

L'An I de l'astronomie gravitationnelle

Fabien Cavalier¹ Éricourgoulhon²

¹Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
CNRS / Université Paris Sud
91898 Orsay

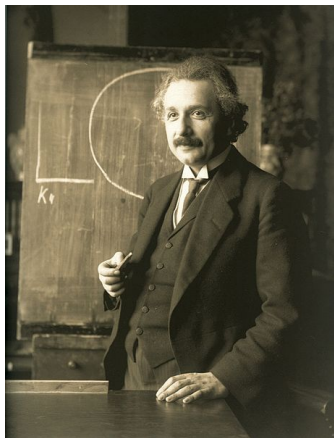
² Laboratoire Univers et Théories
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot
Paris Sciences et Lettres Research University
92190 Meudon
<http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/>

Nuit des ondes gravitationnelles

Grand Rex, Paris
20 mars 2017



Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?



Les **ondes gravitationnelles** sont des **vibrations de l'espace-temps**.

Elles ont été prédites par Albert Einstein en 1916, dans le cadre de la **relativité générale**.

Qu'est-ce que l'espace-temps

Nous vivons dans un espace à *trois dimensions* :

- devant ↔ derrière,
- gauche ↔ droite,
- haut ↔ bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Qu'est-ce que l'espace-temps

Nous vivons dans un espace à *trois dimensions* :

- devant ↔ derrière,
- gauche ↔ droite,
- haut ↔ bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Le temps ne possède qu'*une seule dimension* : passé → futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

Qu'est-ce que l'espace-temps

Nous vivons dans un espace à *trois dimensions* :

- devant ↔ derrière,
- gauche ↔ droite,
- haut ↔ bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Le temps ne possède qu'*une seule dimension* : passé → futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

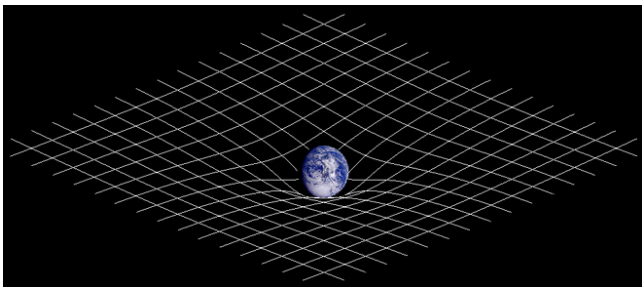
On peut unifier l'espace et le temps dans un continuum mathématique à *quatre dimensions* : *l'espace-temps*

Concept dû à Albert Einstein, Henri Poincaré et Herman Minkowski au début du XXe siècle.

La relativité générale

L'espace-temps est **dynamique**

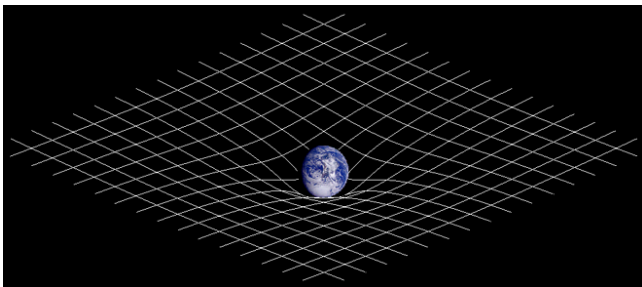
La gravitation apparaît comme la **courbure de l'espace-temps**



La relativité générale

L'espace-temps est **dynamique**

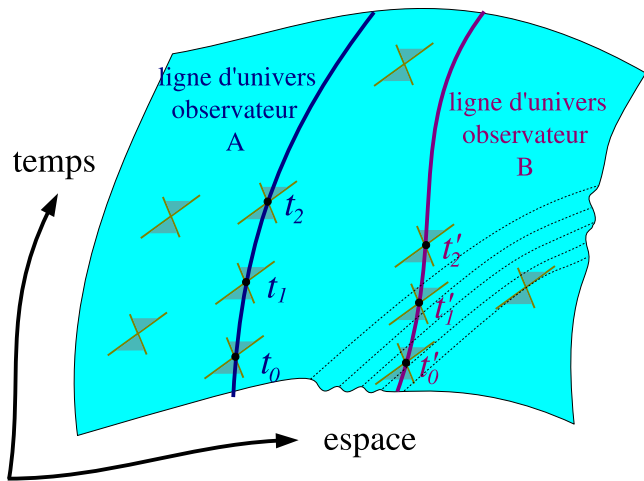
La gravitation apparaît comme la **courbure de l'espace-temps**



La gravitation **dévie les rayons lumineux** et a un effet sur **l'écoulement du temps**

Les ondes gravitationnelles

Des petites oscillations dans la courbure...



Une lente compréhension théorique

- 1905 Poincaré : propose que la gravitation soit transmise par des “ondes gravifiques” voyageant à la vitesse de la lumière
- 1916 Einstein : première prédiction dans le cadre de la relativité générale et formule du quadrupôle
- 1922 Eddington : “propagate at the speed of thought”
- 1936 Einstein & Rosen : “I arrived at the interesting result that gravitational waves do not exist, though they had been assumed a certainty to the first approximation”
- 1956 Pirani : réalité des ondes (ondes de courbure)
- 1957 Feynman : les ondes gravitationnelles déposent de l'énergie lors de leur interaction avec de la matière

Des ondes de différentes natures...

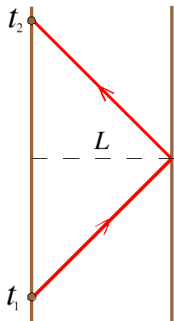
	ondes sonores	ondes électromagnétiques	ondes gravitationnelles
ce qui vibre	pression de l'air	champ électromagnétique	espace-temps
vitesse	$c_s = 343 \text{ m/s}$	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
dans le vide	non	oui	oui
type d'ondes	longitudinales	transverses	transverses
génération	vibration mécanique	accélération charges électriques	accélération masses (ou énergies)
longueur d'onde	\gg taille de la source	\ll taille de la source	\gg taille de la source
rayonnement	monopolaire	dipolaire	quadrupolaire
quantum	—	photon	graviton
spin	—	1	2

Effets du passage d'une onde gravitationnelle



Mesure la distance L entre deux masses libres par la méthode "radar" :

$$L = \frac{1}{2} c(t_2 - t_1)$$



Variation de la longueur L au passage d'une onde gravitationnelle :

$$\delta L \simeq h L$$

h = amplitude de l'onde gravitationnelle

En pratique h est si petit que nos sens n'y sont pas sensibles :
pour les principales **sources astrophysiques** : $h \sim 10^{-21}$!!!



Sources astrophysiques

Luminosité gravitationnelle : énergie émise par unité de temps sous forme d'ondes gravitationnelles :

$$\mathcal{L} \sim \frac{c^5}{G} s^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6 c^2 \quad \frac{c^5}{G} \simeq 4 \cdot 10^{52} \text{ W}$$

- c : vitesse de la lumière (*relativité*); G : constante de Newton (*gravitation*)
- s : paramètre d'asymétrie : $s = 0$ si symétrie sphérique
- v : vitesse caractéristique des mouvements à l'intérieur de la source
- \mathcal{C} : paramètre de **compacité** : $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R}$

Sources astrophysiques

Luminosité gravitationnelle : énergie émise par unité de temps sous forme d'ondes gravitationnelles :

$$\mathcal{L} \sim \frac{c^5}{G} s^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6 c^2 \quad \frac{c^5}{G} \simeq 4 \cdot 10^{52} \text{ W}$$

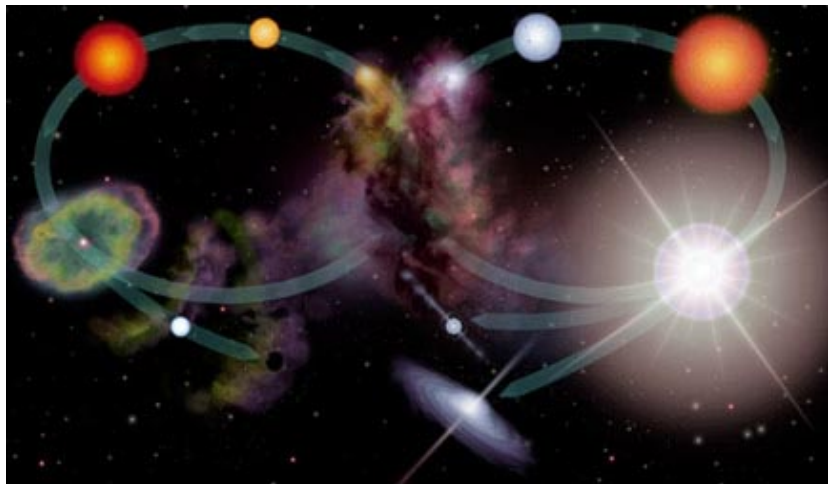
- c : vitesse de la lumière (*relativité*); G : constante de Newton (*gravitation*)
- s : paramètre d'asymétrie : $s = 0$ si symétrie sphérique
- v : vitesse caractéristique des mouvements à l'intérieur de la source

- \mathcal{C} : paramètre de **compacité** : $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R}$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	ét. neutrons	trou noir
ρ [kg m ⁻³]	$2 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^3$	10^3	10^{10}	10^{17}	0
\mathcal{C}	10^{-39}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	0.2	0.5

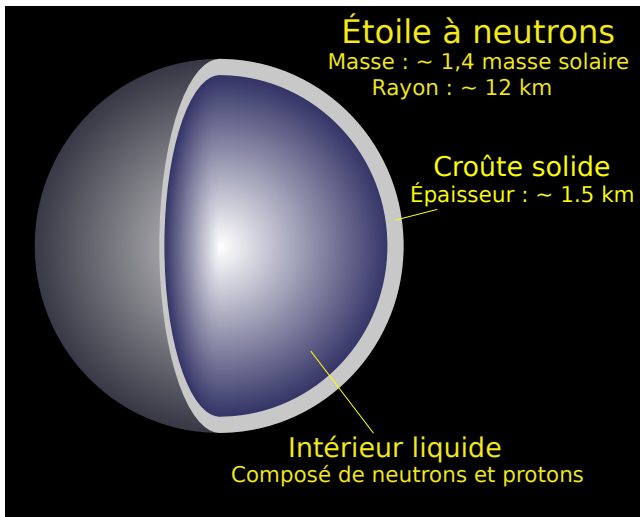
Seuls les **objets compacts** sont de bons émetteurs d'ondes gravitationnelles

Vie et mort des étoiles



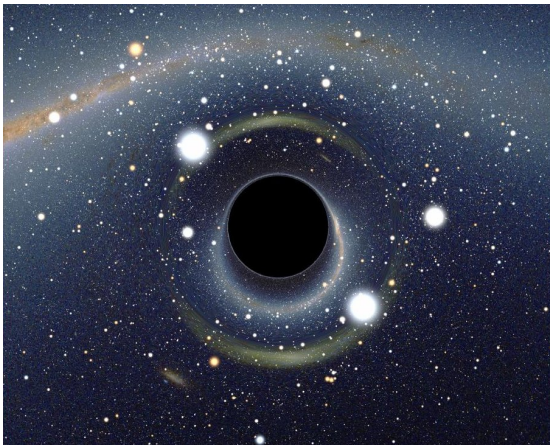
[source: NASA]

Qu'est-ce qu'une étoile à neutrons ?



[source : NASA]

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Une définition en quelques mots :

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper.

La frontière (immatérielle) entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'Univers est appelée **horizon des événements**.

Mirages gravitationnels au voisinage d'un trou noir



Ce que l'on verrait s'il y avait un trou noir de même masse que la Terre (rayon ~ 1 cm) à 5 m de nous.

Image réalisée par T. Paumard (LESIA, Obs. Paris) (2014), via le logiciel de calcul de géodésiques **GYOTO**, à partir de la photo *Paris s'éveille* prise par A. Duret-Lutz

<http://gyoto.obspm.fr>

Mirages gravitationnels au voisinage d'un trou noir



Ce que l'on verrait s'il y avait un trou noir de même masse que la Terre (rayon ~ 1 cm) à 5 m de nous.

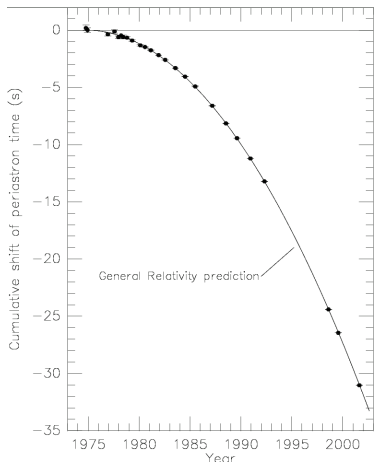
Image réalisée par T. Paumard (LESIA, Obs. Paris) (2014), via le logiciel de calcul de géodésiques **GYOTO**, à partir de la photo *Paris s'éveille* prise par A. Duret-Lutz

<http://gyoto.obspm.fr>

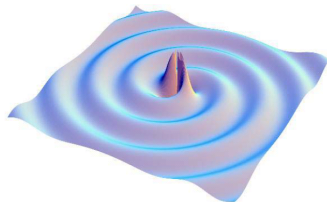
Cf. le concours photo **Pocket Black Hole**

Les ondes gravitationnelles existent !

Émission d'ondes gravitationnelles par le système binaire d'étoiles à neutrons PSR B1913+16 (*pulsar binaire*)



[Weisber & Taylor (2002)]

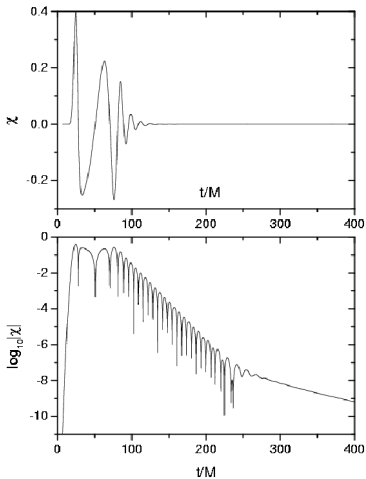


← Décroissance observée de la période orbitale $P = 7 \text{ h } 45 \text{ min}$ du pulsar binaire PSR B1913+16 sous l'effet de la *réaction au rayonnement gravitationnel*

⇒ coalescence dans 140 millions d'années.

Prix Nobel de Physique 1993
à R. Hulse & J. Taylor

Prédiction théorique : oscillations d'un trou noir



[Kokkotas & Schmidt, Liv. Rev. Relat. 2, 2 (1999)]

Trou noir hors d'équilibre :

- trou noir nouvellement formé : *cœur de supernova, fusion d'un système binaire d'objets compacts*
- trou noir excité par l'*absorption de matière* (étoile ou accréation de plasma)

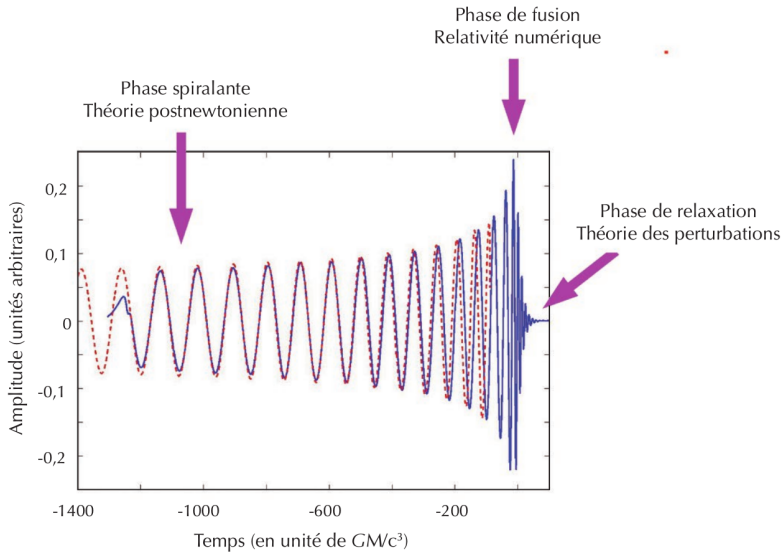
Désexcitation par **émission d'ondes gravitationnelles**

La détection de ces ondes permet la mesure de la masse M et du moment cinétique J du trou noir.

$$M = 10 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 1.2 \text{ kHz} & (\text{VIRGO}) \\ \tau = 0.55 \text{ ms} \end{cases}$$

$$M = 10^6 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 12 \text{ mHz} & (\text{LISA}) \\ \tau = 55 \text{ s} \end{cases}$$

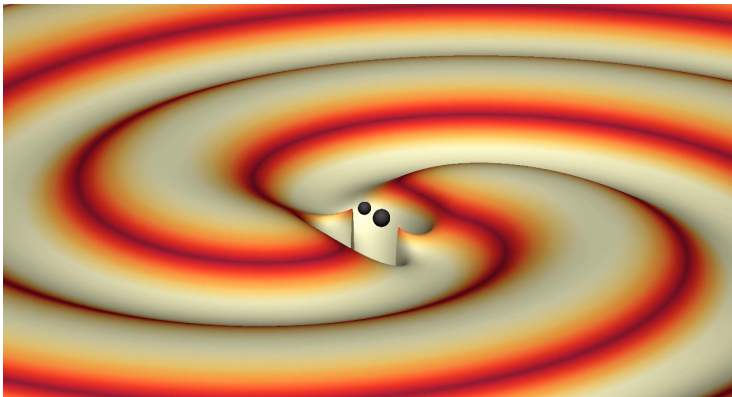
Prédiction théorique : fusion d'un système binaire



[L. Blanchet, *Reflète Phys.* 52, 6 (2017)]



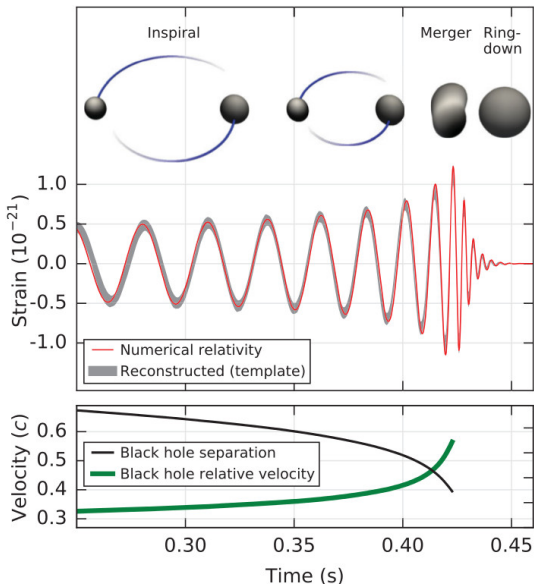
Fusion d'un système binaire de trous noirs



Simulation numérique réalisée en résolvant les équations d'Einstein par ordinateur

[SXS Project]

Les informations dans le signal GW150914



Signal :

$$\Delta t = 0.2 \text{ s}$$

$$f : 35 \rightarrow 250 \text{ Hz}$$

$$h_{\text{max}} = 1.0 \cdot 10^{-21}$$

Filtre adapté :

$$S/N = 24$$

$$F_{\text{f.al.}} = 1/203,000 \text{ yr}$$

$$M_1 = 36 \pm 5 M_{\odot}$$

$$M_2 = 29 \pm 4 M_{\odot}$$

$$d = 410 \pm 180 \text{ Mpc}$$

$$z = 0.09 \pm 0.04$$

$$M_{\text{final}} = 62 \pm 4 M_{\odot}$$

$$\Rightarrow E_{\text{rad}}^{\text{GW}} = 3.0 \pm 0.5 M_{\odot} c^2$$

$$a_1 < 0.7, a_2 < 0.9$$

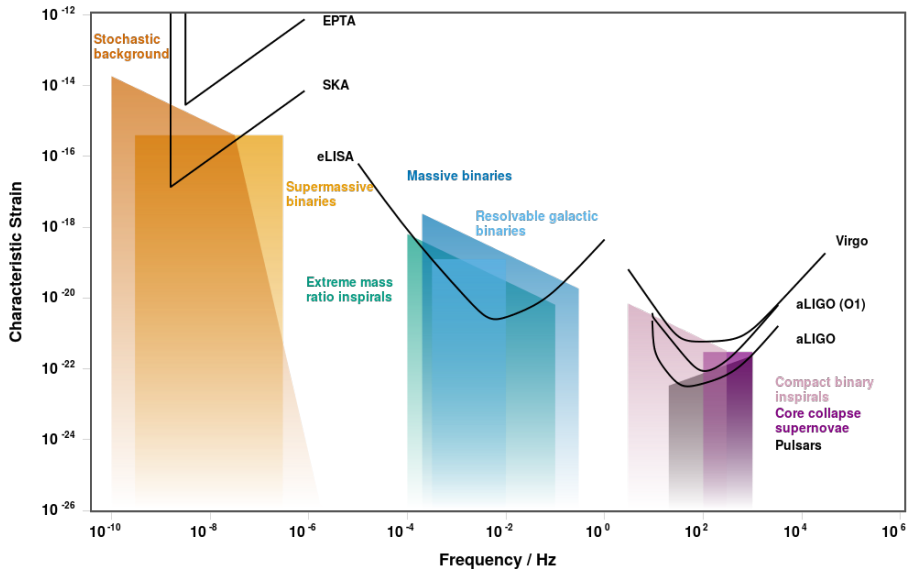
$$a_{\text{final}} = 0.67 \pm 0.07$$

[Abbott et al., PRL 116, 061102

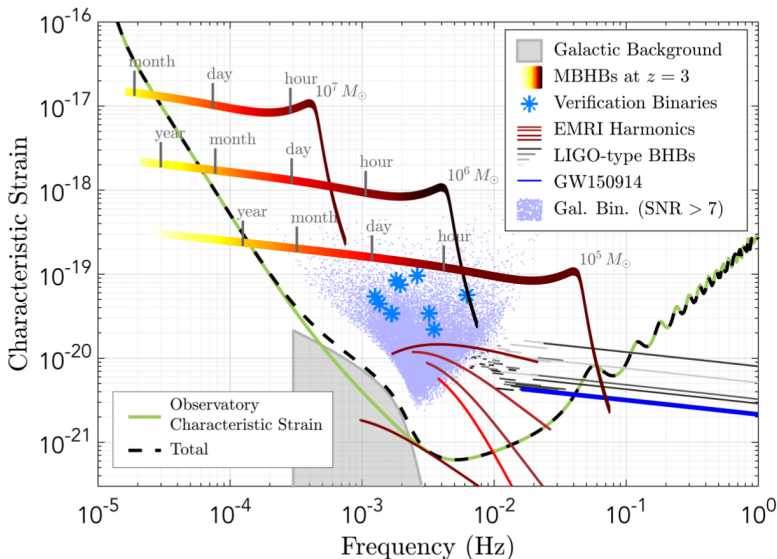
(2016)]



Astronomie gravitationnelle multi-bande

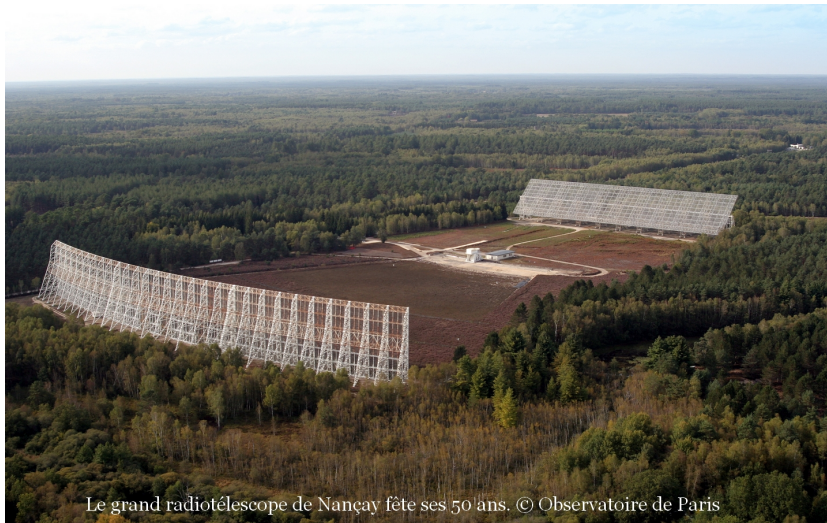


Sources dans la bande de LISA

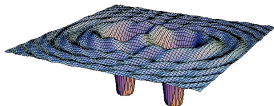


[K. Danzmann et al., LISA proposal (2017)]

Détecter les ondes gravitationnelles par le chronométrage des pulsars



Le grand radiotélescope de Nançay fête ses 50 ans. © Observatoire de Paris



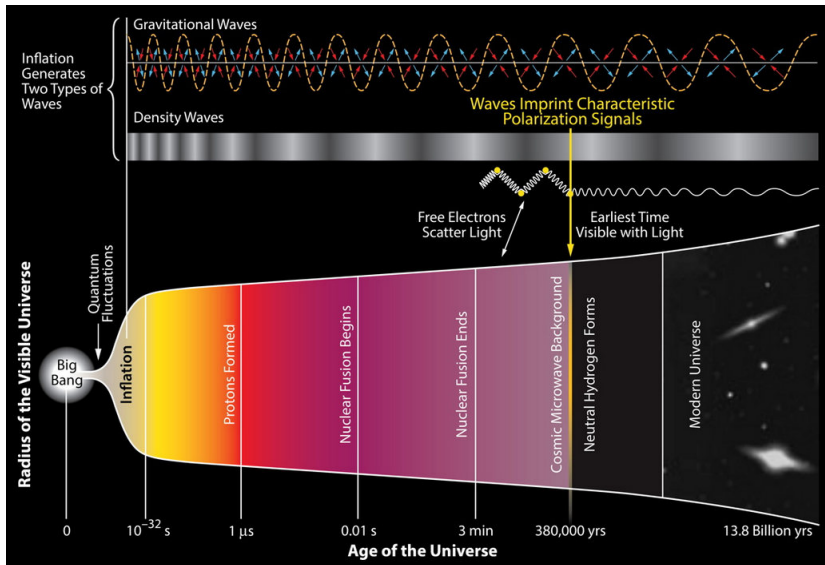
Intérêt théorique :

- trou noir binaire : le problème à deux corps par excellence de la relativité générale
- test de la relativité générale dans un régime dynamique et en champ fort

Intérêt astrophysique :

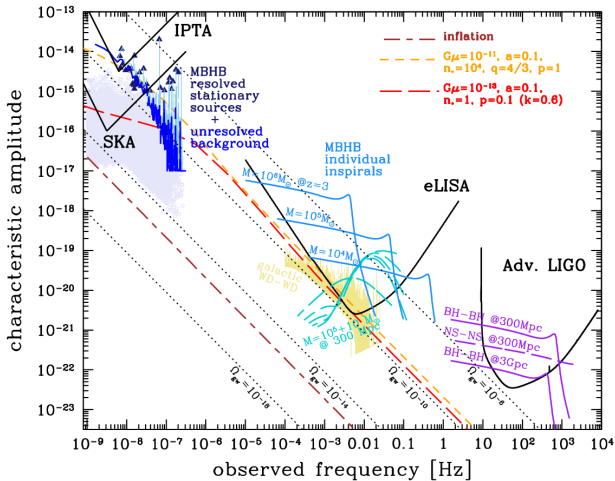
- taux de coalescences \implies évolution des étoiles massives
- signal gravitationnel de la phase spirale \implies mesure de la constante de Hubble H_0
- observations des trous noirs supermassifs à grand $z \implies$ formation des galaxies

Cosmologie et ondes gravitationnelles



[Source : BICEP2 Collaboration]

Fond cosmologique d'ondes gravitationnelles



[Janssen et al., arXiv:1501.00127 (2015)]

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**

Conclusions

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**
- Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers car elles constituent un **nouveau vecteur d'information**, aux côtés des

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**
- Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers car elles constituent un **nouveau vecteur d'information**, aux côtés des
 - ondes électromagnétiques (photons radio, IR, visible, UV, X, gamma)

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**
- Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers car elles constituent un **nouveau vecteur d'information**, aux côtés des
 - ondes électromagnétiques (photons radio, IR, visible, UV, X, gamma)
 - rayons cosmiques (protons, électrons, noyaux)

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**
- Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers car elles constituent un **nouveau vecteur d'information**, aux côtés des
 - ondes électromagnétiques (photons radio, IR, visible, UV, X, gamma)
 - rayons cosmiques (protons, électrons, noyaux)
 - neutrinos

- Les **ondes gravitationnelles** sont l'expression de la **nature dynamique** de l'**espace-temps relativiste**
- Détectées de manière directe pour la première fois en 2015, elles confirment la **relativité générale**
- Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers car elles constituent un **nouveau vecteur d'information**, aux côtés des
 - ondes électromagnétiques (photons radio, IR, visible, UV, X, gamma)
 - rayons cosmiques (protons, électrons, noyaux)
 - neutrinos
- Nul doute qu'elles vont nous apporter des informations étonnantes sur les **trous noirs**, les **étoiles à neutrons** ou l'**Univers primordial**

- P. Binétruy, 2016, *À la poursuite des ondes gravitationnelles* (2e éd.), Dunod
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- N. Deruelle, 2015, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin
- J.-P. Lasota, 2010, *La science des trous noirs*, Odile Jacob
- A. Riazuelo, 2016, *Les trous noirs : à la poursuite de l'invisible*, Vuibert
video : <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/vuibert>
- M. Smerlak, 2016, *Les trous noirs*, Que sais-je?, PUF
- P. Spagnou, 2017, *Les mystères du temps*, CNRS Éditions
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion

À propos de ce document

Cette présentation a été réalisée entièrement à l'aide de **logiciels libres** :



Linux

système d'exploitation (Ubuntu)



traitement de texte



Inkscape

dessin vectoriel

April : <https://www.april.org/>
Promouvoir et défendre le logiciel libre