONE DEBOLE

particelle elementari
bosoni
fermioni
ALFABETO MINIMO

RELATIVITÀ GENERALE
MACRO-COSMO

INTERAZIONE FORTE
INTERAZIONE DEBOLE

COLLISIONI



RELATIVITÀ GENERALE
MACROCOSMO
GRAVITÀ

BUCHI NERI
“no hair theorem”
MASSA-SPIN



LISA PATHFINDER

ESA

3 DICEMBRE 2015

DOPO ?
immaginiamo di essere nel 2034

eLISA
il primo interferometro nello spazio

eLISA: 0.1 - 1 mHz

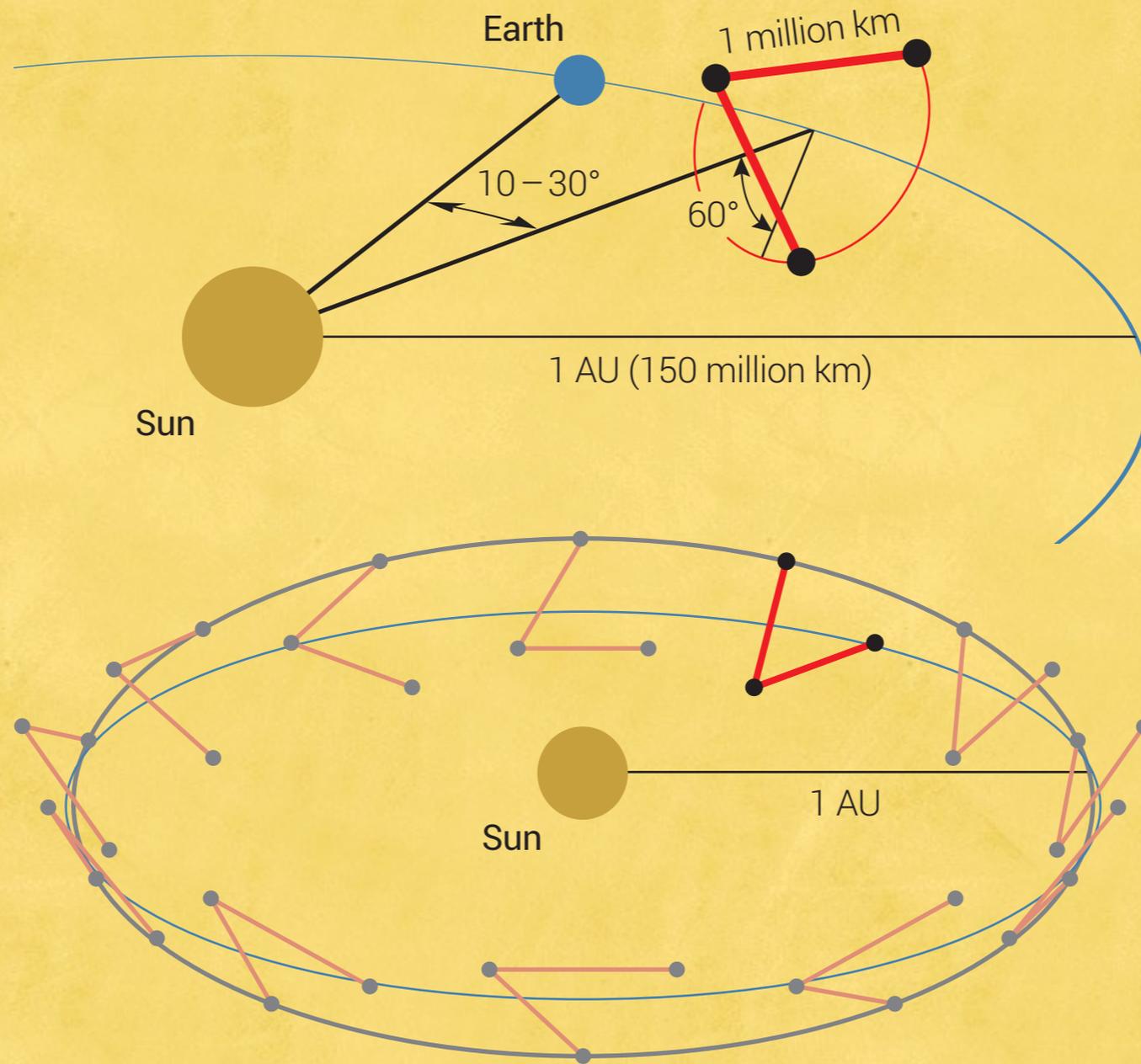


Figure 10: eLISA Orbits. The three eLISA-NGO spacecraft follow the Earth as an almost stiff triangle, purely due to celestial mechanics.

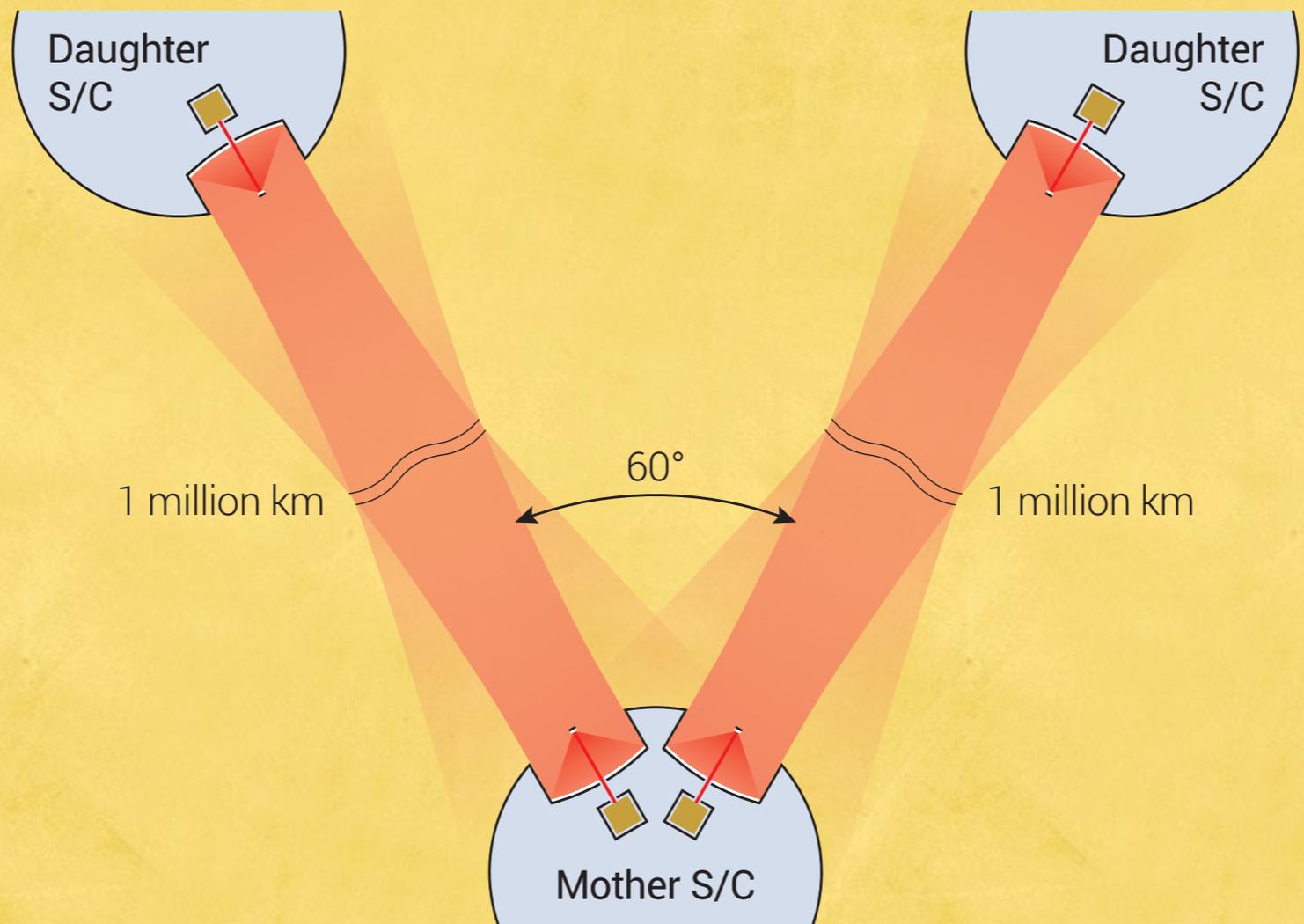
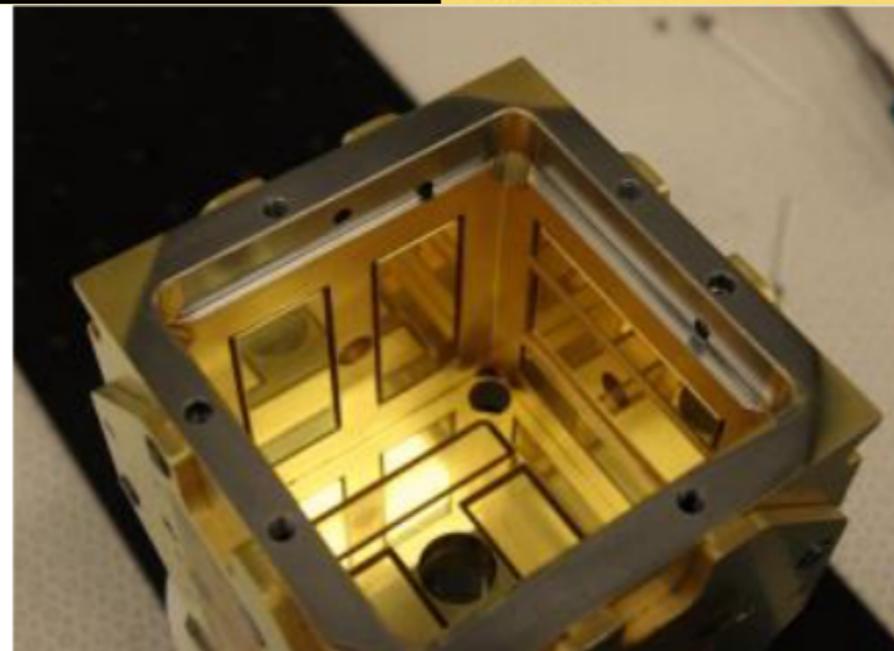
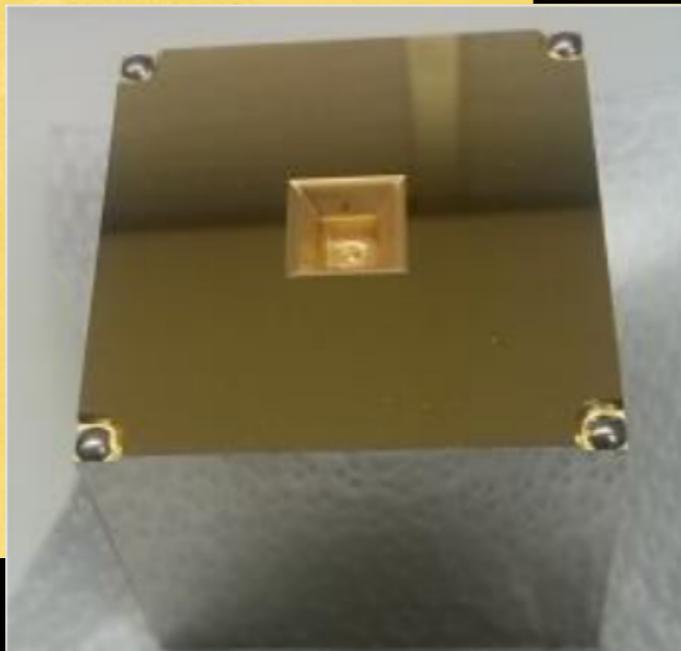
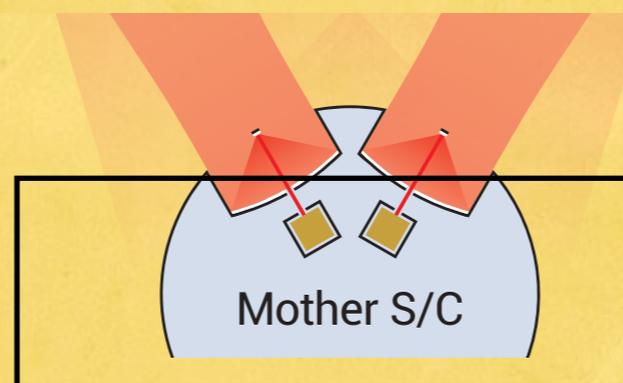


Figure 9: eLISA configuration (not to scale). One mother and two daughter spacecraft exchanging laser light form a two-arm Michelson interferometer. There are four identical payloads, one at the end of each arm, as shown in Figure 11.

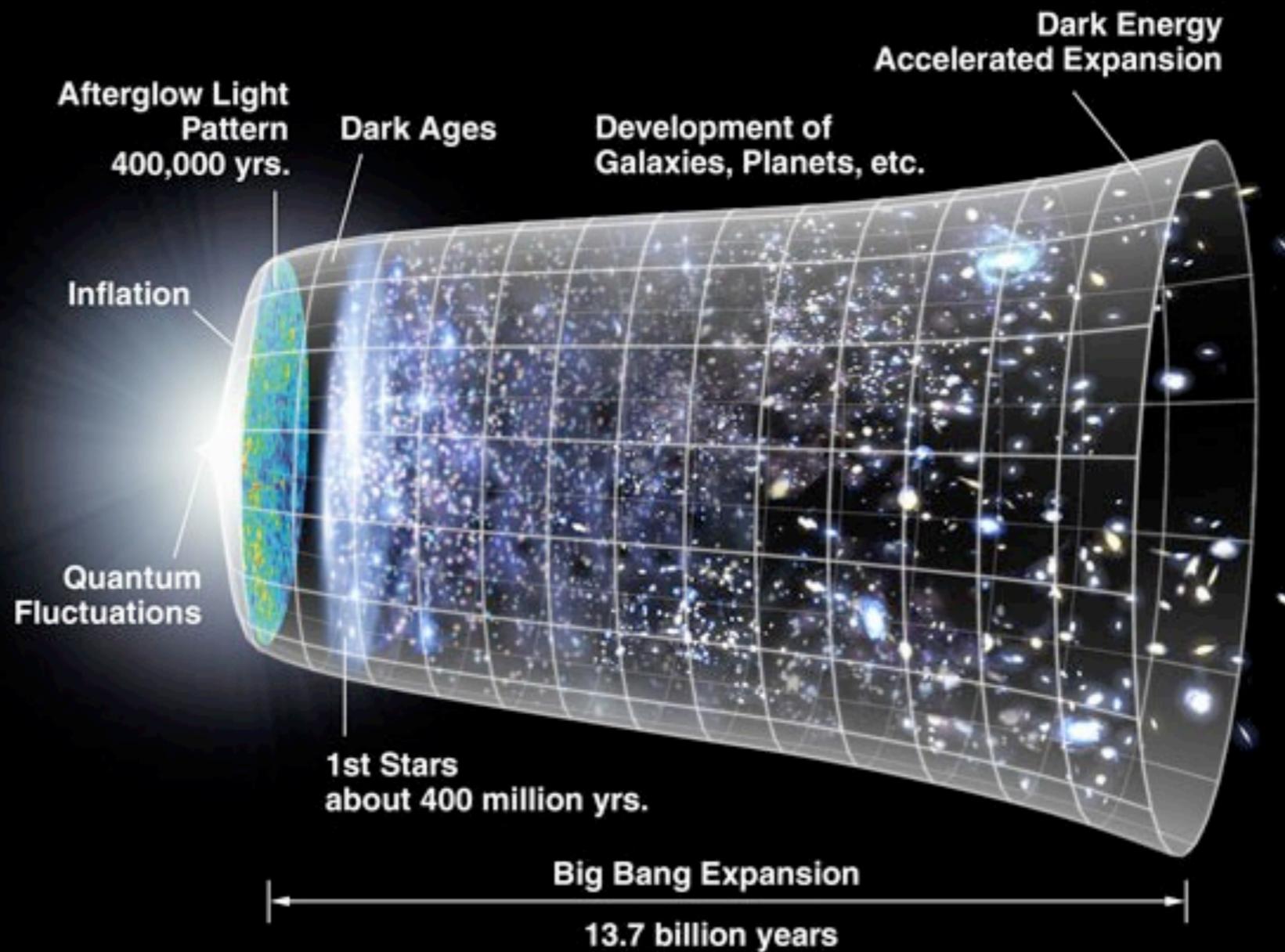
LISA Pathfinder - single unit



$$\delta a \approx 3 \times 10^{-15} \text{ m sec}^{-2} \text{ Hz}^{-\text{km}/2}$$

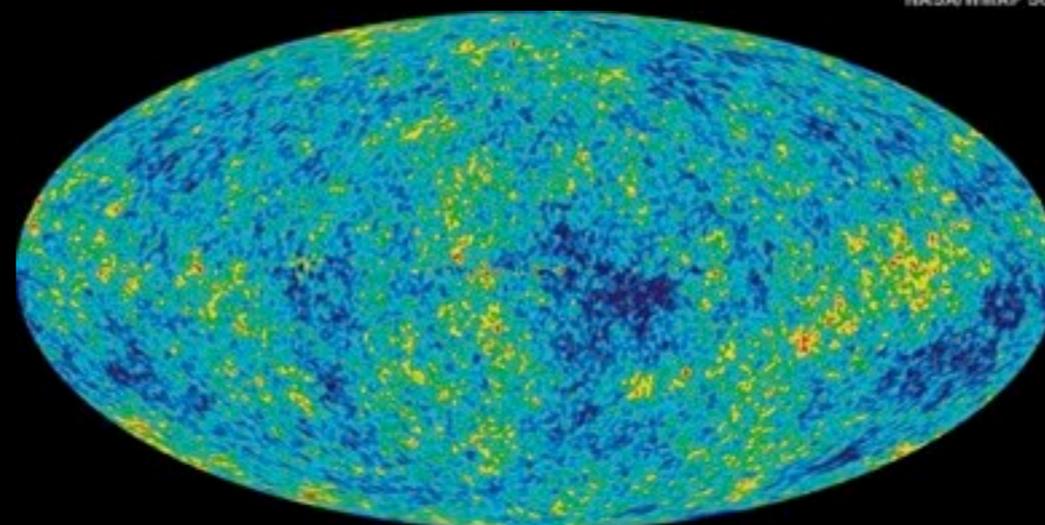


- l'universo gravitazionale di eLISA: quale scienza? quali domande? quali scoperte?
- perché continuare ad esplorare l'universo attraverso la rivelazione diretta delle vibrazioni dello spaziotempo?

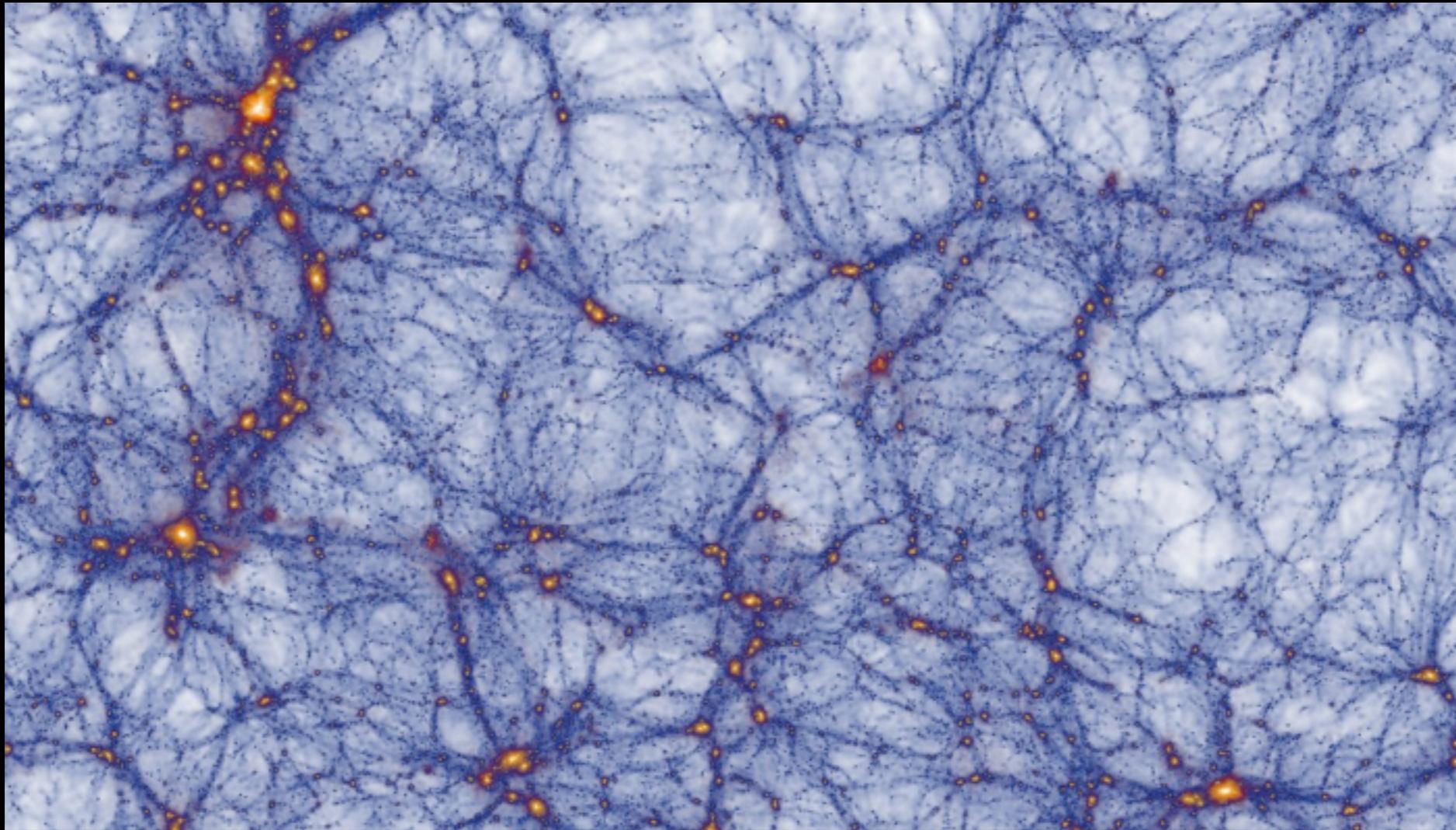


NASA/WMAP Science Team

FLUTTUAZIONI
IN TEMPERATURA riflettono
FLUTTUAZIONI IN DENSITA'
CHE DANNO ORIGINE ALLE
STRUTTURE COSMICHE

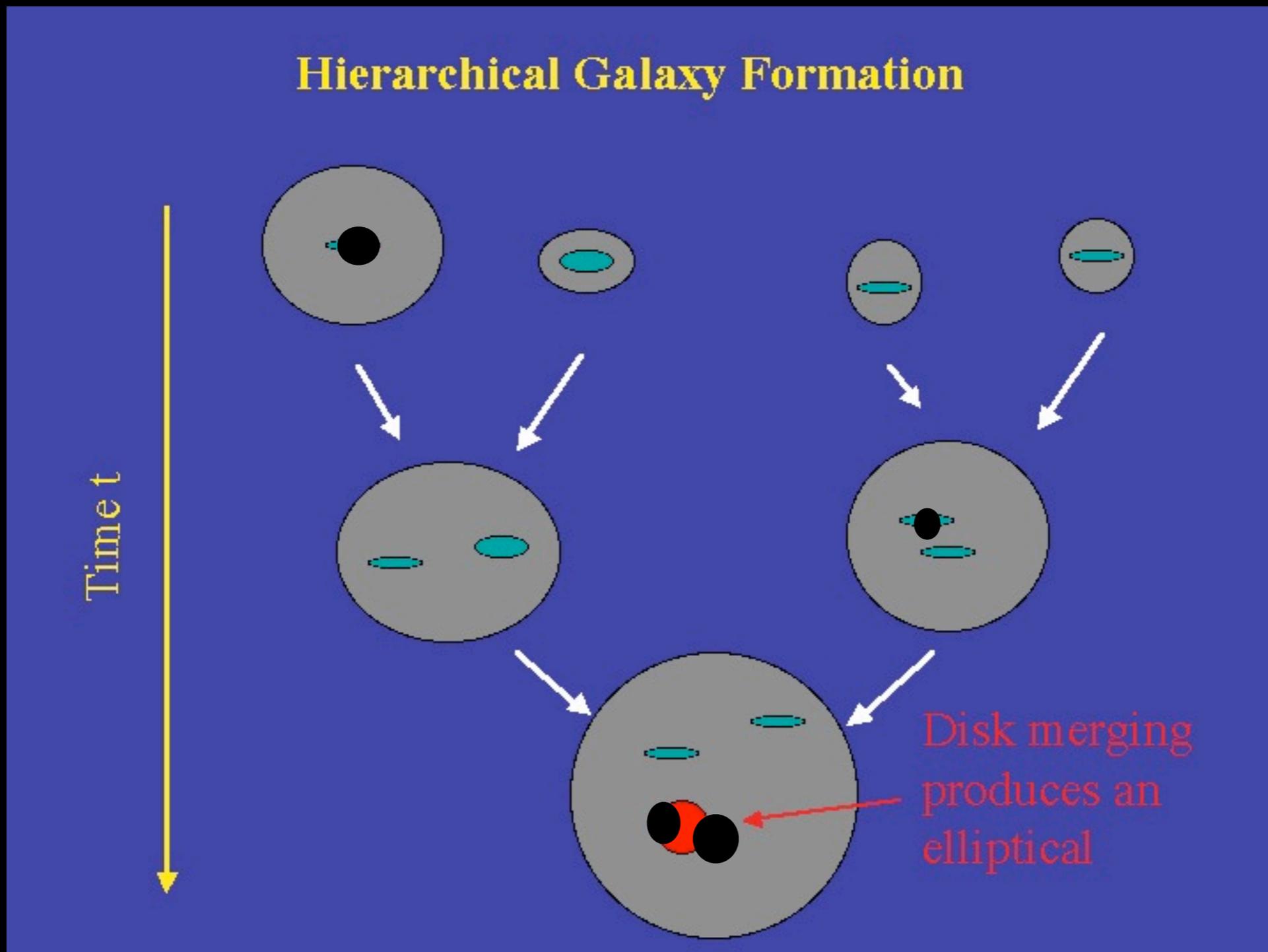


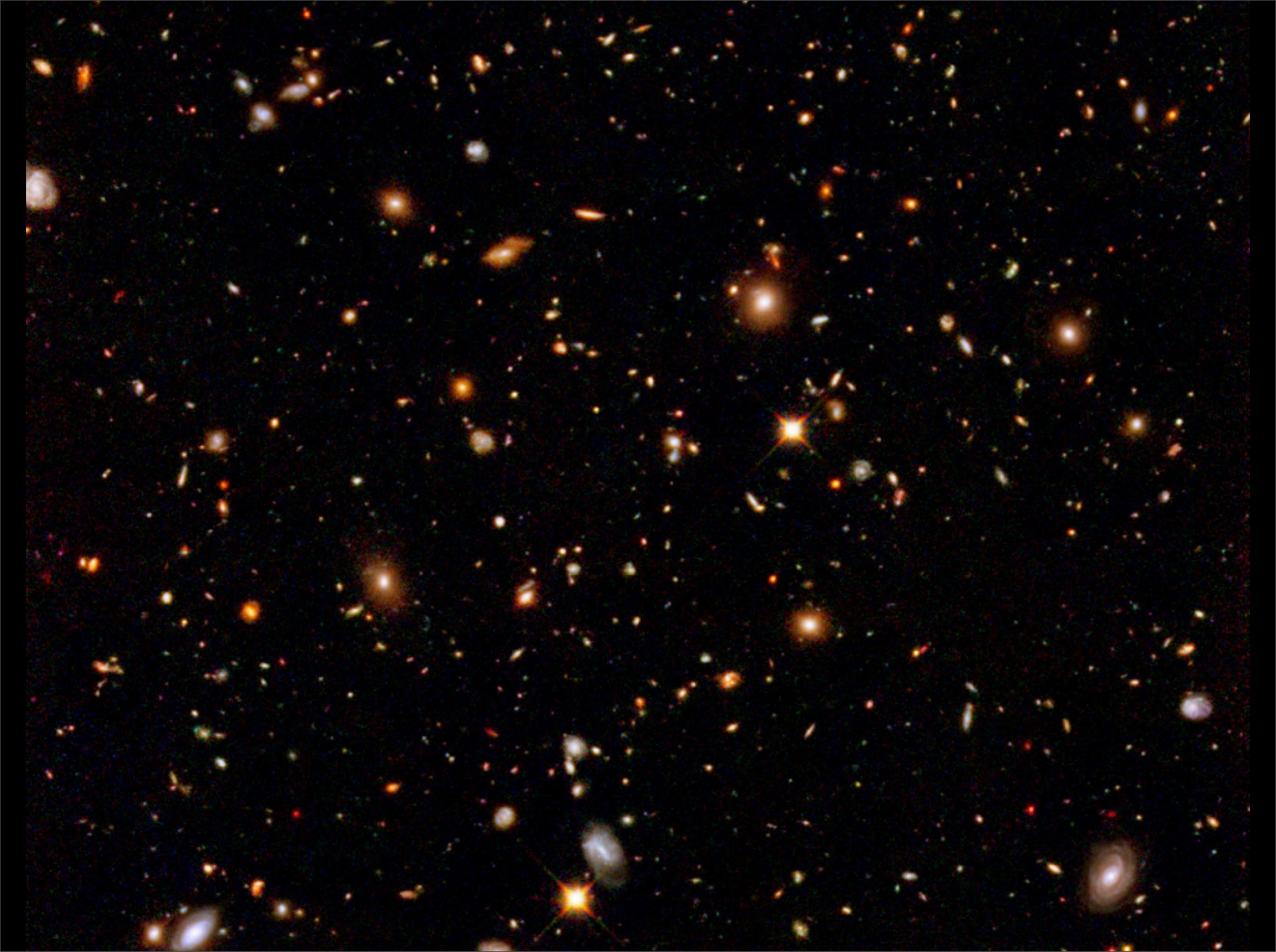
formazione delle galassie aggregazione di sotto-strutture

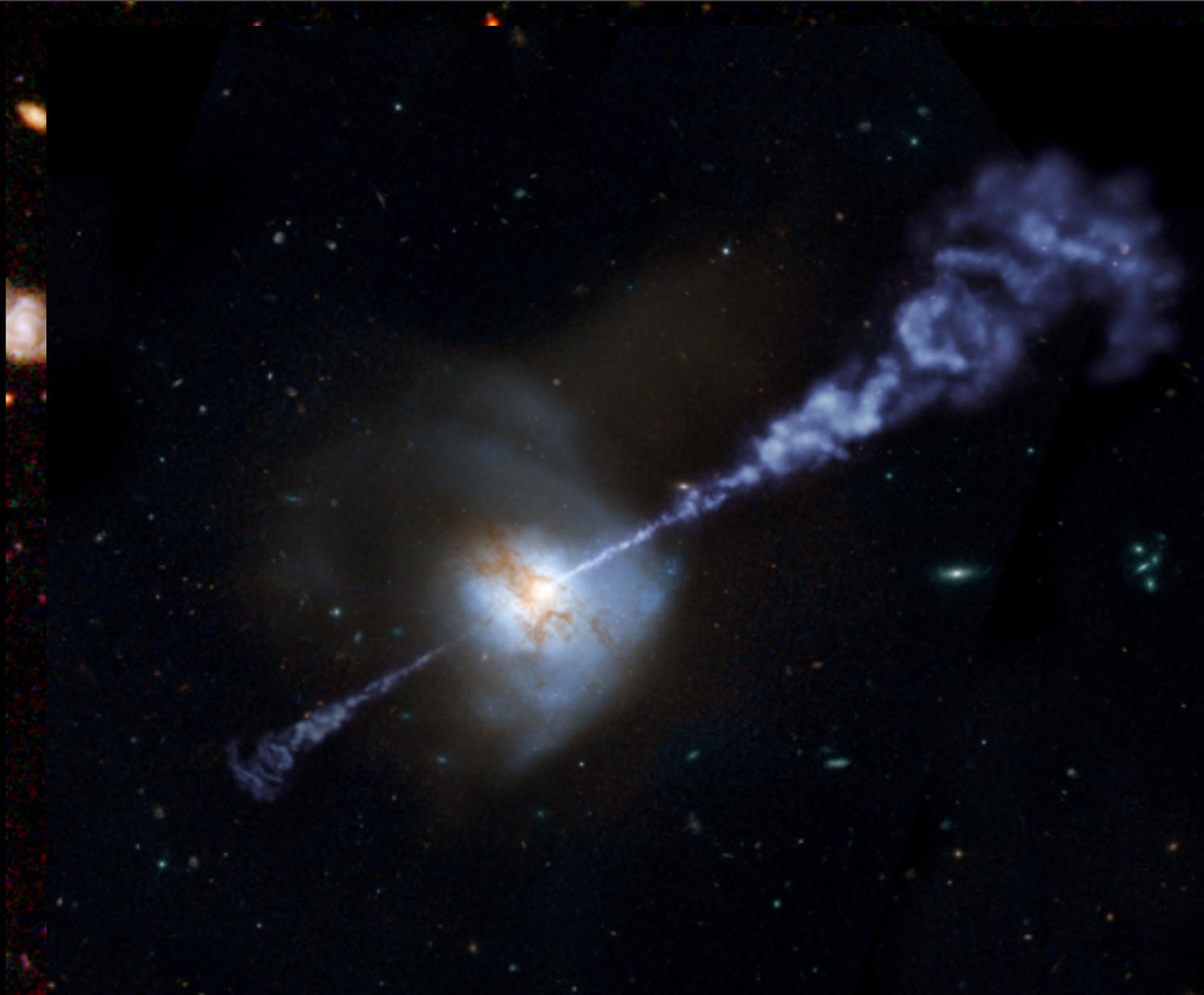


I BUCHI NERI PARTECIPANO AL CLUSTERING GERARCHICO

BUCHI NERI "BINARI"







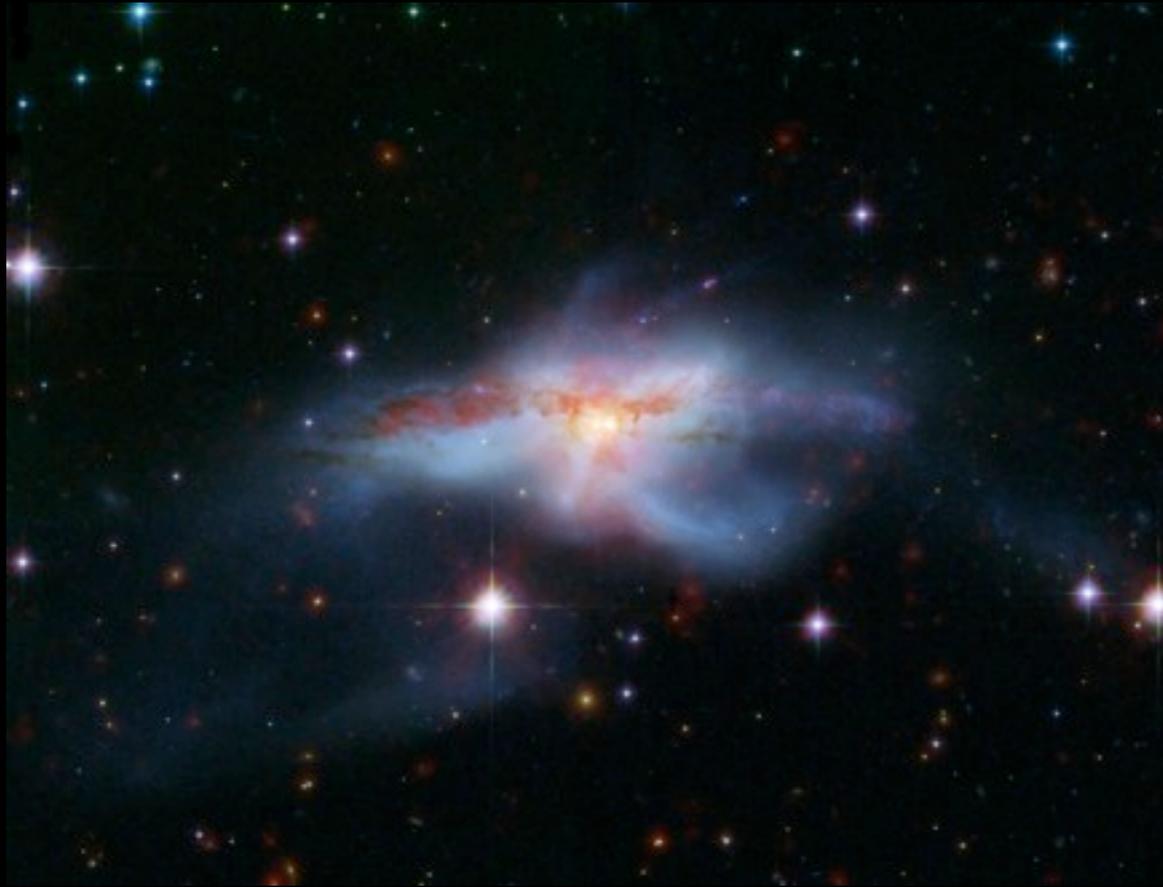
E' POSSIBILE RISALIRE ALLE PRIME FASI
FORMAZIONE
delle **GALASSIE** nell'**UNIVERSO** ?

COME SI FORMANO I BUCHI NERI
CHE ALIMENTANO I QUASAR?
sono di origine stellare?

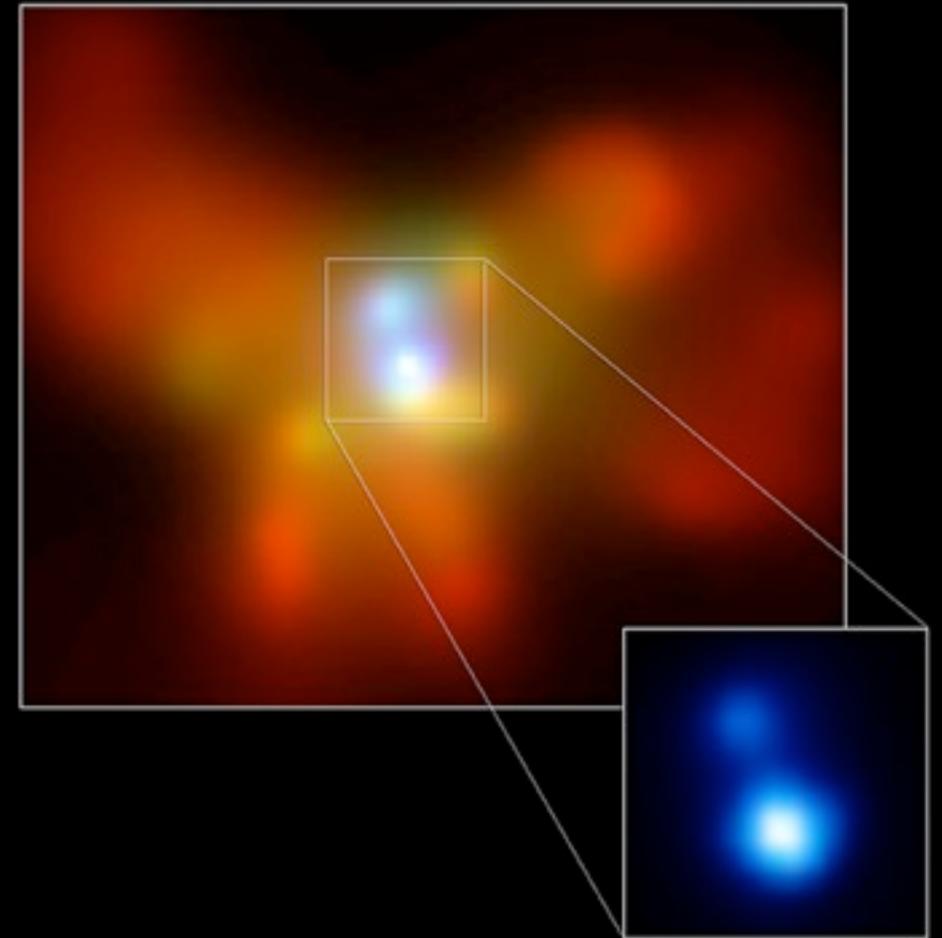
BUCHI NERI IN COLLISIONE
COME SONDE COSMICHE

NGC 6240

OTTICO



RAGGI X



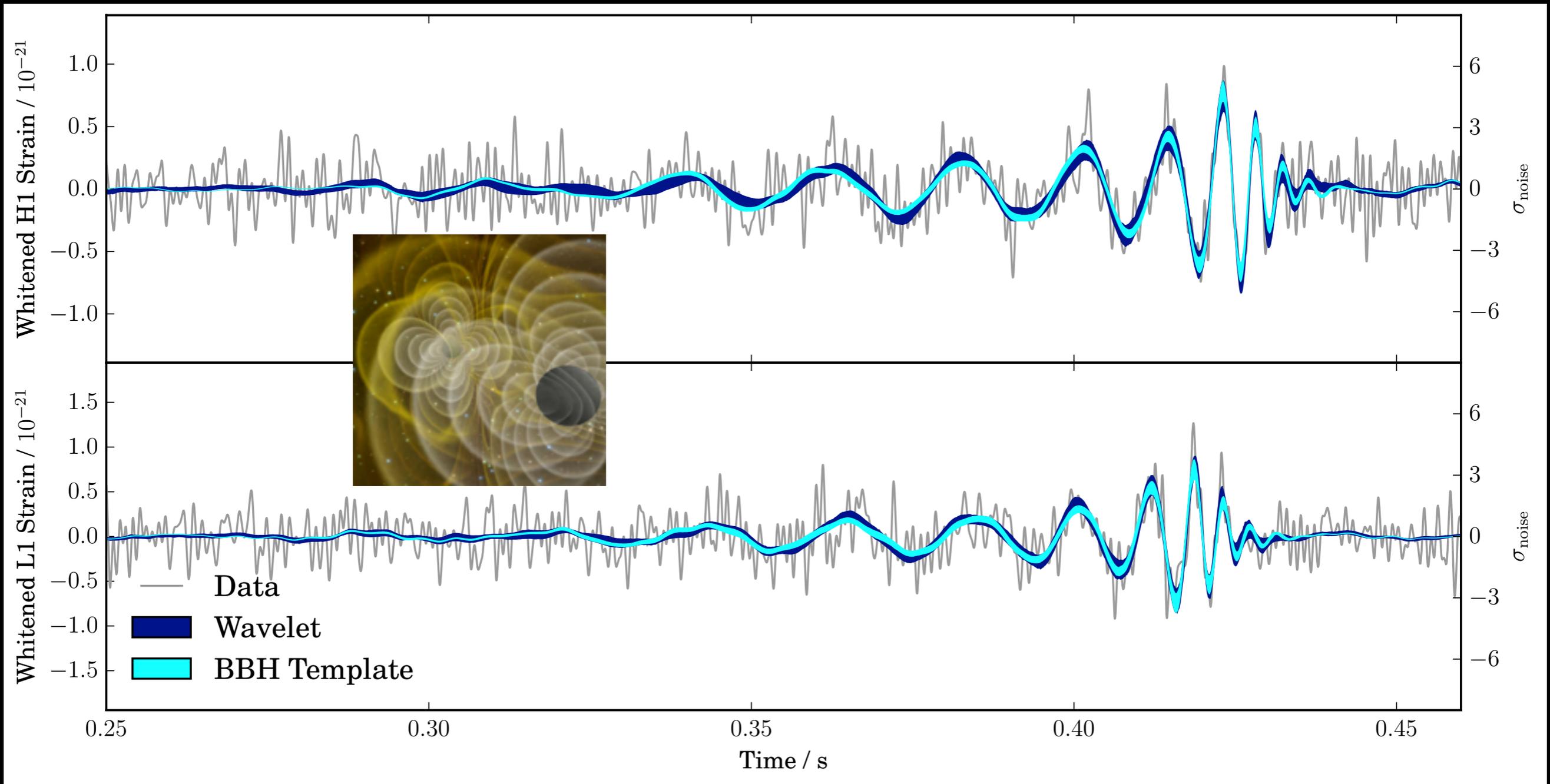
**FORMAZIONE DI BUCHI NERI BINARI
IN GALASSIE IN COLLISIONE**

SIMULAZIONE ARTISTICA

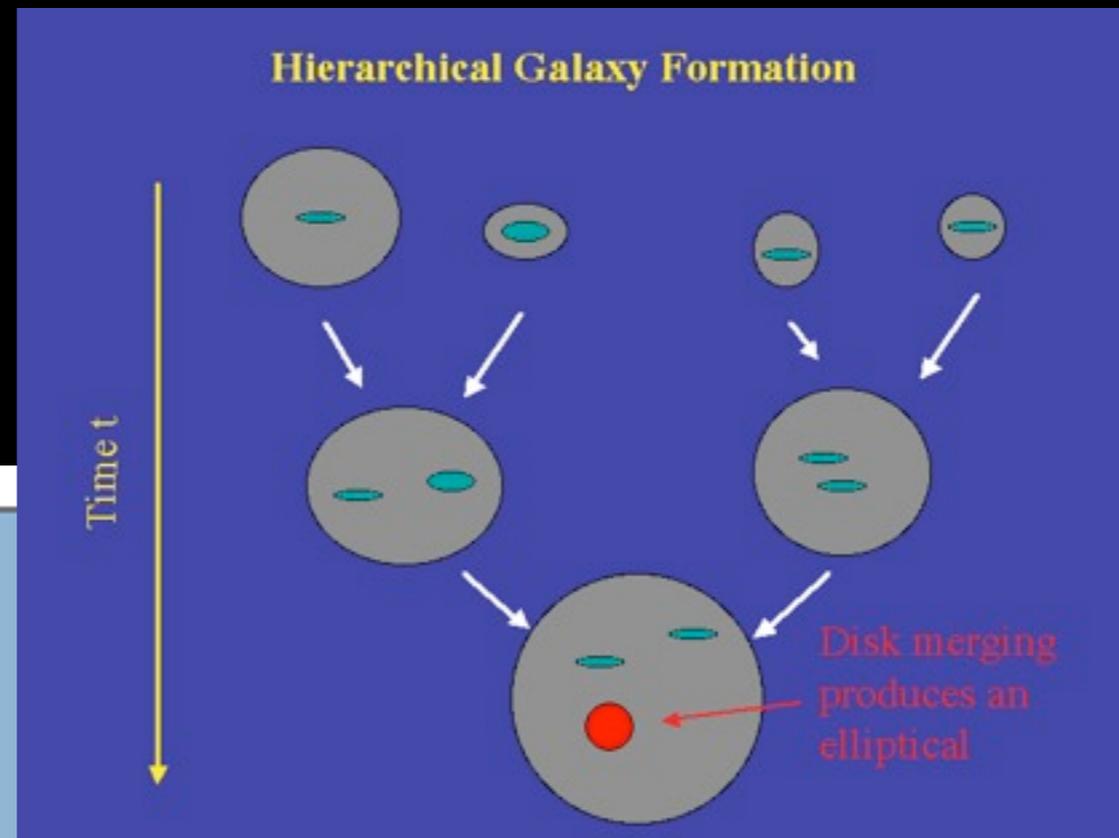
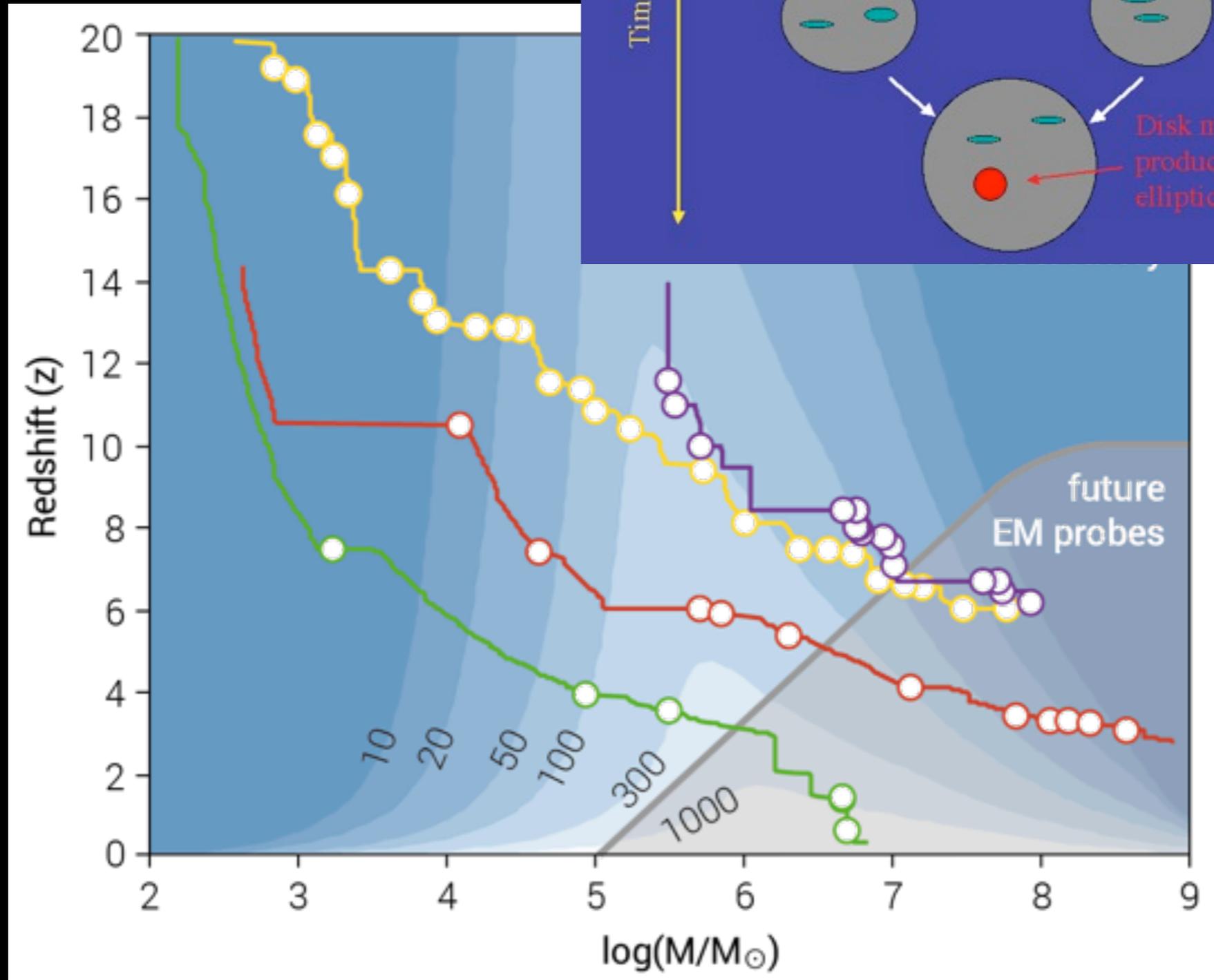


2034: eLISA

collisione di buchi neri supermassicci



cambio dell'asse temporale: mesi-giorni-minuti

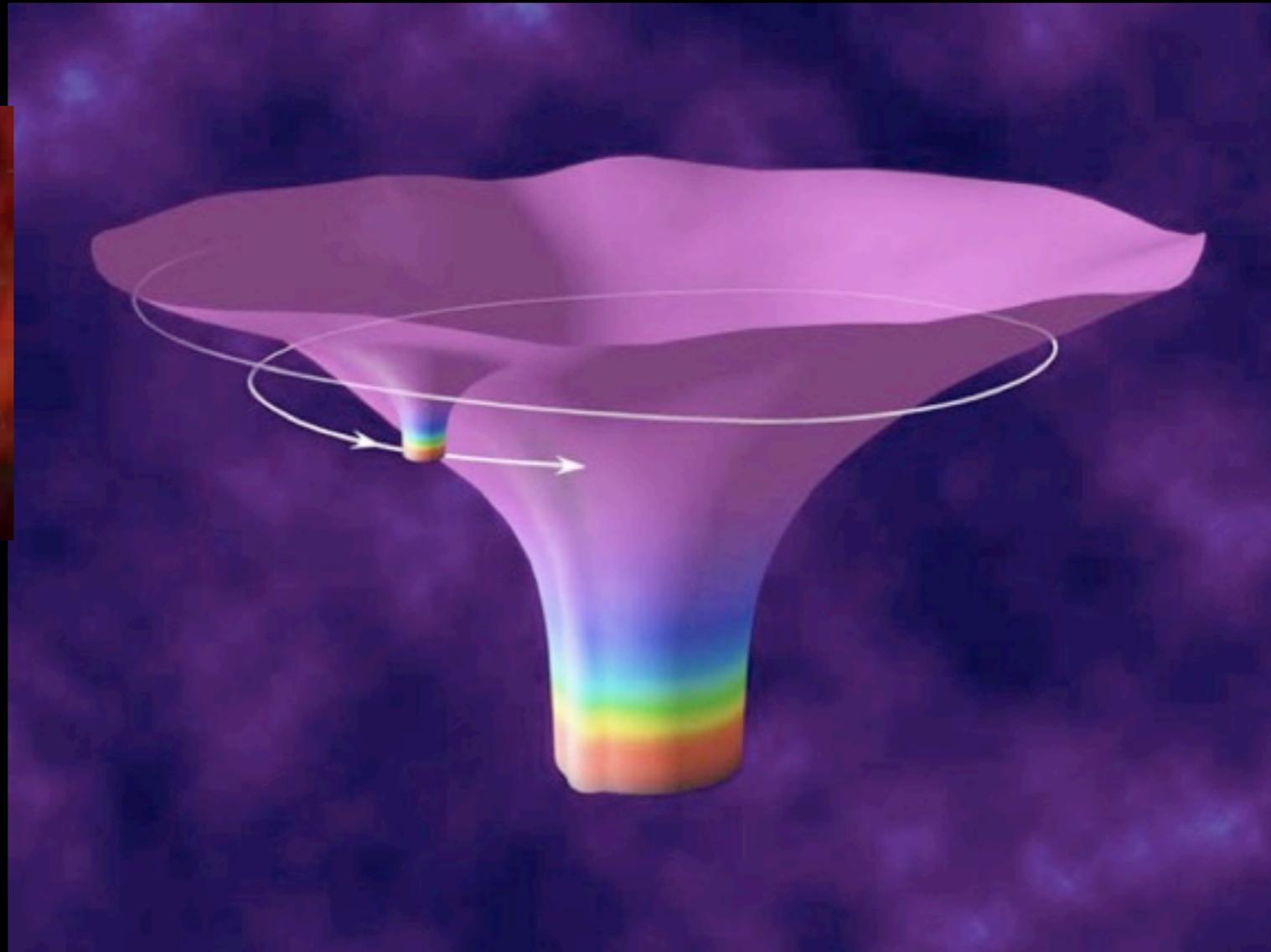


distruzione mareale di stelle



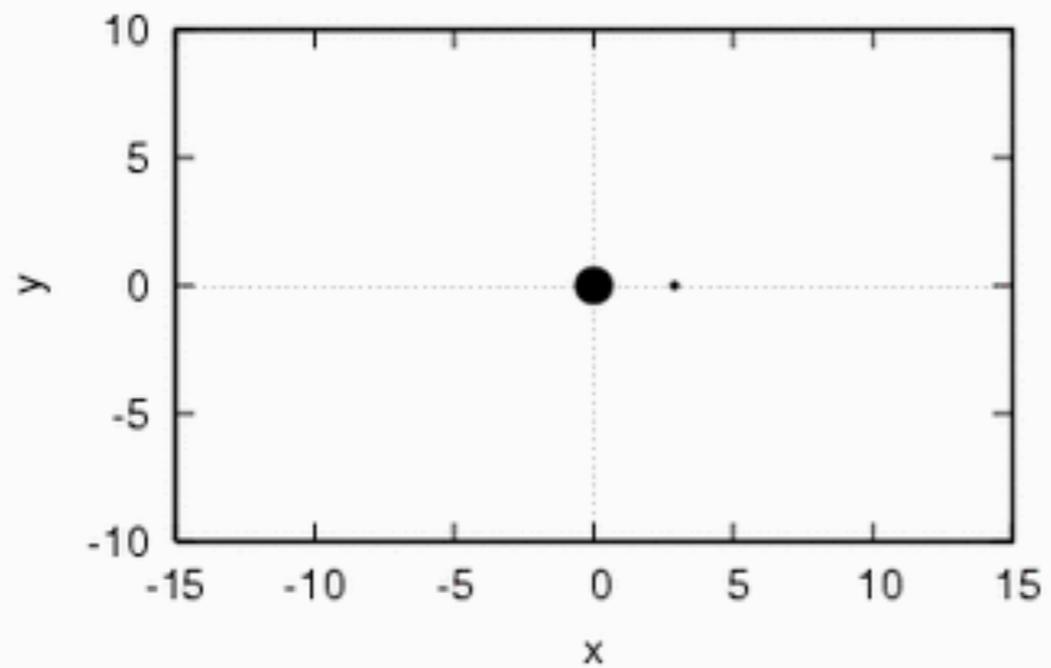
EMRIs

buco nero stellare attorno a un buco nero
supermassiccio

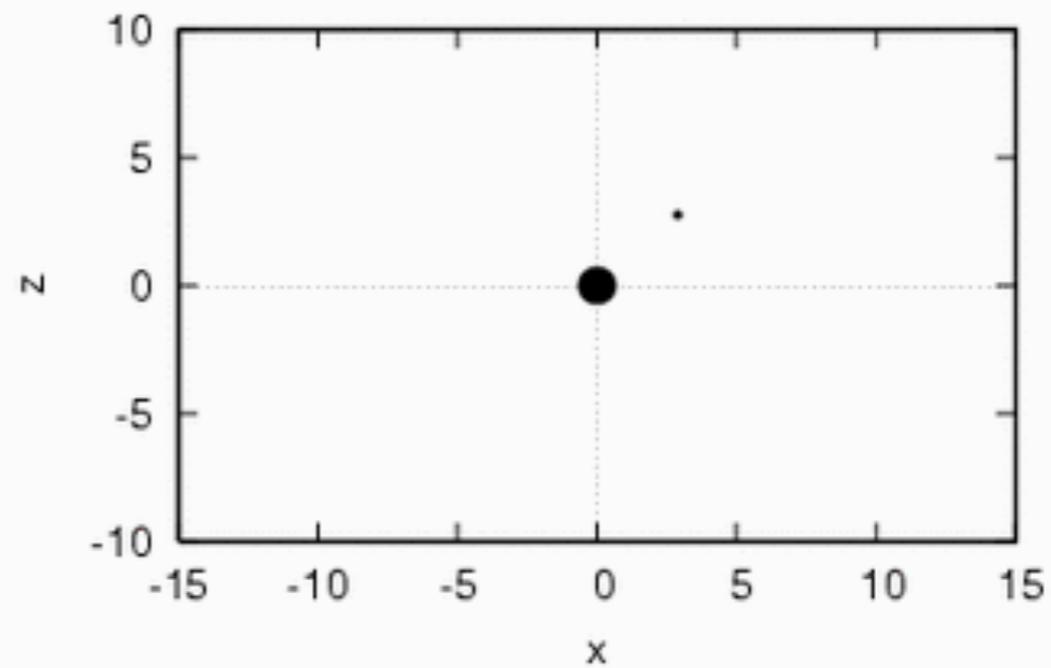


tomografia dello spazio tempo attorno a un buco nero

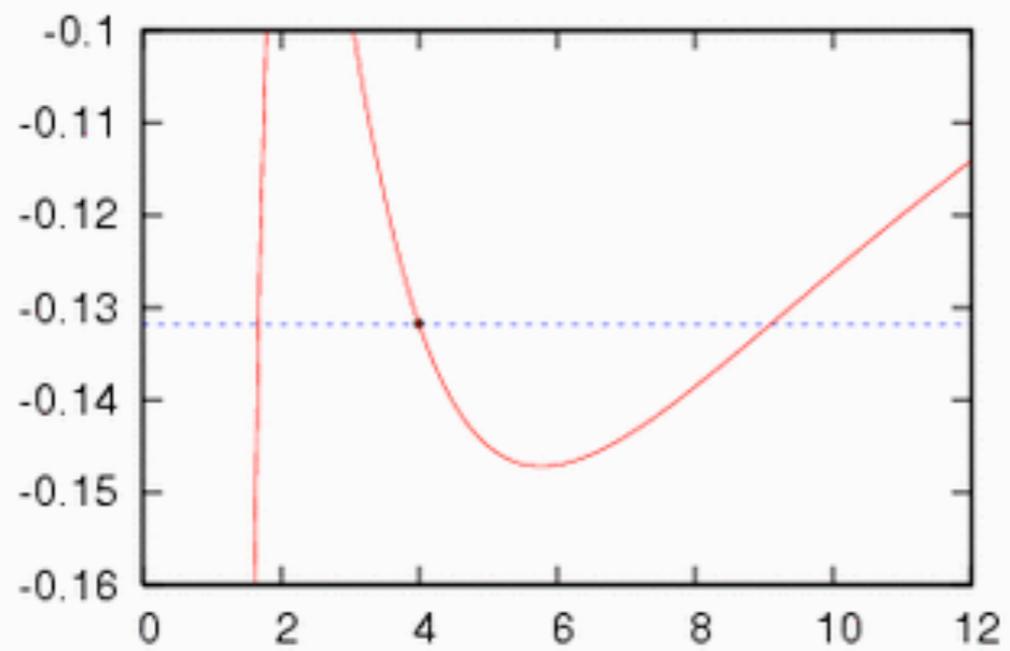
Orbit in x-y plane



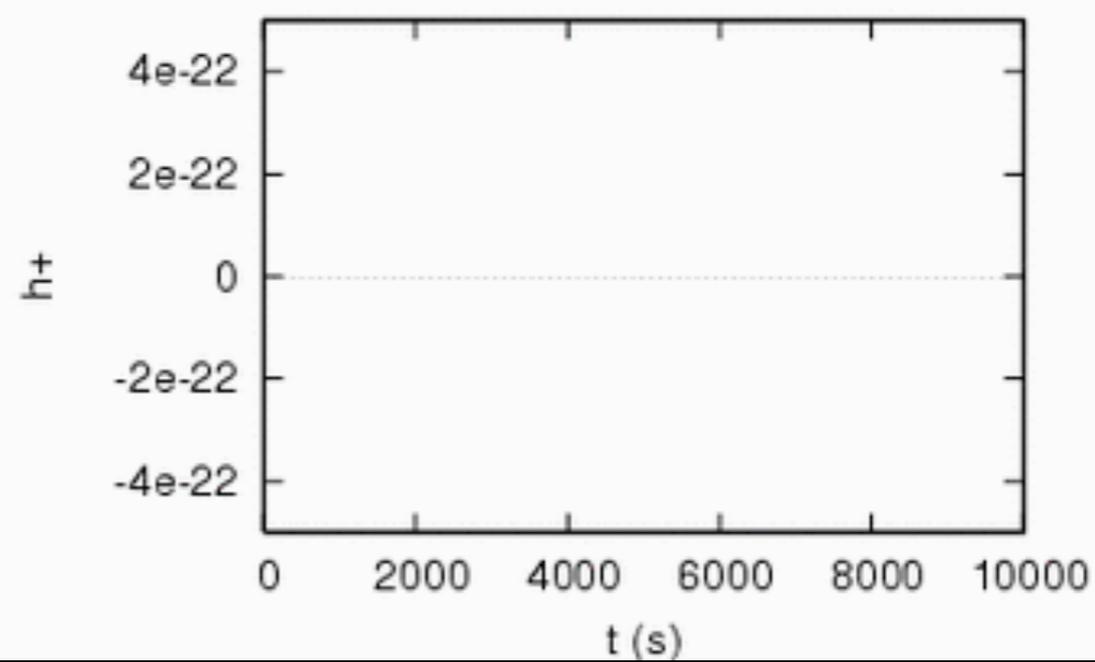
Orbit in x-z plane



Potential



Waveform, + polarization



**ONDE GRAVITAZIONALI
DALL'UNIVERSO:
BUCO NERO STELLARE
IN CADUTA SU UN
BUCO NERO SUPERMASSIVO
ORBITA ECCENTRICA**

**DALLA FORMA DELL'ONDA SI
DETERMINA LA STRUTTURA DELLO
SPAZIO TEMPO DI UN BUCO NERO**

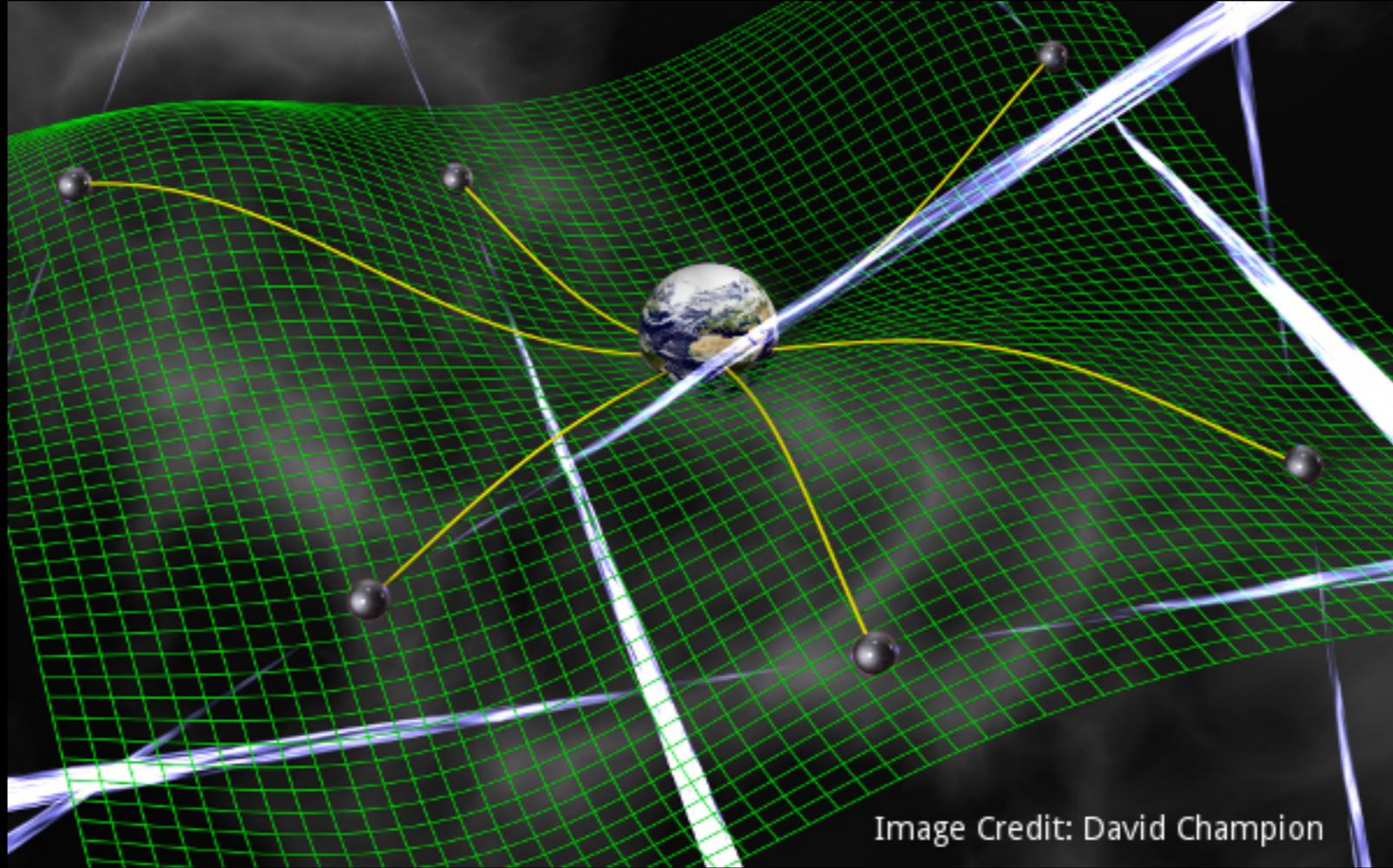
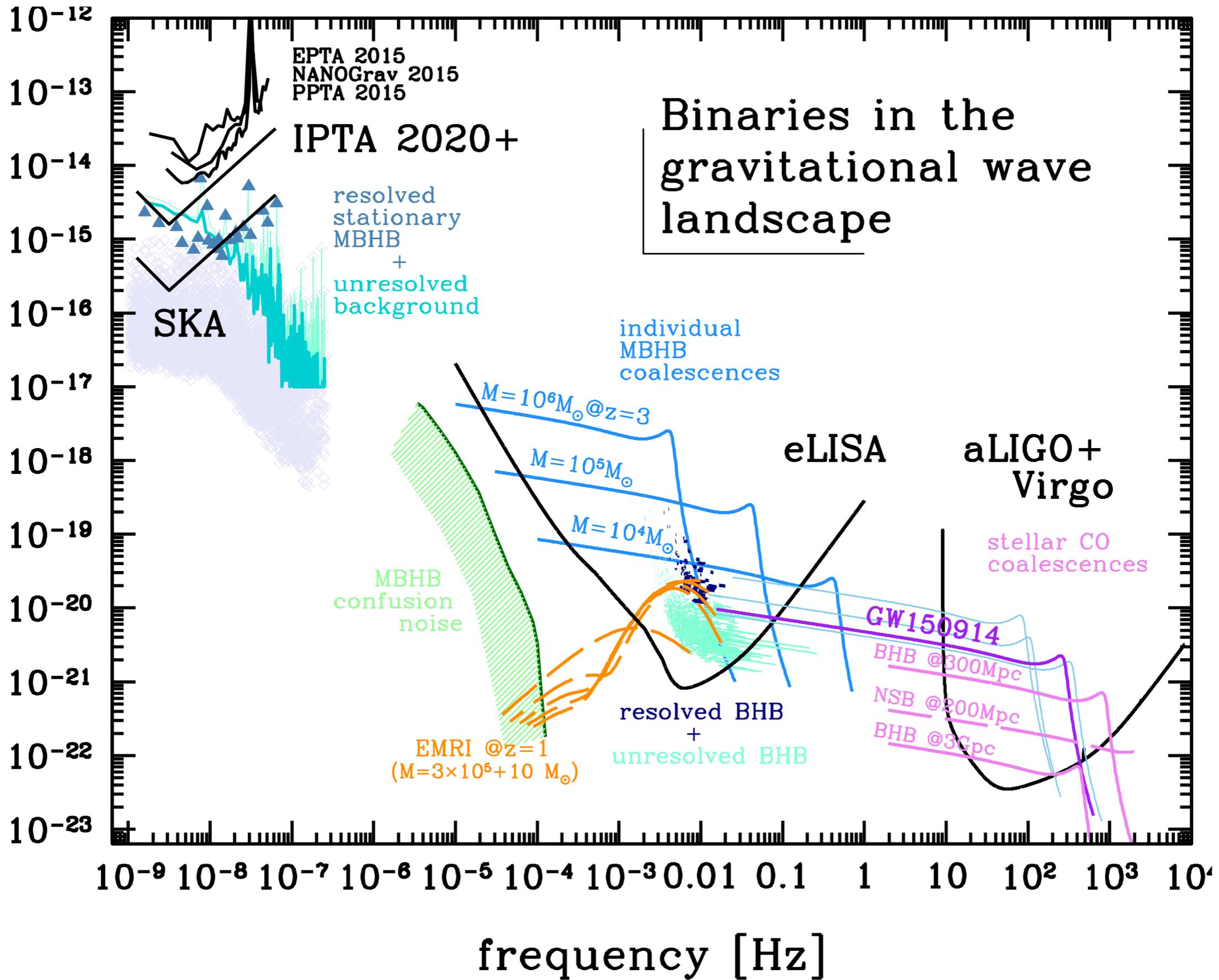


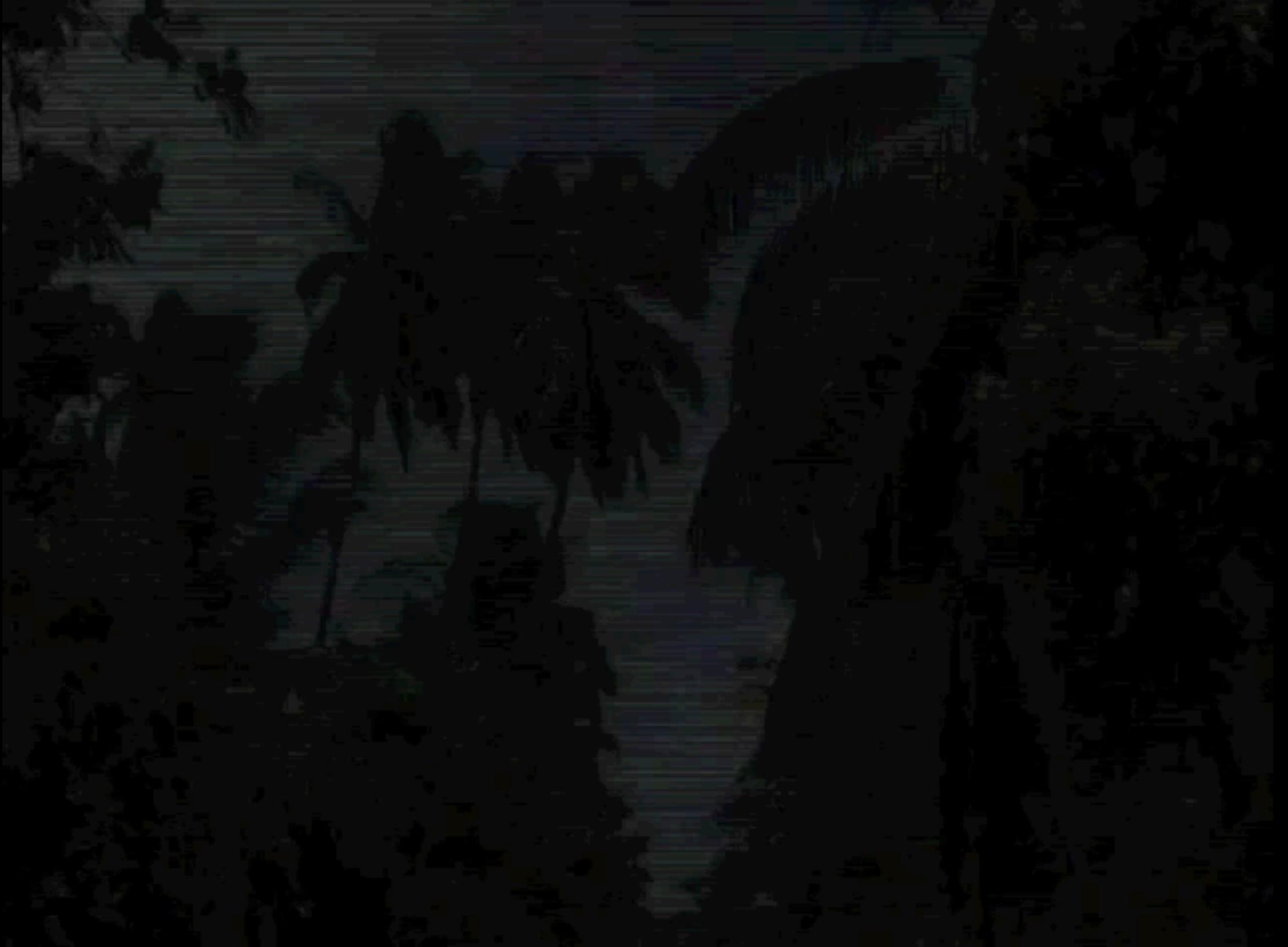
Image Credit: David Champion

characteristic amplitude



“Ciò che ci dovremmo aspettare è un mondo caotico del tutto inaccessibile al pensiero. Ci si potrebbe aspettare che il mondo sia governato da leggi soltanto nella misura in cui interveniamo con la nostra intelligenza ordinatrice: sarebbe un ordine simile a quello del dizionario laddove il tipo di ordine creato dalla teoria della gravitazione di Newton ha tutt’altro carattere. Anche se gli assiomi della teoria sono imposti dall’uomo, il successo di una tale costruzione presuppone un alto grado di ordine del mondo oggettivo, e cioè un qualcosa che a priori non si è per nulla autorizzati ad attendersi. È questo il miracolo che vieppiù si rafforza con lo sviluppo delle nostre conoscenze.”

Einstein, Lettera a Solovine, 30 marzo 1952



- esistono buchi neri di origine stellare così massicci ?
- come si formano?
- in quali galassie?

