

Cours 13

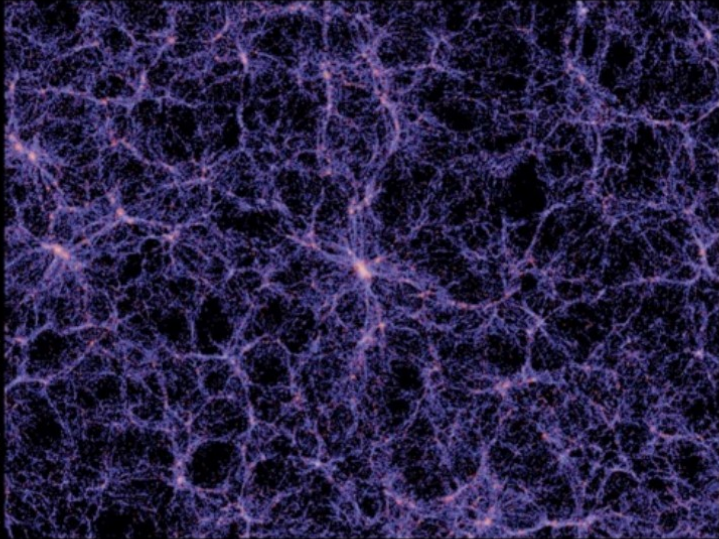
12 décembre 2023

Quiz du jour



Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE



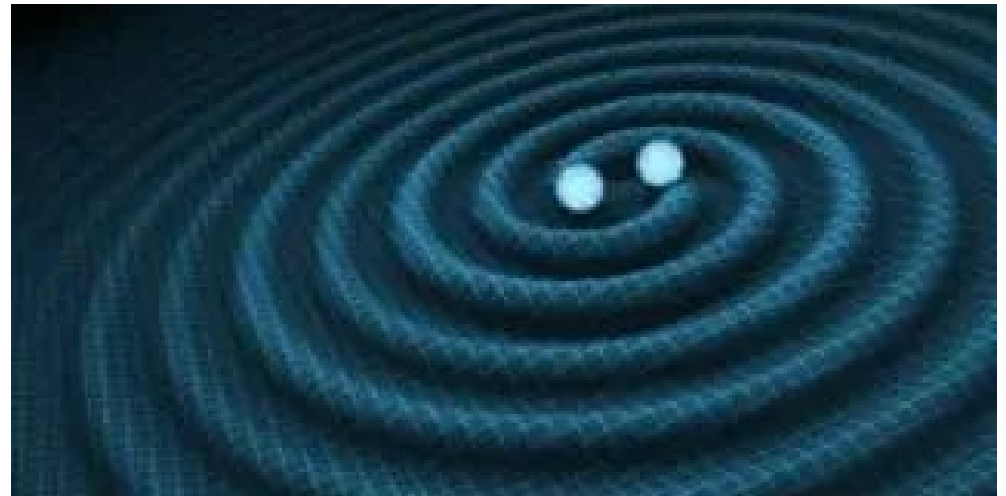
**le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45**
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 13 – 12 décembre 2023

Ondes gravitationnelles

<https://mediaserver.unige.ch/play/209489>



Contenu

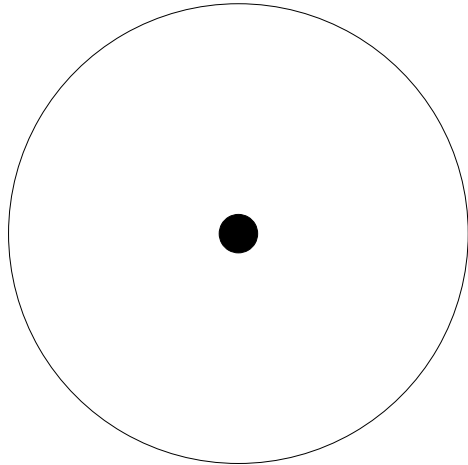
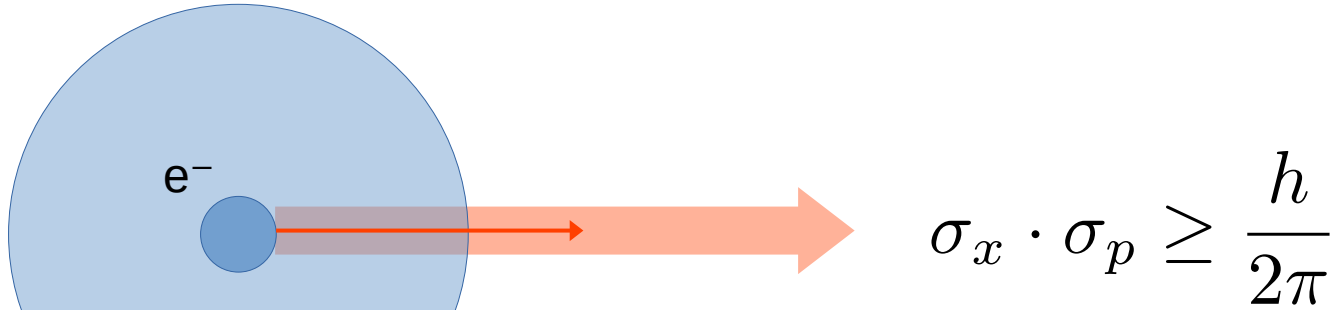
- Retour sur les trous noirs
- Ondes gravitationnelles
- Observations directes
- Retour et fin sur les trous noirs

Retour sur les trous noirs

Trous noirs et physique

- Les trous noirs violent (au moins) trois principes physiques:
 - Inégalités d'Heisenberg
 - Thermodynamique
 - Information

Inégalités d'Heisenberg

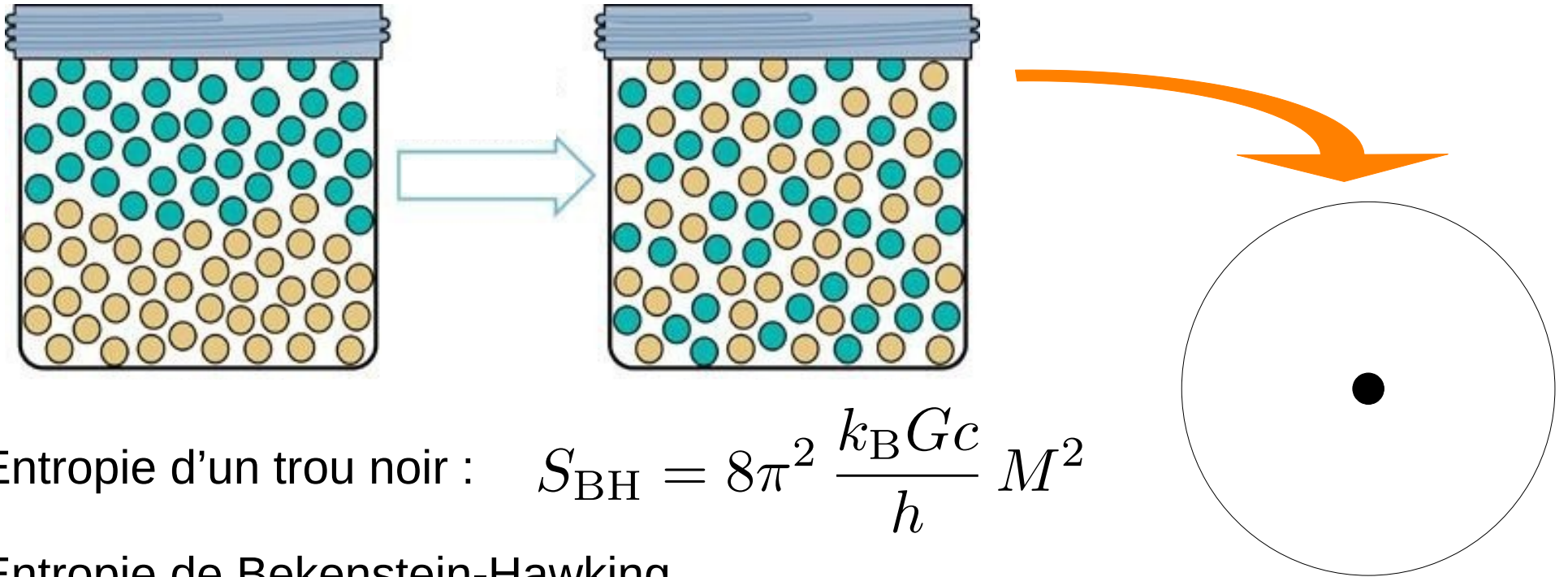


Point massif sans dimension :

$$\sigma_x = 0$$

La physique quantique empêche la formation de la singularité

Seconde loi de la thermodynamique



Entropie d'un trou noir :
$$S_{\text{BH}} = 8\pi^2 \frac{k_{\text{B}} G c}{h} M^2$$

Entropie de Bekenstein-Hawking

Température des trous noirs

- Si un trou noir a de l'entropie, il doit avoir une température

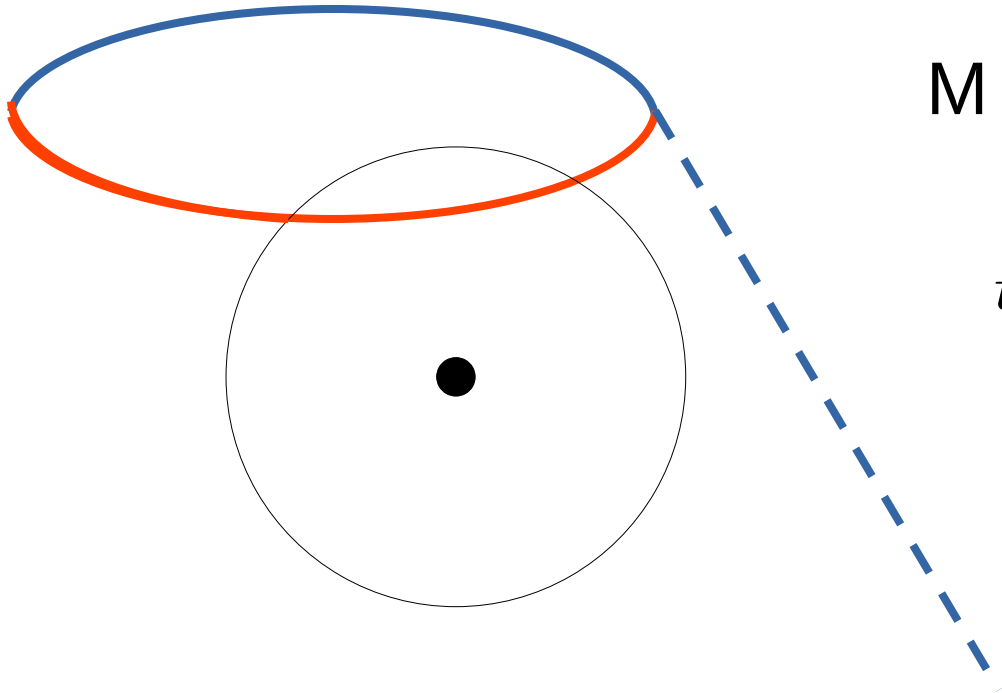
$$T_{\text{H}} = \frac{hc^3}{16\pi^2 GM k_{\text{B}}}$$

- Tout corps ayant une température doit émettre du rayonnement à cette température

$$P_{\text{H}} = 4\pi R_{\text{S}}^2 \sigma T_{\text{H}}^4$$

Évaporation des des trous noirs

Rayonnement de Hawking

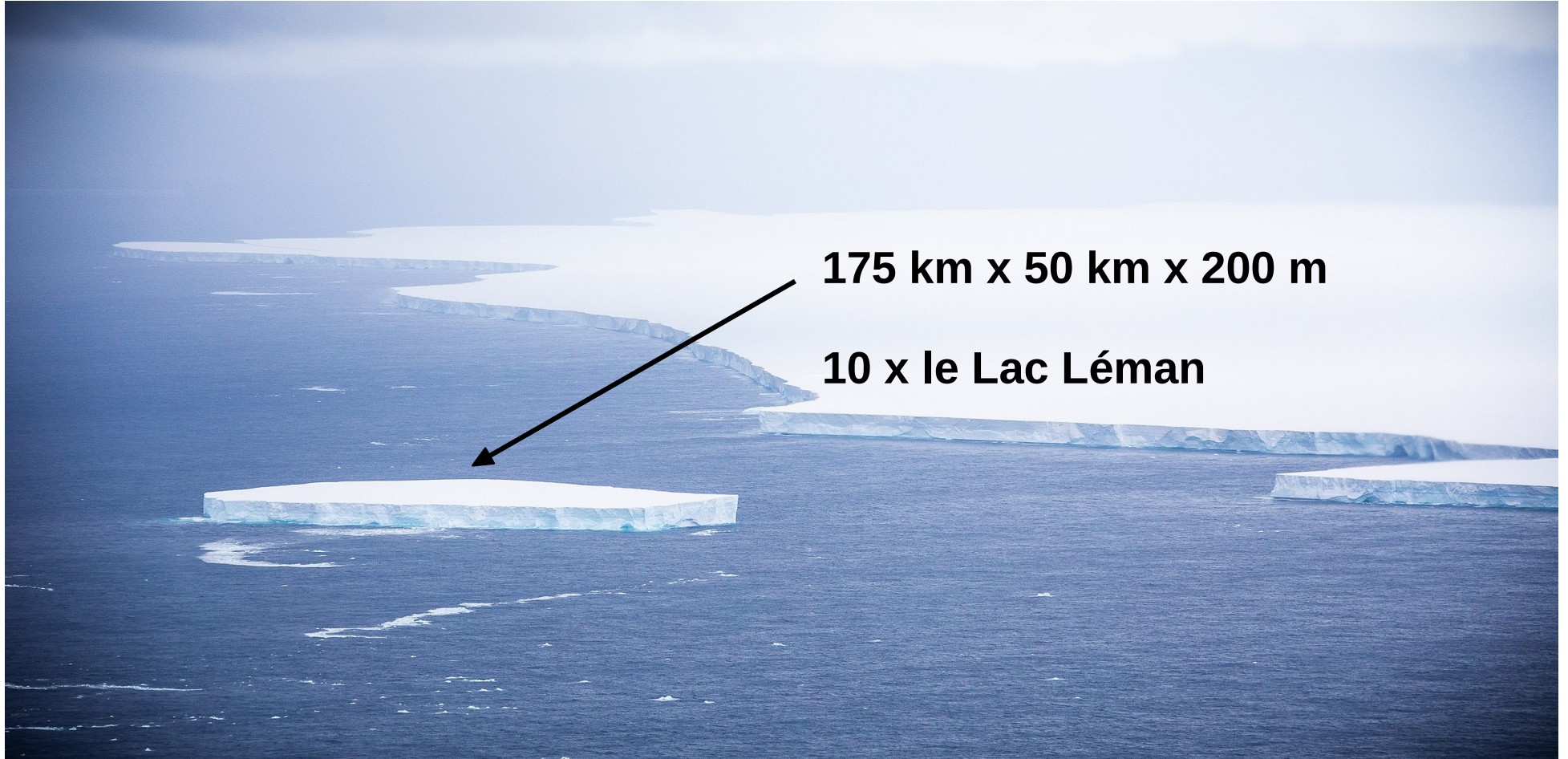


$M \downarrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow M \downarrow \downarrow \rightarrow T \uparrow \uparrow$

$$t_{\text{ev}} \simeq 2.14 \cdot 10^{67} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3 \text{ ans}$$

Un trou noir de 10^{11} kg
s'évapore maintenant

Iceberg A-68



175 km x 50 km x 200 m

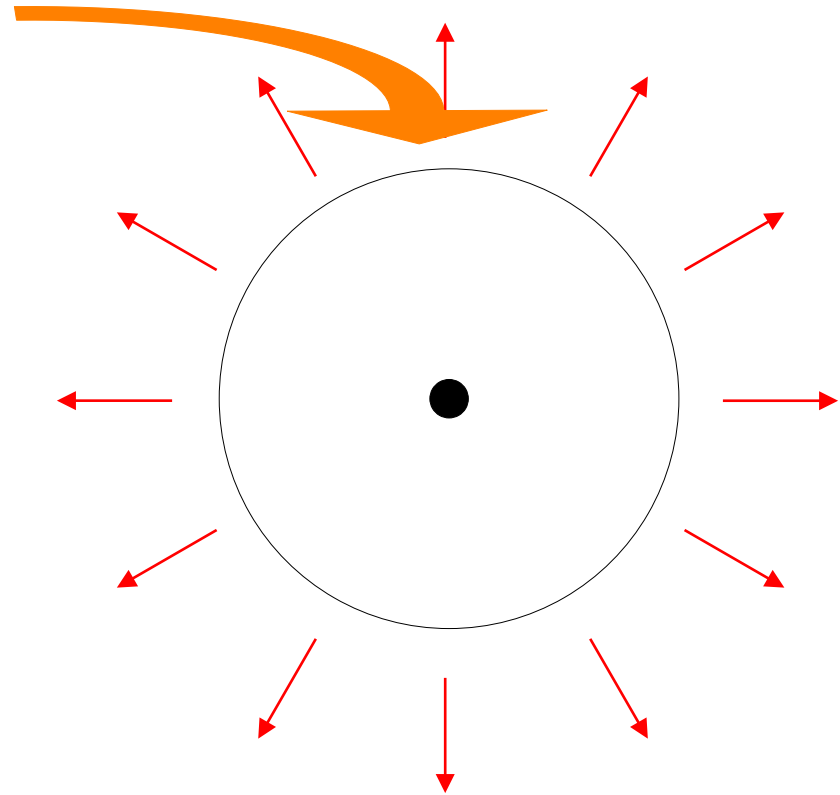
10 x le Lac Léman

Perte d'information



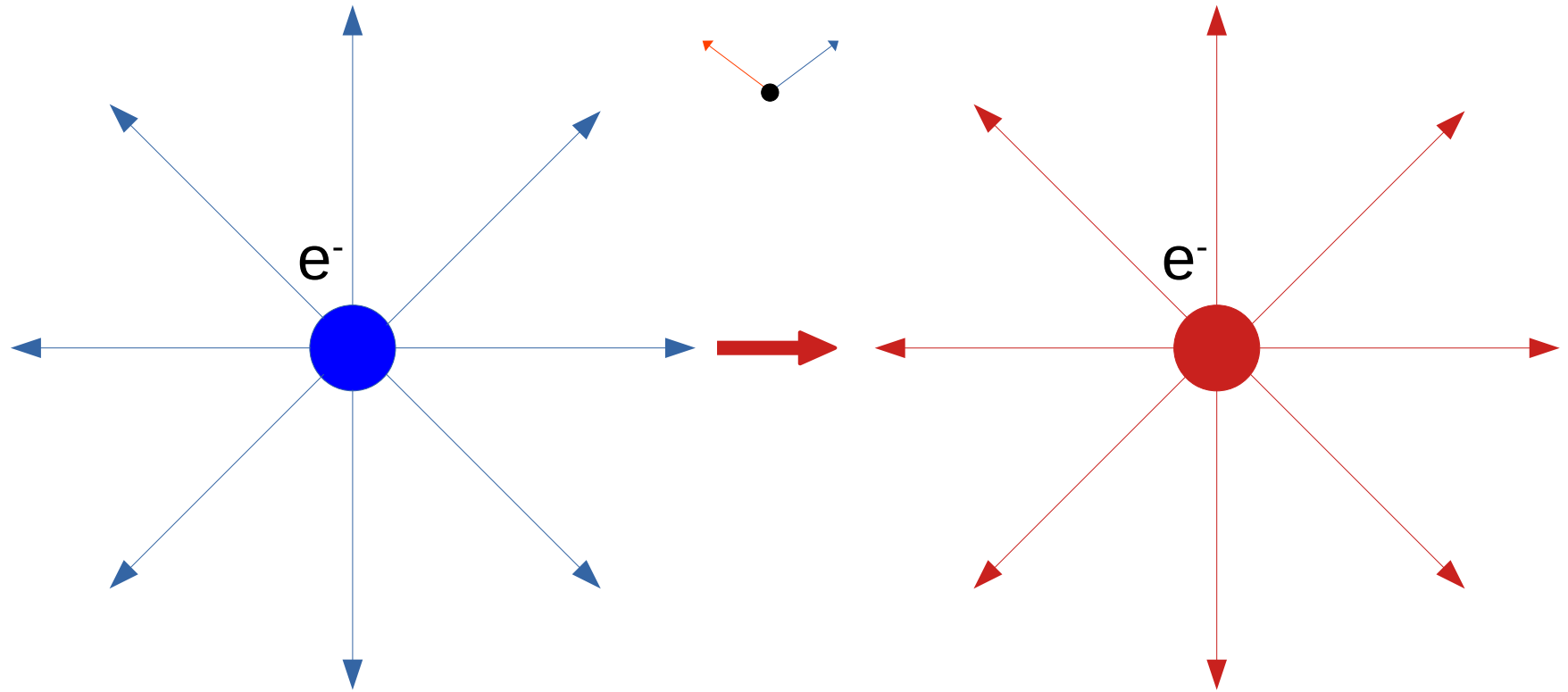
Deux pistes:

- L'information est encodée dans la structure de la singularité
- L'information est encodée dans le rayonnement de Hawking

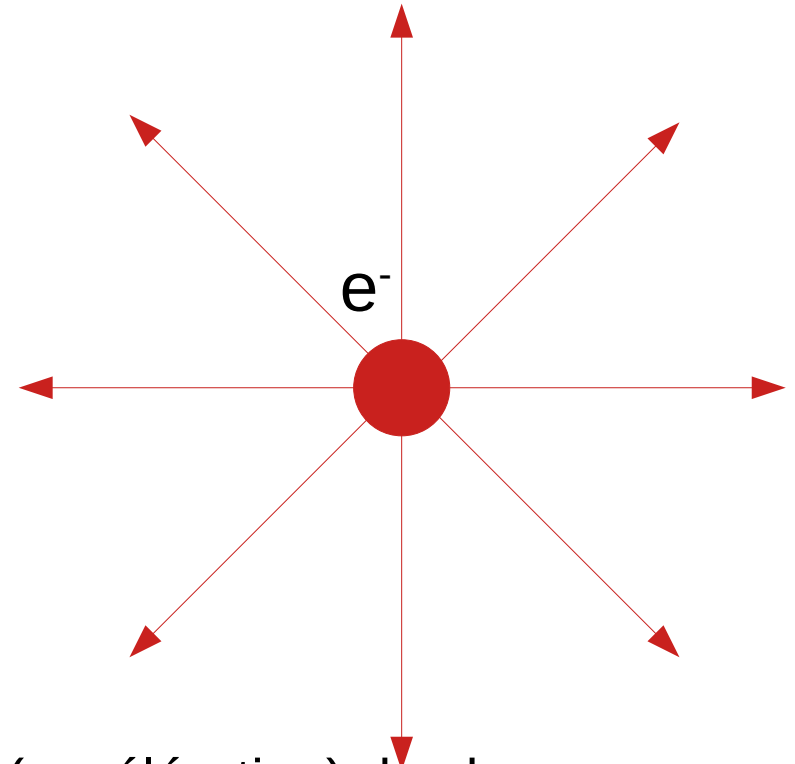


Ondes gravitationnelles

Champ électrique

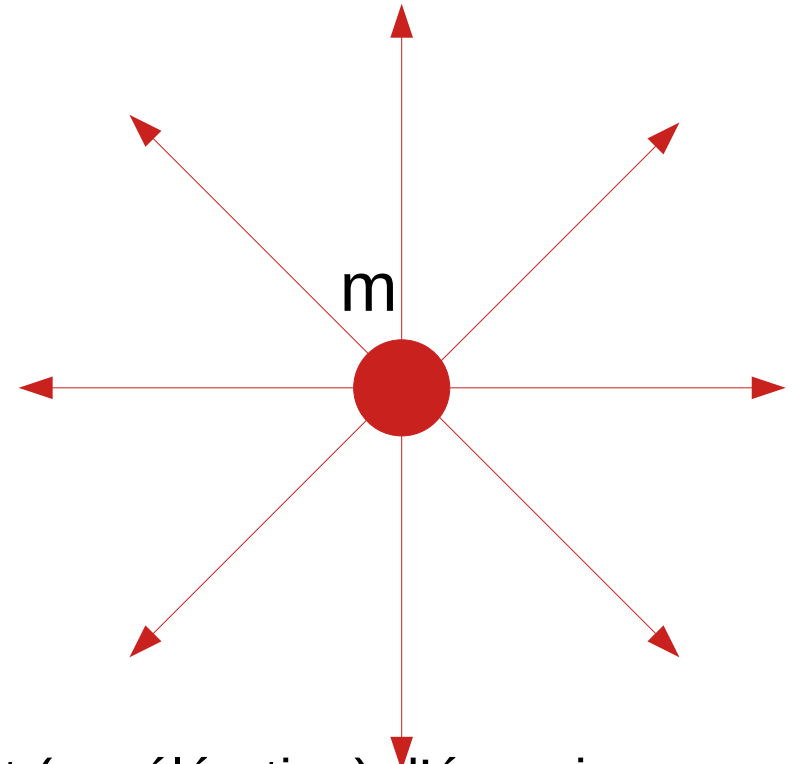


Ondes électromagnétiques



sont créées lorsque de déplacement (accélération) de charges

Ondes gravitationnelles



Sont créées lorsque de déplacement (accélération) d'énergie

Fluctuations de la métrique

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} + h_{\mu\nu}$$

$\eta_{\mu\nu}$ est la métrique de Minkowski, la métrique du vide.

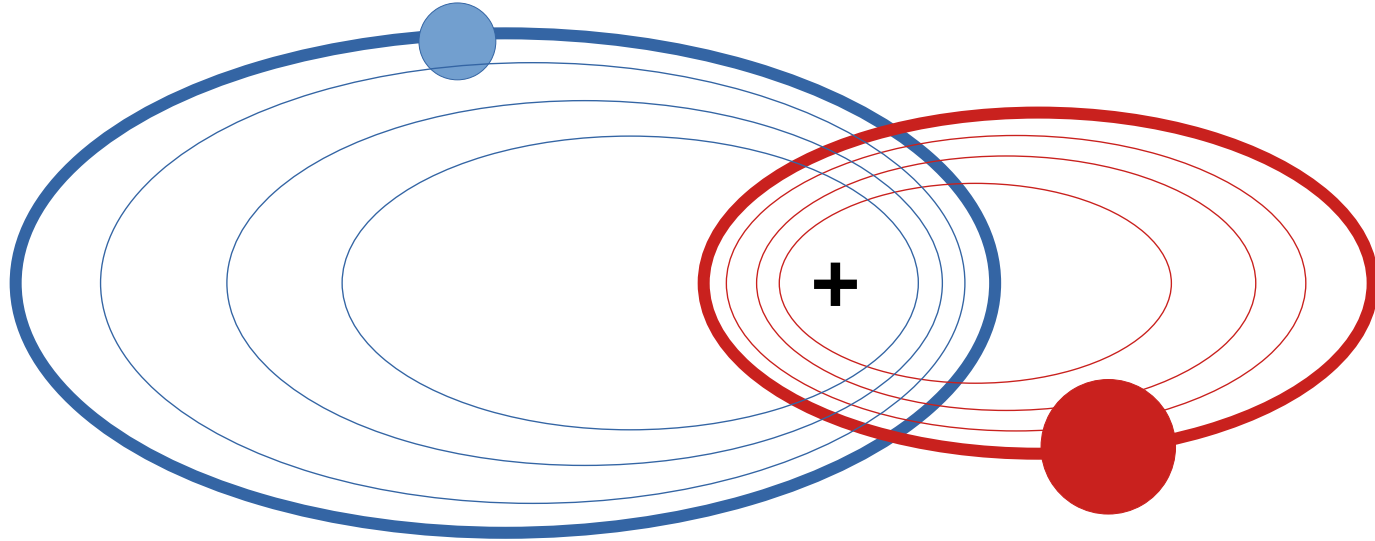
$h_{\mu\nu}$ est une faible fluctuation

On peut montrer qu'il existe des solutions pour $h_{\mu\nu}$ de type onde:

$$\bar{h}^{\mu\nu} = A^{\mu\nu} \exp(i k_\rho x^\rho) = A^{\mu\nu} \exp\left(i(k_0 t - \vec{k} \cdot \vec{x})\right)$$

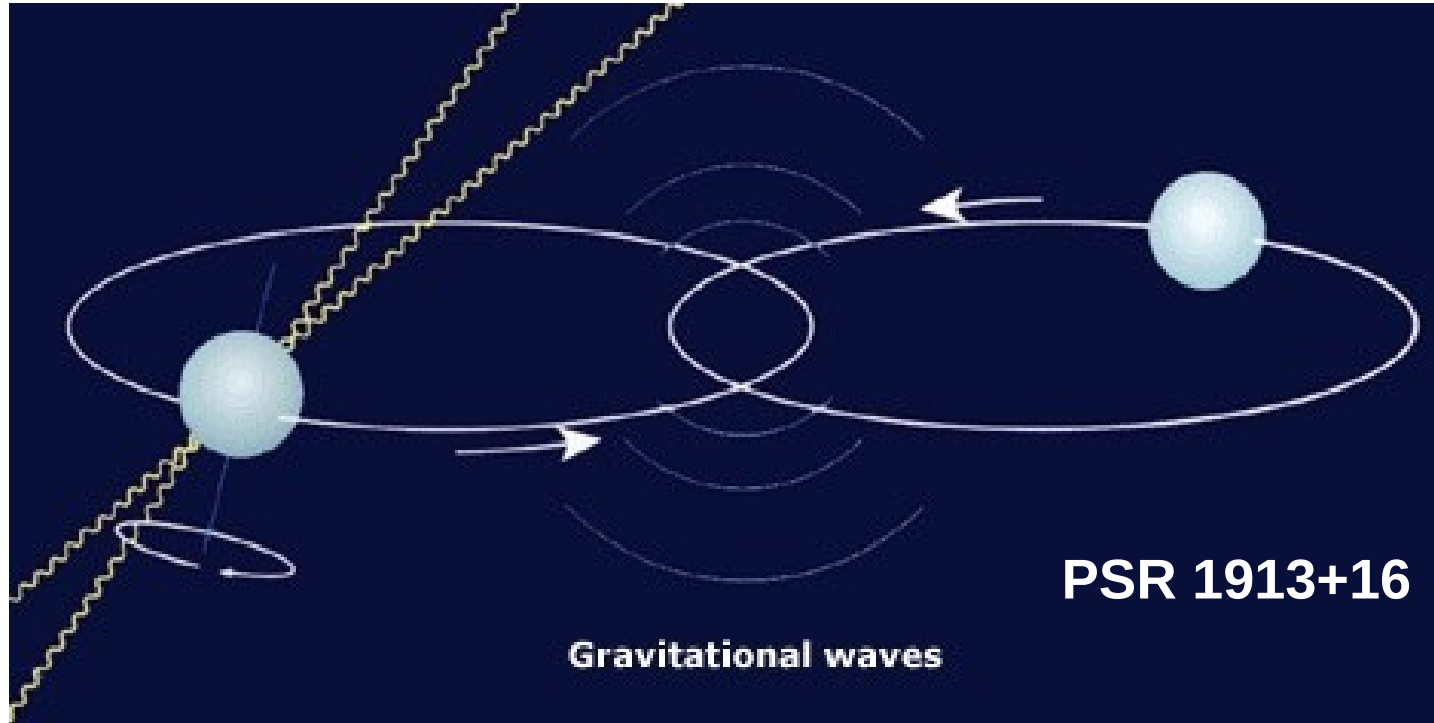
avec $k_\rho k^\rho = 0$, donc l'onde se propage à la vitesse de la lumière

Ondes gravitationnelles dans un système képlérien



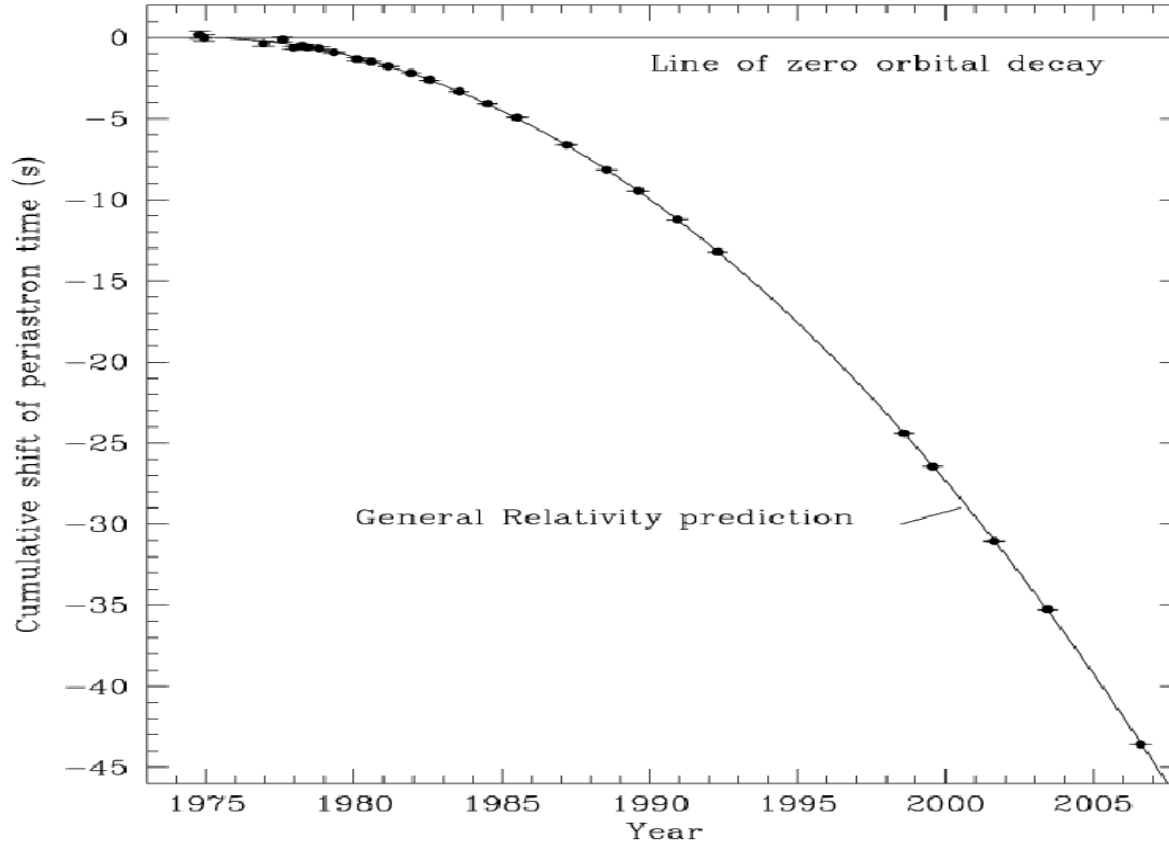
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2}{5} \frac{G^4 M^5}{c^5 a^5}$$

Pulsar binaire de Hulse et Taylor



Pulsar : étoile à neutrons qui émet un signal radio périodique
Période : 59 ms Distance au périastre : 750'000 km

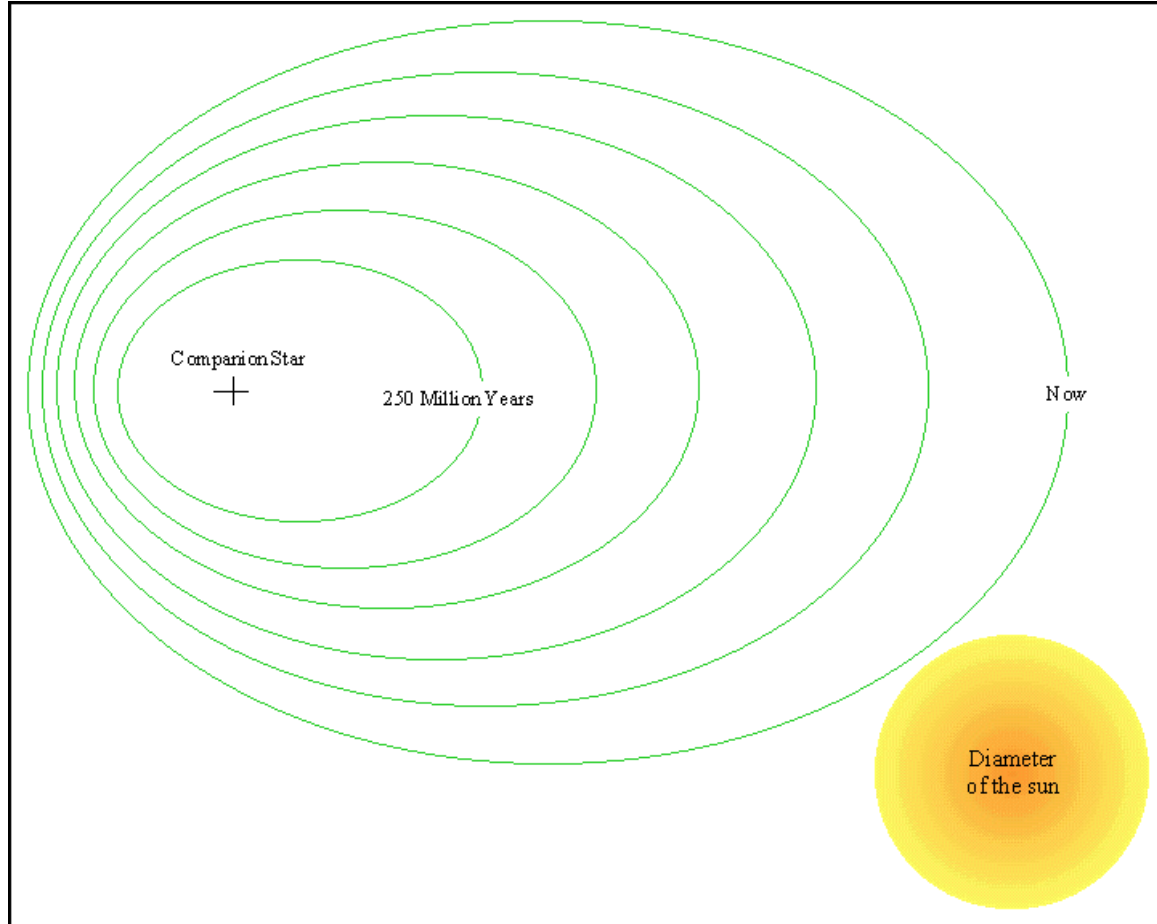
Pulsar binaire de Hulse et Taylor



$$P = 7.35 \cdot 10^{24} \text{ J}$$

Prix Nobel de Physique 1993

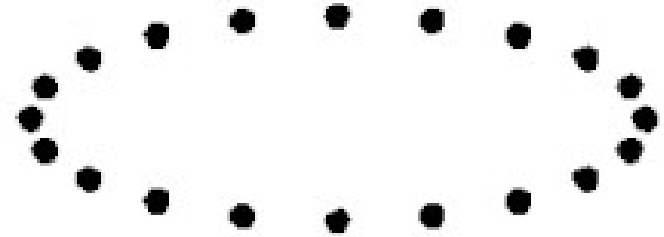
Évolution de PSR 1913+16



Observations directes

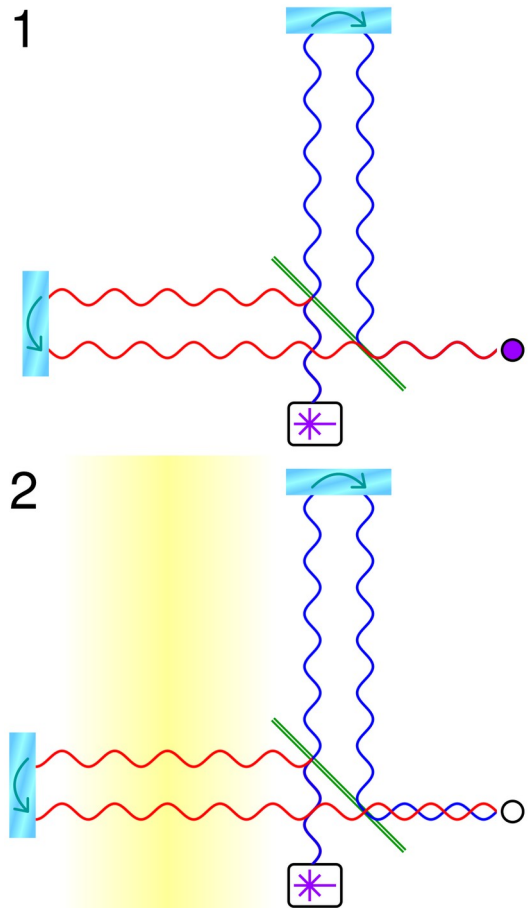
Passage d'une onde gravitationnelle

- Déformation dans le plan perpendiculaire à la direction de l'onde
- Amplitude h («strain»): rapport entre la taille maximale et la taille normale
- h est inversement proportionnel à la distance
- Pour le pulsar de Hulse et Taylor, $h \approx 10^{-22}$



$$h \simeq \frac{R_S}{D} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

Interférométrie laser



LIGO et VIRGO



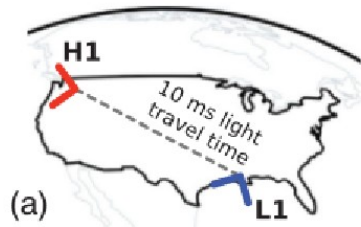
Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory



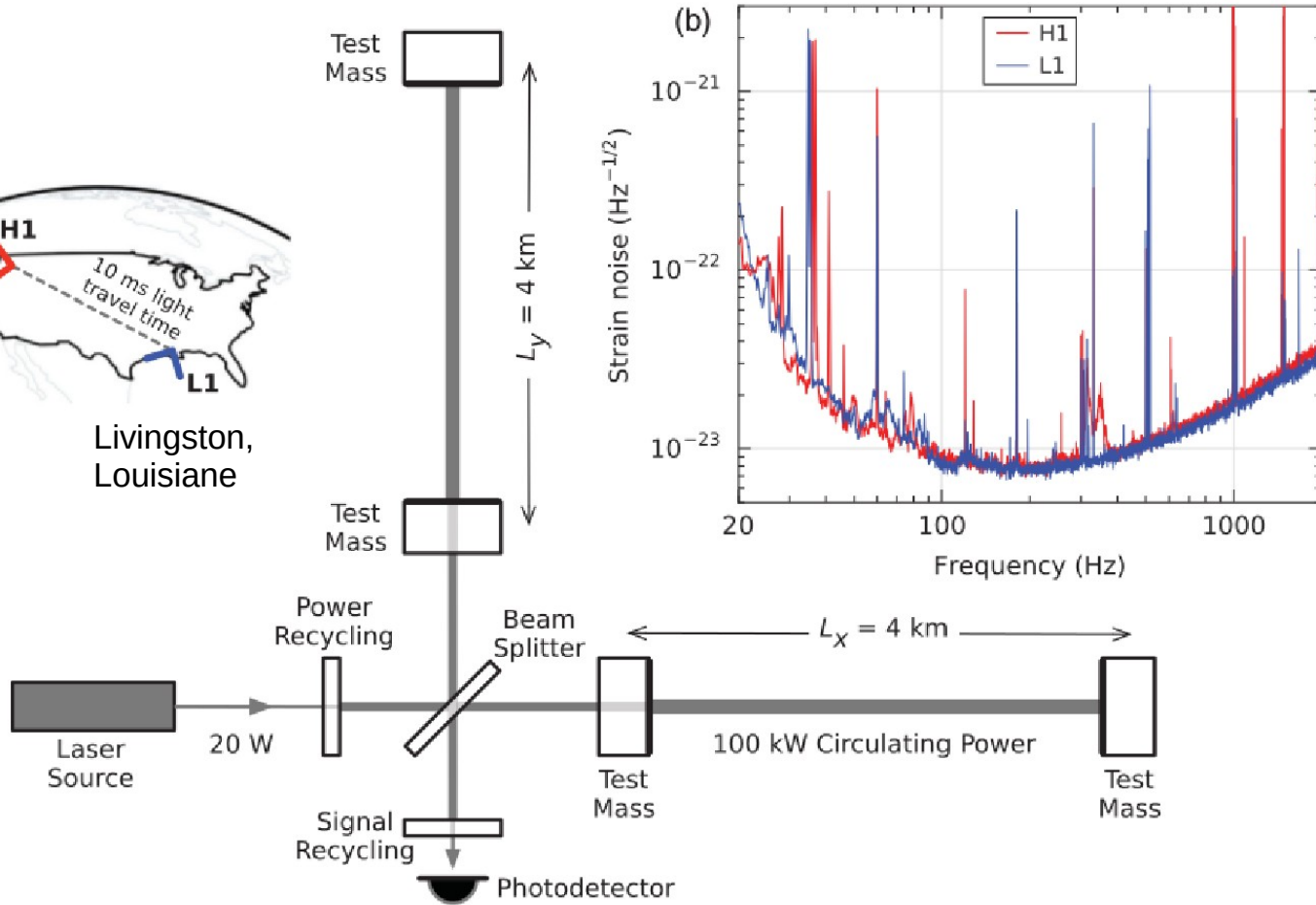
VIRGO

LIGO

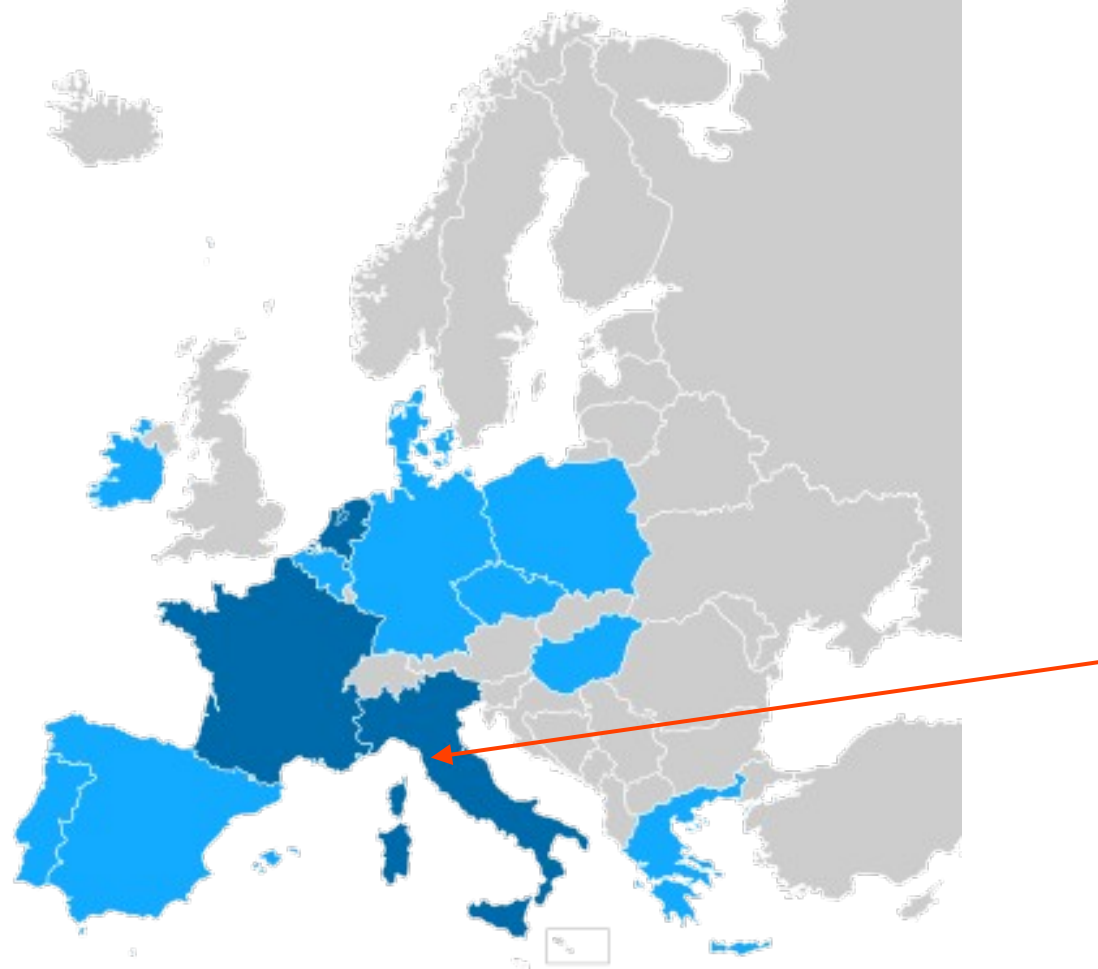
Hanford,
Washington



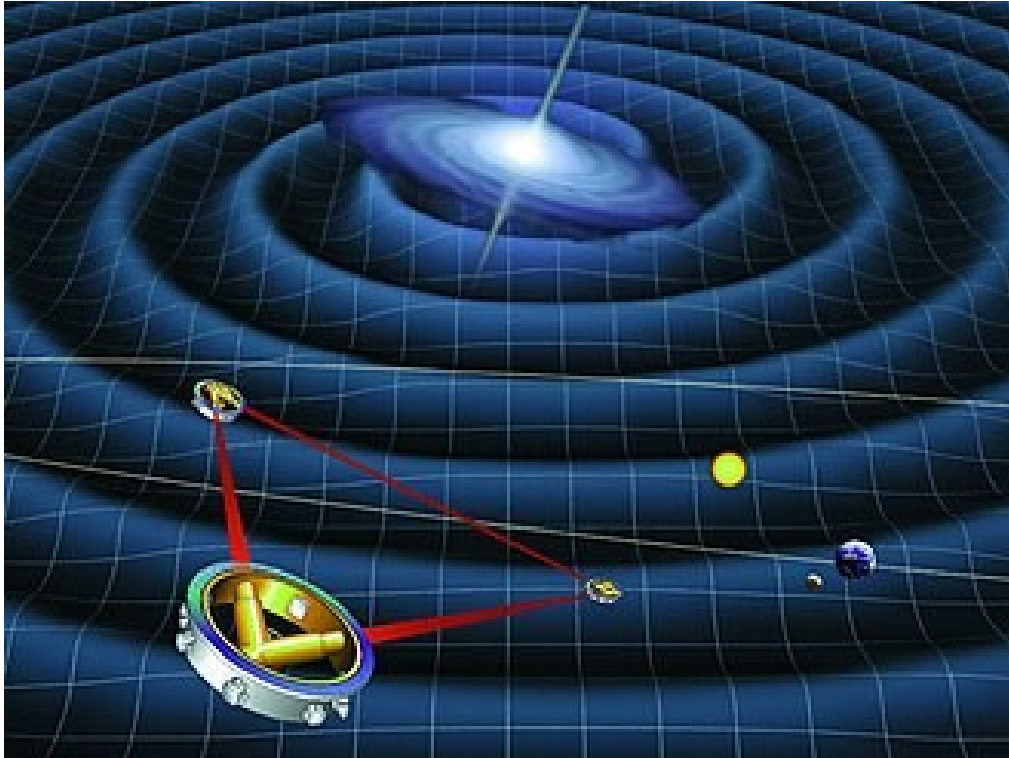
Livingston,
Louisiane



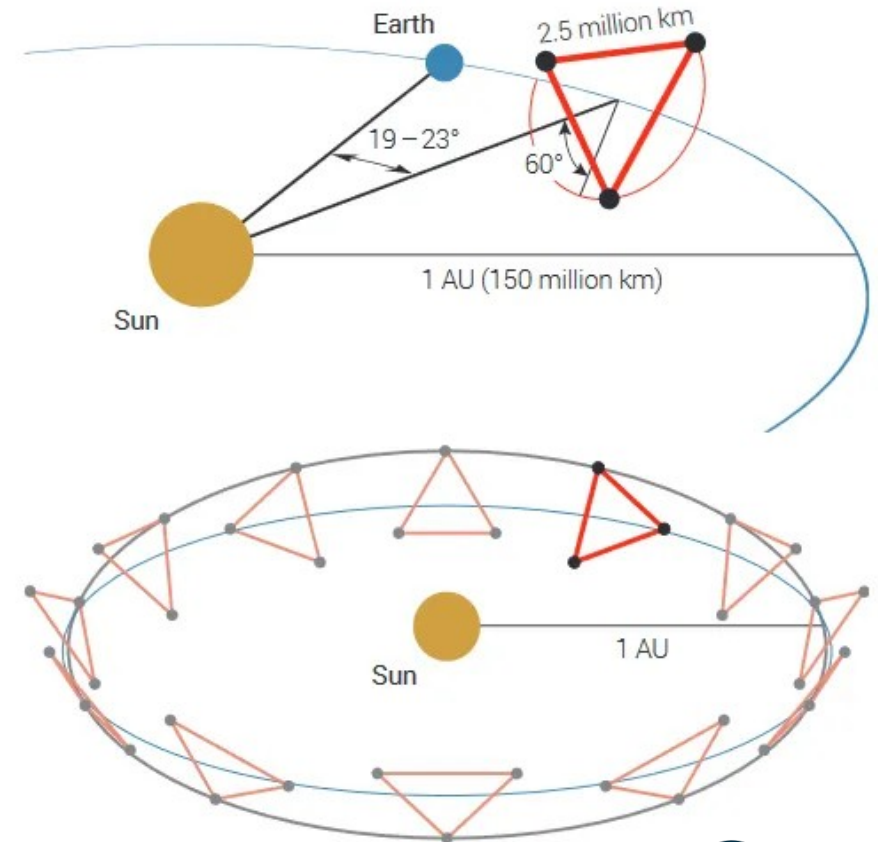
VIRGO



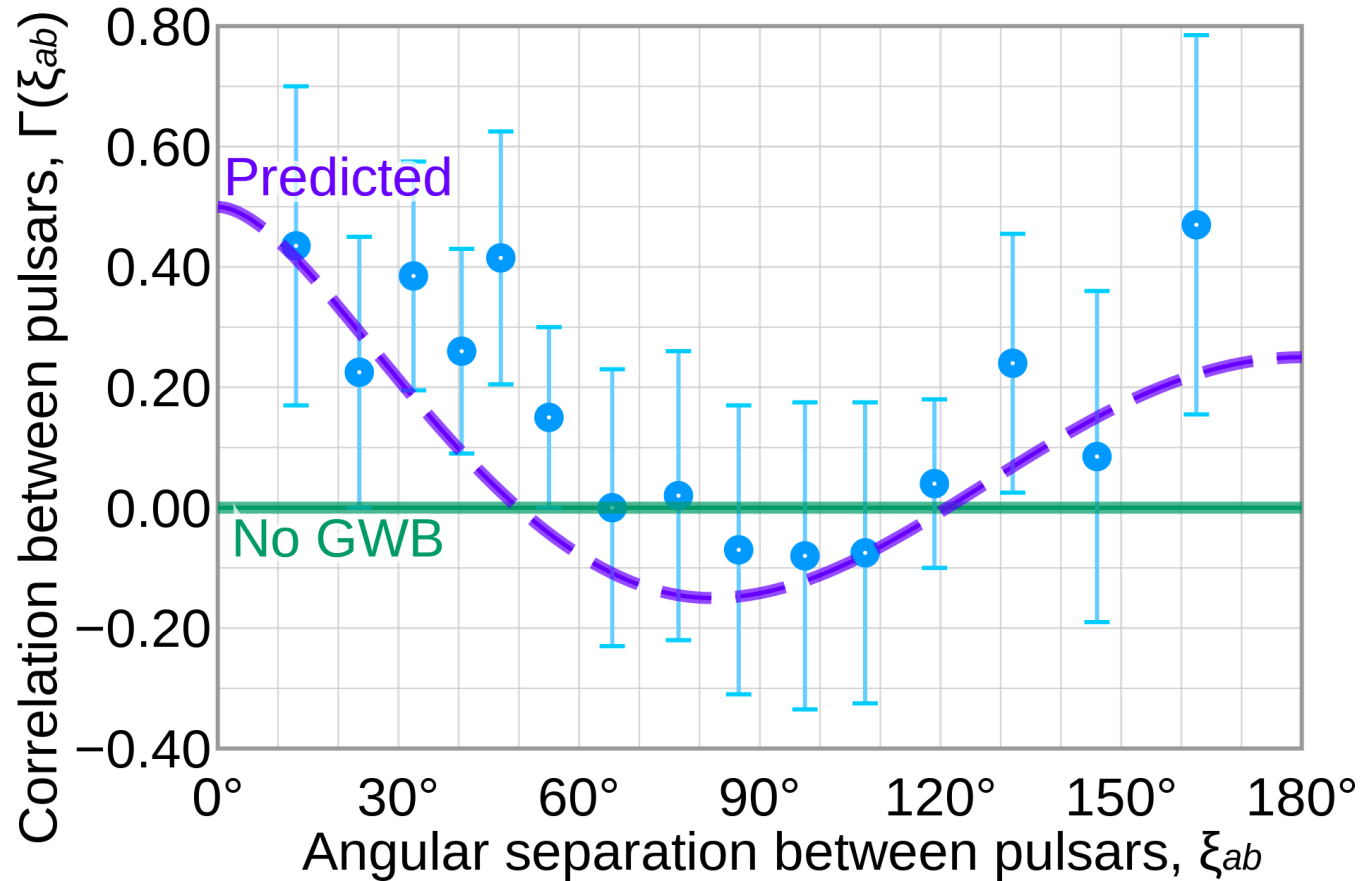
LISA



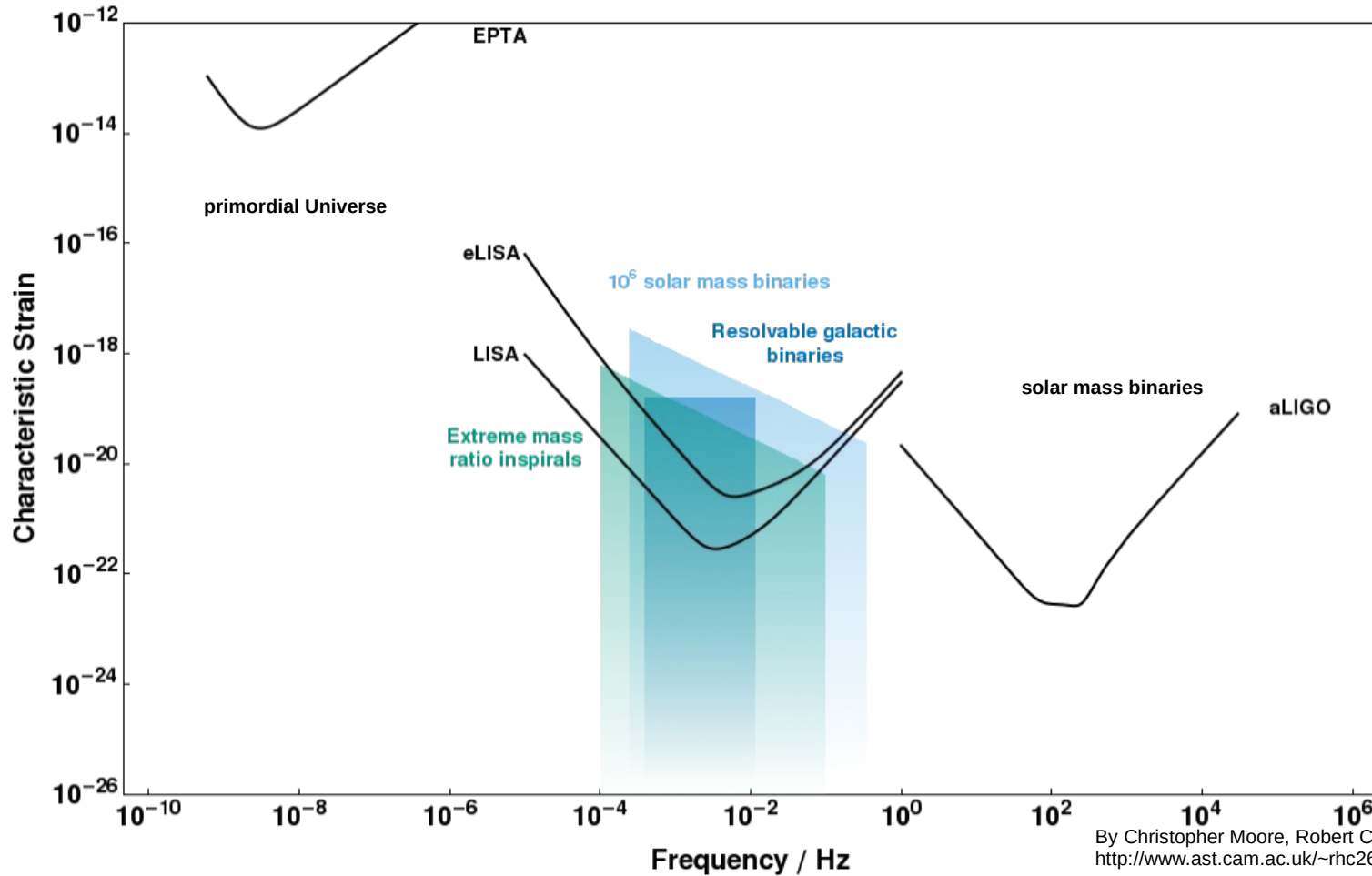
Laser Interferometer Space Antenna
2034 (2037)



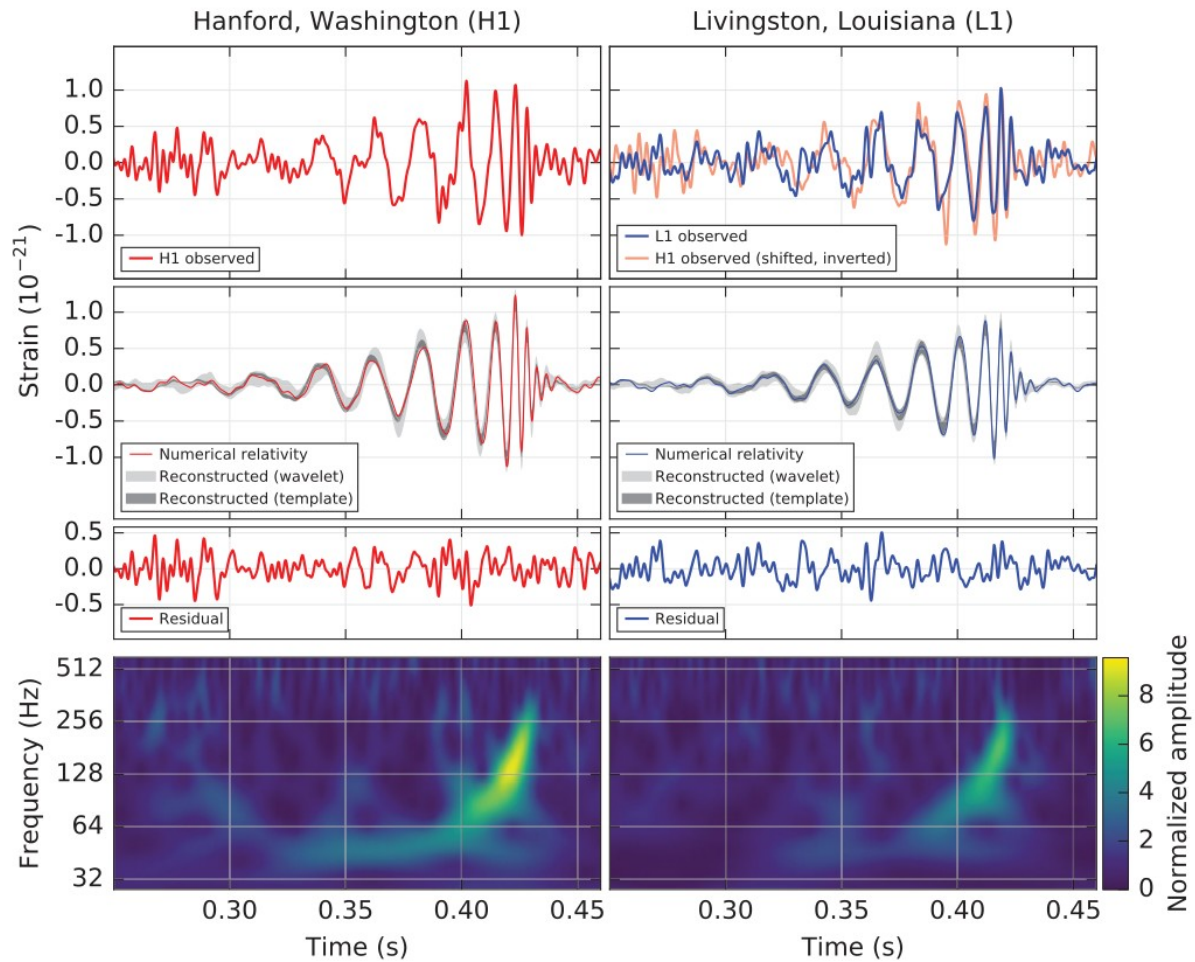
Pulsar Timing Arrays

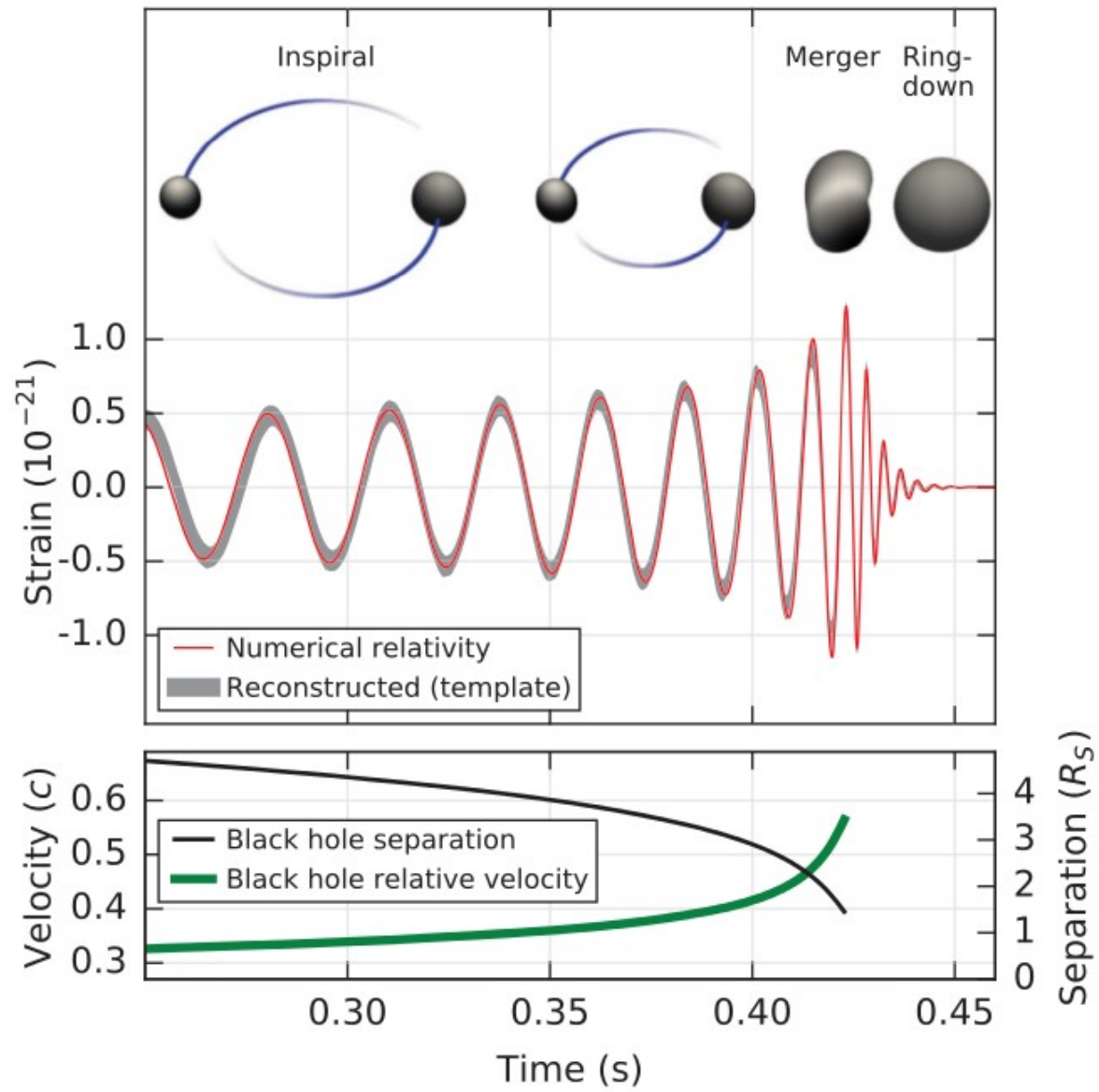


Sensibilité



GW150914



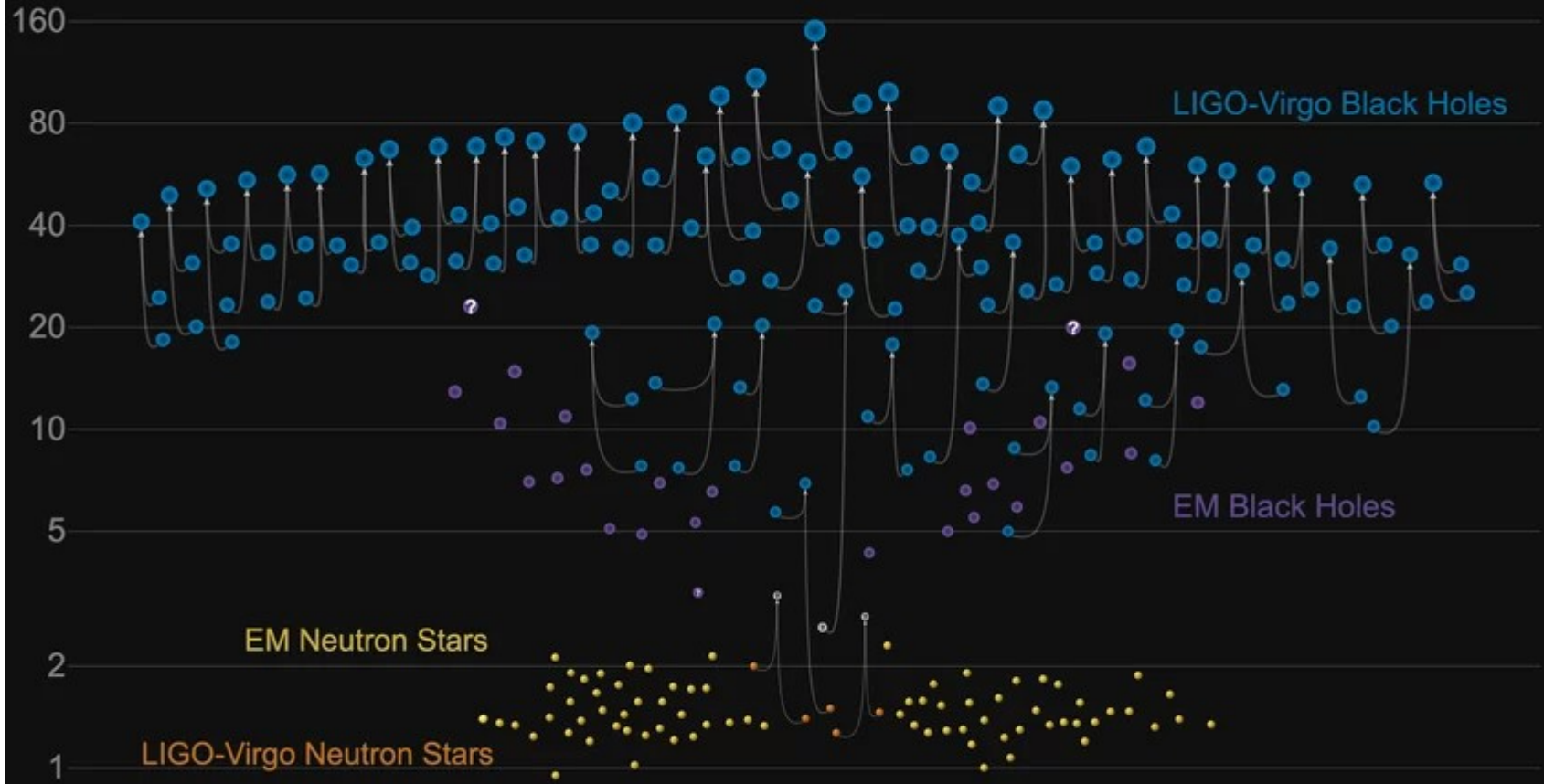


Qui étaient les acteurs de GW150914 ?

- Les objets étaient environ 30 fois plus lourds que le Soleil
- Le signal est observé jusqu'au rayon de Schwarzschild
- Il n'y a aucun signal optique (visible, rayons X, rayons gamma)
- Nous avons affaire à deux trous noirs de 30 masses solaires qui ont fusionnés
- Ce faisant, ils ont perdus 3 masses solaires sous forme d'ondes gravitationnelles en 0.5 secondes
- C'est 10 fois la luminosité de toutes les étoiles de toutes les galaxies de l'Univers observable!!!

Masses in the Stellar Graveyard

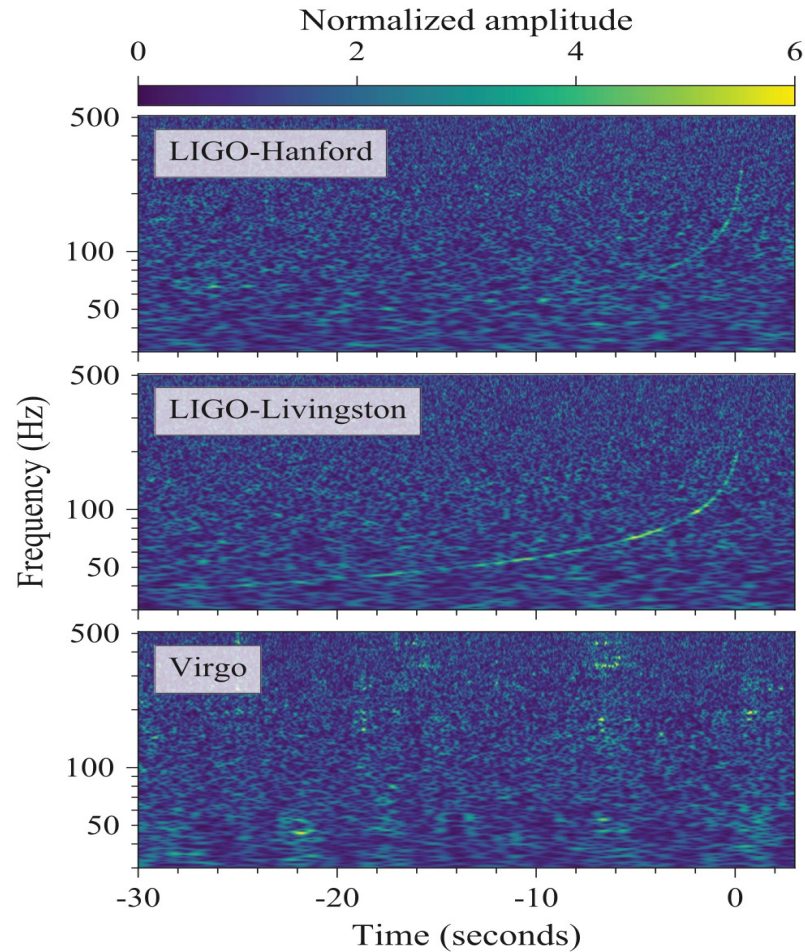
in Solar Masses



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

GW170817



GW170817

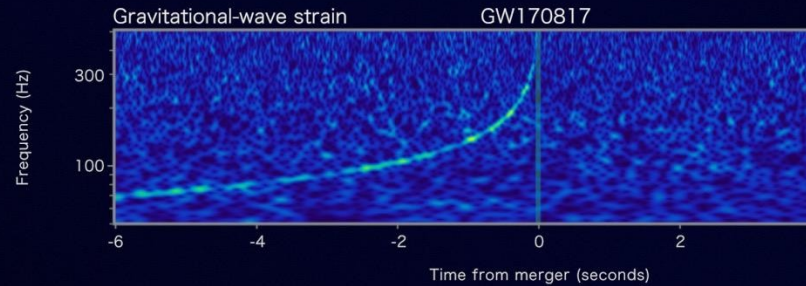
Fermi

Reported 16 seconds
after detection



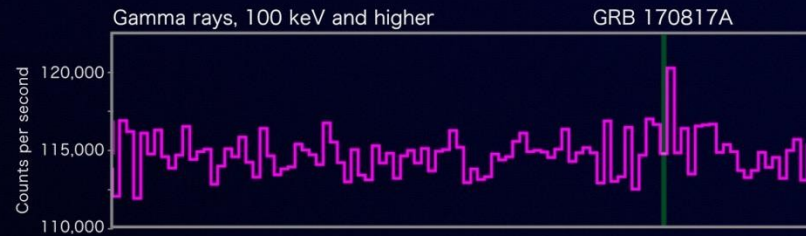
LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection

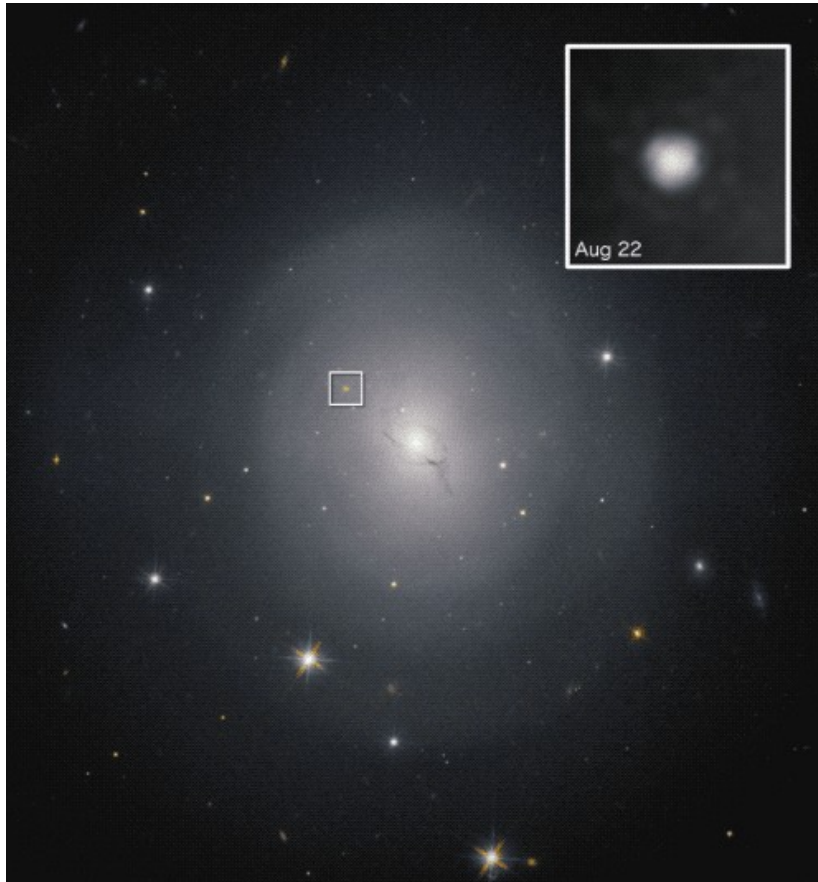
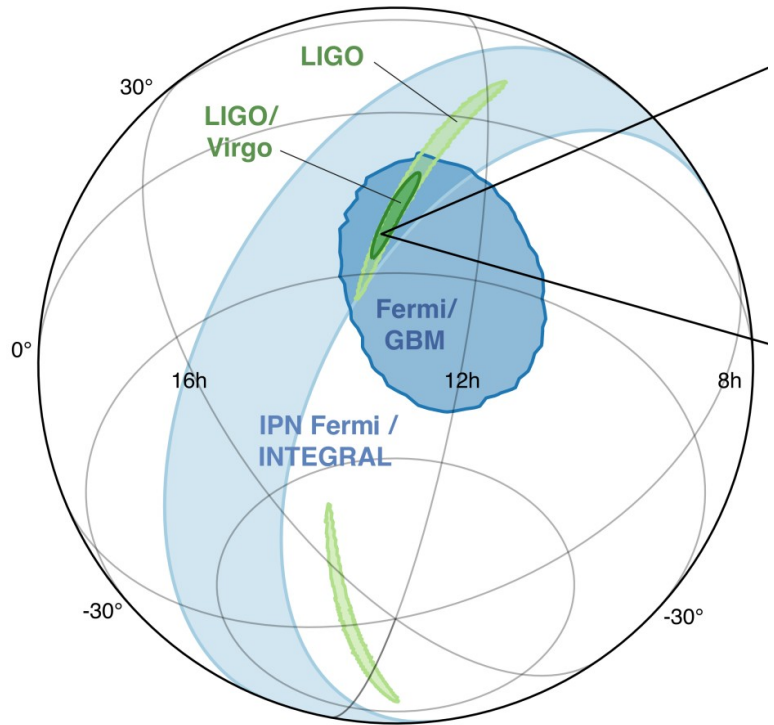


INTEGRAL

Reported 66 minutes
after detection



GW170817

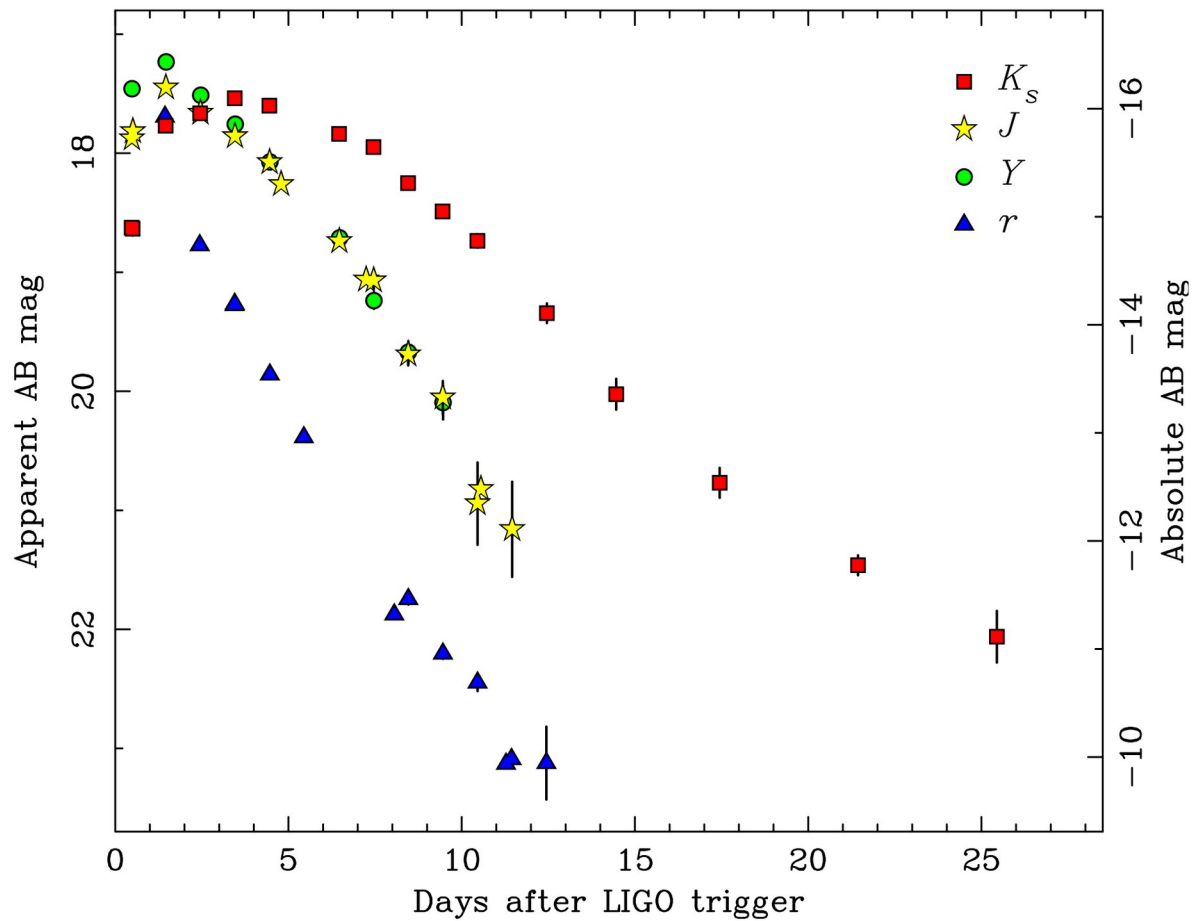


NGC 4993

144 années-lumière

Hubble/NASA/ESA

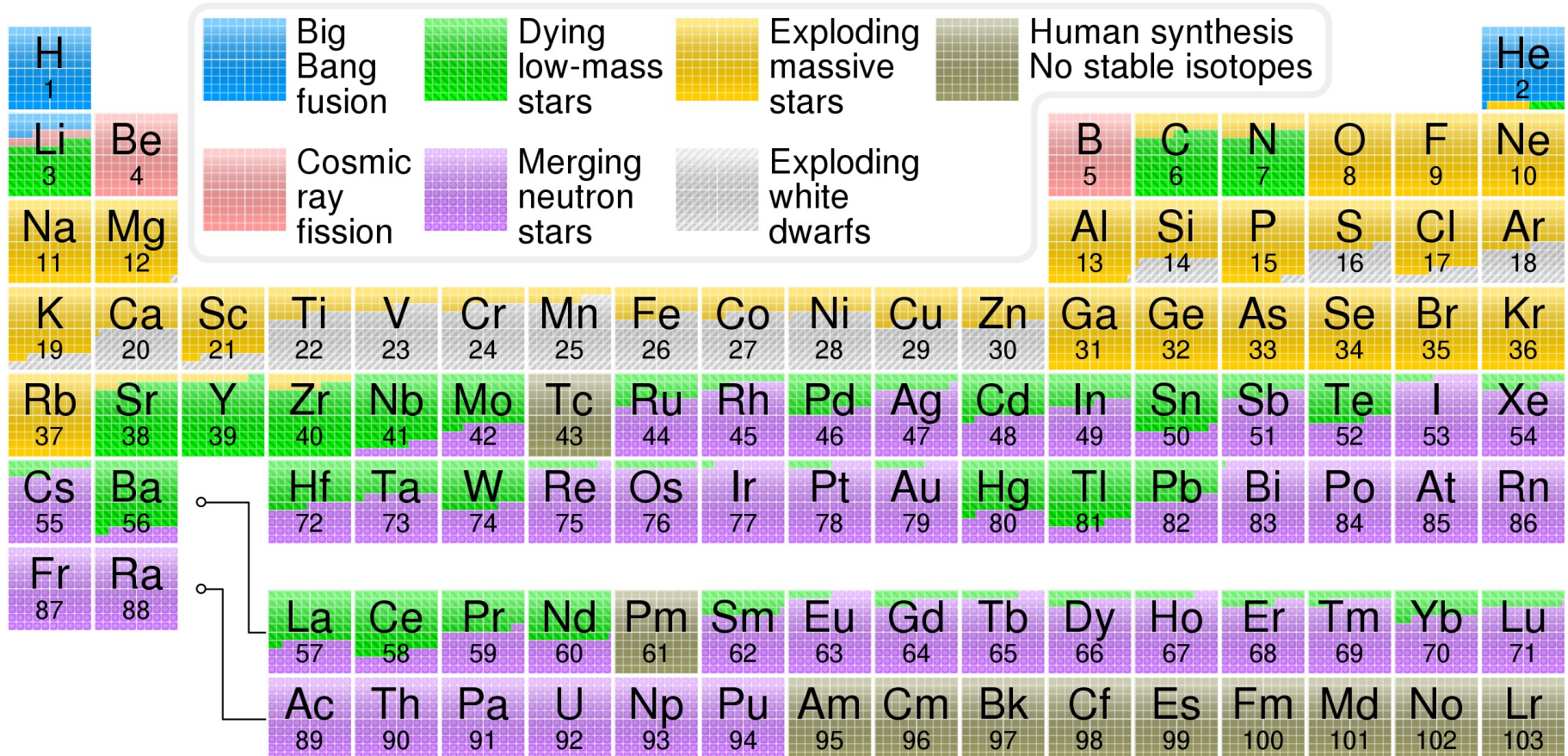
GW170817



Qu'est-ce que GW170817 ?

- Collision explosive de deux étoiles à neutrons, $M_{\text{tot}} = 2.82 M_{\odot}$
 - Comparable à une supernova
- L'existence d'une surface permet la formation d'ondes électromagnétiques
 - Kilonova : 1000 x moins lumineux qu'une supernova
- La fusion a probablement généré un trou noir
- Production des éléments r (au delà du fer)
 - 16'000 M_{\oplus} d'éléments lourds
 - 10 M_{\oplus} d'or et de platine

Formation des éléments



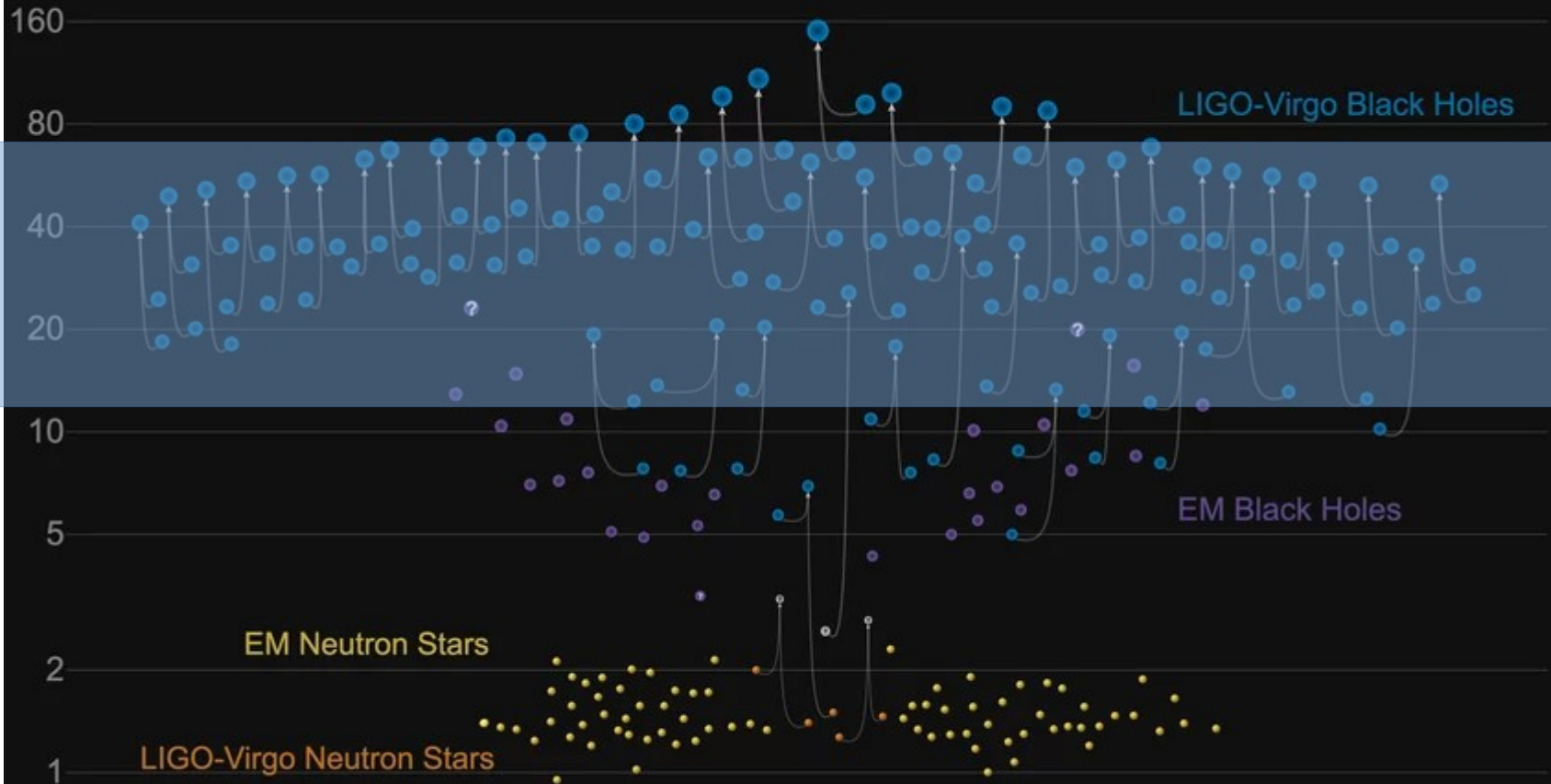
Importance de GW170817

- « Naissance » de l'astronomie multi-messager
- La vitesse de la lumière et celle des ondes gravitationnelles ne diffère pas plus que 10^{-16}
 - Exclut la violation de la symétrie de Lorentz
 - Exclut plusieurs théories de gravité modifiée
- Les kilonovas sont des sirènes standard
 - Mesure de H_0
- Confirmation du rôle des fusions d'étoiles à neutrons pour la nucléosynthèse

Retour et fin sur les trous noirs

Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



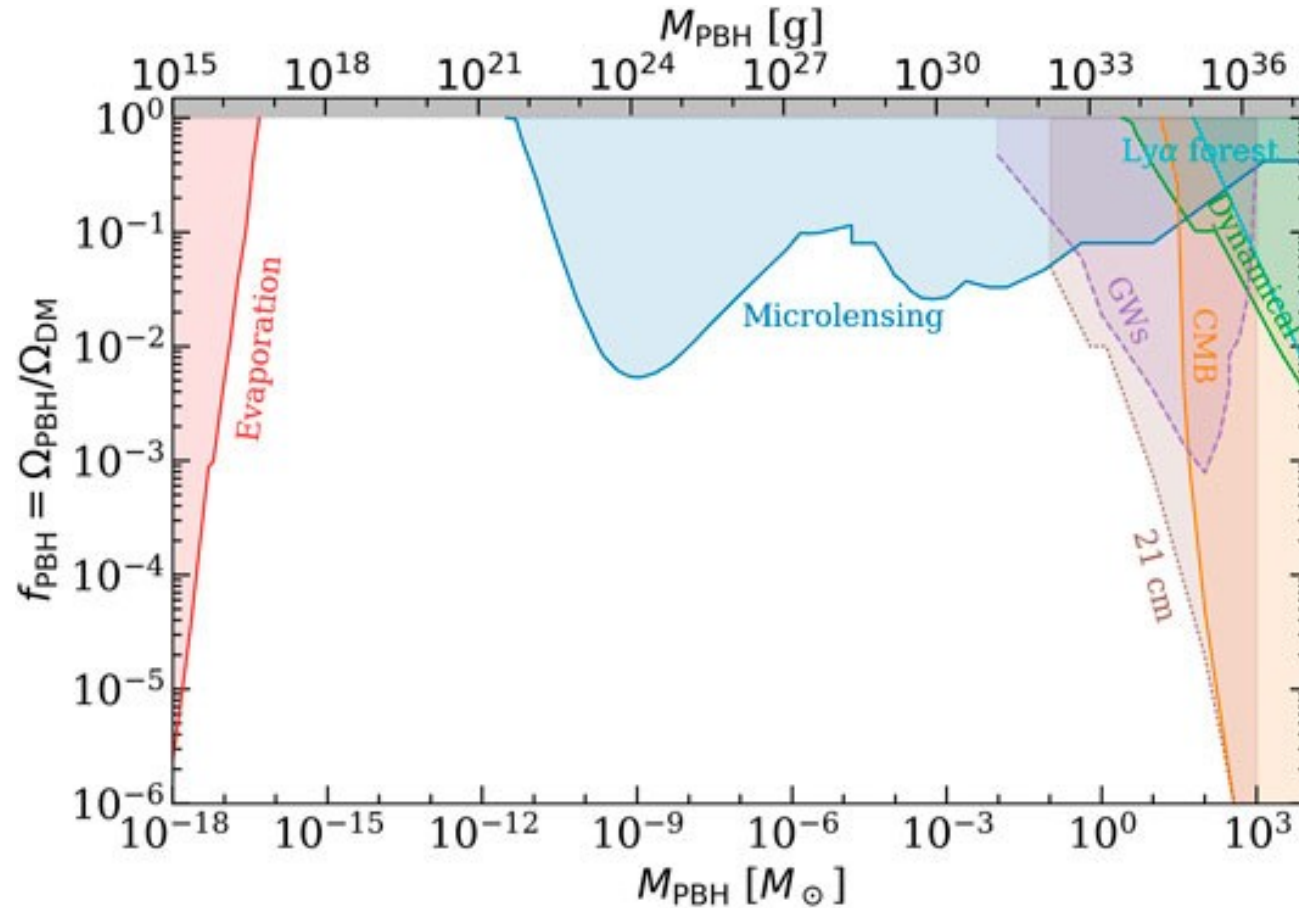
GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Trous noirs et matière noire

- Les trous noirs:
 - ont une masse
 - n'ont pas de charge électrique
- Ils sont donc des candidats pour la matière noire
- Mais ils ne peuvent pas provenir d'étoiles, à cause de la nucléosynthèse primordiale
 - Trous noirs primordiaux ?

Trous noirs primordiaux



Si les TNP ont tous une masse de $10^{-15} M_{\odot}$, alors il en faut 10^{13} pc^{-3} ,

donc 50'000 dans le système solaire