



Conférence au Château d'Abbadia

Académie des Sciences

# LES ONDES GRAVITATIONNELLES: UNE NOUVELLE ASTRONOMIE

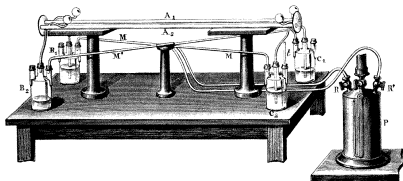
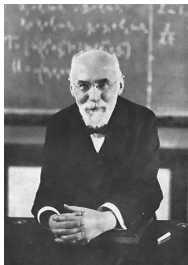
Luc Blanchet

Gravitation et Cosmologie ( $\mathcal{G}\mathcal{R}\mathcal{E}\mathcal{C}\mathcal{O}$ )  
Institut d'Astrophysique de Paris

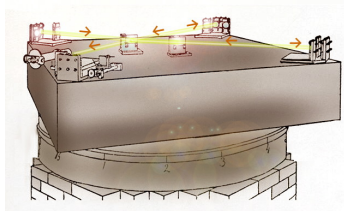
21 mars 2018

# Relativité restreinte et “ondes gravifiques”

[Lorentz 1904; Poincaré 1905; Einstein 1905]



[Fizeau 1851]



[Michelson & Morley 1887]

# La relativité générale [Einstein & Grossmann 1912; Einstein 1915; Hilbert 1915]

- Le champ gravitationnel est entièrement décrit par la métrique de l'espace-temps  $g_{\mu\nu}$

$$S_{\text{RG}} = \underbrace{\frac{c^3}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R}_{\text{champ gravitationnel}} + \underbrace{S_{\text{matière}}[g_{\mu\nu}, \rho, \mathbf{v}]}_{\text{champs de matière}}$$

- Dans la limite non-relativiste  $c \rightarrow +\infty$  la relativité générale se ramène à la théorie de Newton

$$\underbrace{\text{équation de Poisson}}_{\Delta U = -4\pi G \rho}$$

- La théorie prédit l'avance anormale observée du périhélie de la planète Mercure [Le Verrier 1859] et la déviation mesurée de la lumière par le Soleil [Eddington 1919]



# La relativité générale [Einstein & Grossmann 1912; Einstein 1915; Hilbert 1915]

- Le champ gravitationnel est entièrement décrit par la métrique de l'espace-temps  $g_{\mu\nu}$

$$S_{\text{RG}} = \underbrace{\frac{c^3}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R}_{\text{champ gravitationnel}} + \underbrace{S_{\text{matière}}[g_{\mu\nu}, \rho, \mathbf{v}]}_{\text{champs de matière}}$$

- Dans la limite non-relativiste  $c \rightarrow +\infty$  la relativité générale se ramène à la théorie de Newton

$$\underbrace{\Delta U}_{\text{équation de Poisson}} = -4\pi G \rho$$

- La théorie prédit l'avance anormale observée du périhélie de la planète Mercure [Le Verrier 1859] et la déviation mesurée de la lumière par le Soleil [Eddington 1919]



# La relativité générale [Einstein & Grossmann 1912; Einstein 1915; Hilbert 1915]

- Le champ gravitationnel est entièrement décrit par la métrique de l'espace-temps  $g_{\mu\nu}$

$$S_{\text{RG}} = \underbrace{\frac{c^3}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R}_{\text{champ gravitationnel}} + \underbrace{S_{\text{matière}}[g_{\mu\nu}, \rho, \mathbf{v}]}_{\text{champs de matière}}$$

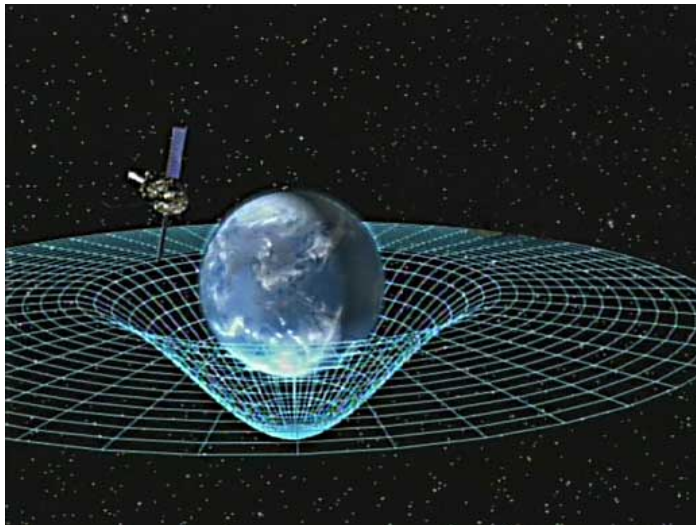
- Dans la limite non-relativiste  $c \rightarrow +\infty$  la relativité générale se ramène à la théorie de Newton

$$\underbrace{\Delta U = -4\pi G \rho}_{\text{équation de Poisson}}$$

- La théorie prédit l'avance anormale observée du périhélie de la planète Mercure [Le Verrier 1859] et la déviation mesurée de la lumière par le Soleil [Eddington 1919]



# La courbure riemannienne de l'espace-temps



[Riemann 1854]



[Gauss 1827]

## Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

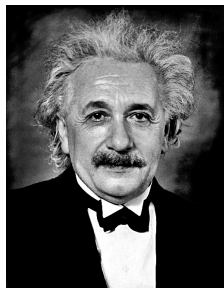
VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die  $g_{\mu\nu}$  in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable  $x_4 = it$  aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen  $\gamma_{\mu\nu}$ , welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist  $\delta_{\mu\mu} = 1$  bzw.  $\delta_{\mu\nu} = 0$ , je nachdem  $\mu = \nu$  oder  $\mu \neq \nu$ .

Wir werden zeigen, daß diese  $\gamma_{\mu\nu}$  in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik.



⇐ petite perturbation de la métrique de Minkowski

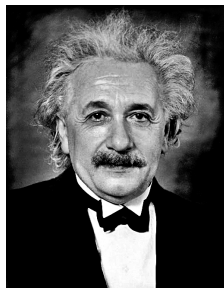
# 100 ans de rayonnement gravitationnel [Einstein 1916]

348 DOC. 32 INTEGRATION OF FIELD EQUATIONS

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

## Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.



Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die  $g_{\mu\nu}$  in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable  $x_4 = it$  aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen  $\gamma_{\mu\nu}$ , welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist  $\delta_{\mu\nu} = 1$  bzw.  $\delta_{\mu\nu} = 0$ , je nachdem  $\mu = \nu$  oder  $\mu \neq \nu$ .

Wir werden zeigen, daß diese  $\gamma_{\mu\nu}$  in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik.

⇐ petite perturbation de la métrique de Minkowski

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



# La formule du quadrupôle d'Einstein [1918]

$$4\pi R^2 \bar{G} = \frac{\kappa}{40\pi} \left[ \sum_{\mu\nu} \ddot{J}_{\mu\nu}^2 - \frac{1}{3} \left( \sum_{\mu} \ddot{J}_{\mu\mu} \right)^2 \right].$$

- Formule du quadrupôle d'Einstein

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)^{\text{OG}} = -\frac{G}{5c^5} \left\{ \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} + \mathcal{O} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right\}$$

- Formule du quadrupôle pour l'amplitude de l'onde gravitationnelle

$$h_{ij}^{\text{TT}} = \frac{2G}{c^4 r} \left\{ \frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2} \left( t - \frac{r}{c} \right) + \mathcal{O} \left( \frac{v}{c} \right) \right\}^{\text{TT}} + \mathcal{O} \left( \frac{1}{r^2} \right)$$

## La formule du quadrupôle d'Einstein [1918]

$$4\pi R^2 \bar{G} = \frac{\kappa}{40\pi} \left[ \sum_{\mu\nu} \ddot{J}_{\mu\nu}^2 - \frac{1}{3} \left( \sum_{\mu} \ddot{J}_{\mu\mu} \right)^2 \right].$$

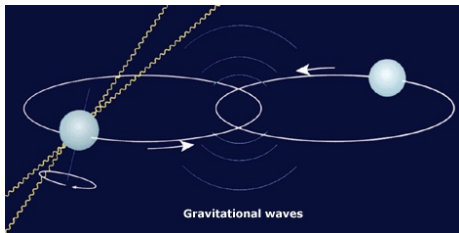
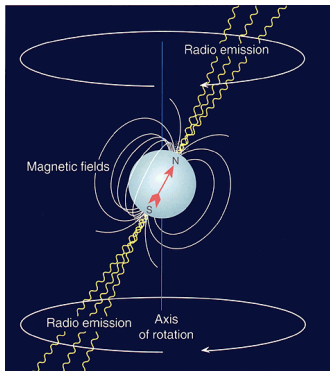
- Formule du quadrupôle d'Einstein

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)^{\text{OG}} = -\frac{G}{5c^5} \left\{ \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} + \mathcal{O} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right\}$$

- Formule du quadrupôle pour l'amplitude de l'onde gravitationnelle

$$h_{ij}^{\text{TT}} = \frac{2G}{c^4 r} \left\{ \frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2} \left( t - \frac{r}{c} \right) + \mathcal{O} \left( \frac{v}{c} \right) \right\}^{\text{TT}} + \mathcal{O} \left( \frac{1}{r^2} \right)$$

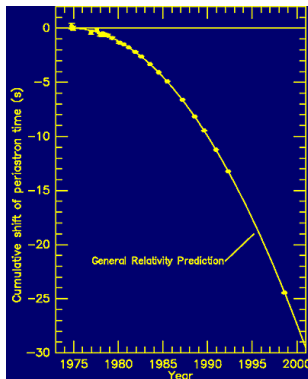
# Le pulsar binaire PSR 1913+16 [Hulse & Taylor 1974]



- Le pulsar est une étoile à neutrons fortement magnétisée en rotation rapide qui émet comme un phare des impulsions radio en direction de la Terre
- Ce pulsar est en orbite rapprochée (quasi-)keplerienne autour d'un compagnon invisible, probablement une autre étoile à neutrons

# La formule du quadrupôle marche !

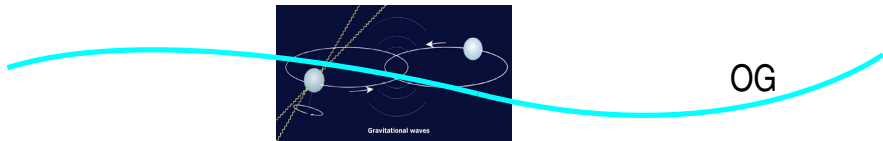
[Taylor & Weisberg 1982]



$$\dot{P} = -\frac{192\pi}{5c^5} \nu \left( \frac{2\pi G M}{P} \right)^{5/3} \frac{1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4}{(1 - e^2)^{7/2}} \approx -2.4 \times 10^{-12}$$

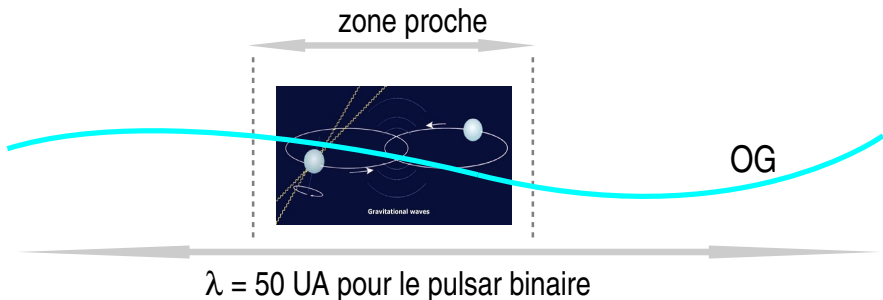
[Peters & Mathews 1963; Esposito & Harrison 1975; Wagoner 1975; Damour & Deruelle 1983]

# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle?



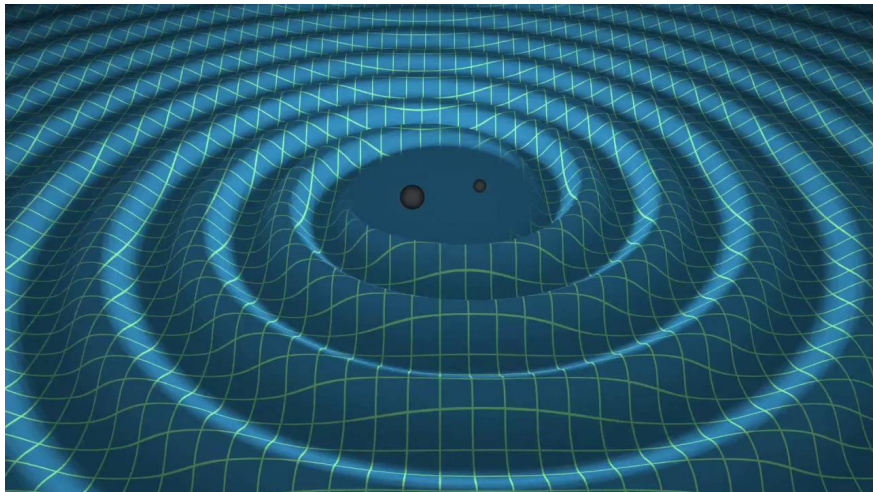
- Les ondes gravitationnelles sont produites par le **mouvement d'ensemble de grandes masses** ( $M \sim M_{\odot}$ ) à des **vitesse relativistes** ( $v \sim c$ )
- Elles se propagent à la vitesse de la lumière dans le vide mais possèdent une **analogie profonde avec les ondes sonores**

# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle?



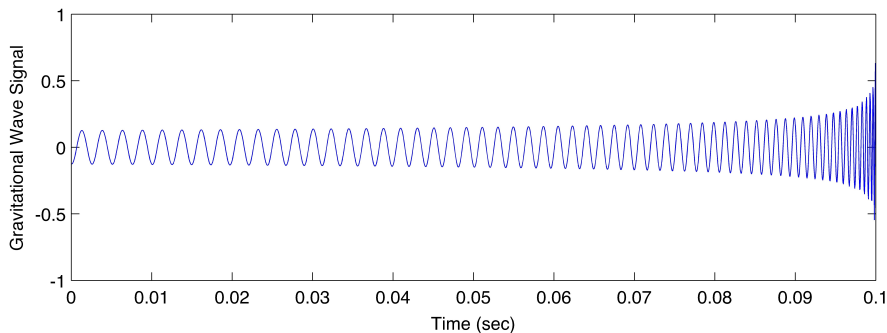
- Les ondes gravitationnelles sont produites par le **mouvement d'ensemble de grandes masses** ( $M \sim M_{\odot}$ ) à des **vitesse relativistes** ( $v \sim c$ )
- Elles se propagent à la vitesse de la lumière dans le vide mais possèdent une **analogie profonde avec les ondes sonores**

# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle?



L'onde gravitationnelle est une **déformation de la surface de l'espace-temps** se propageant à la vitesse de la lumière  $c$

# Gazouillement gravitationnel des systèmes binaires

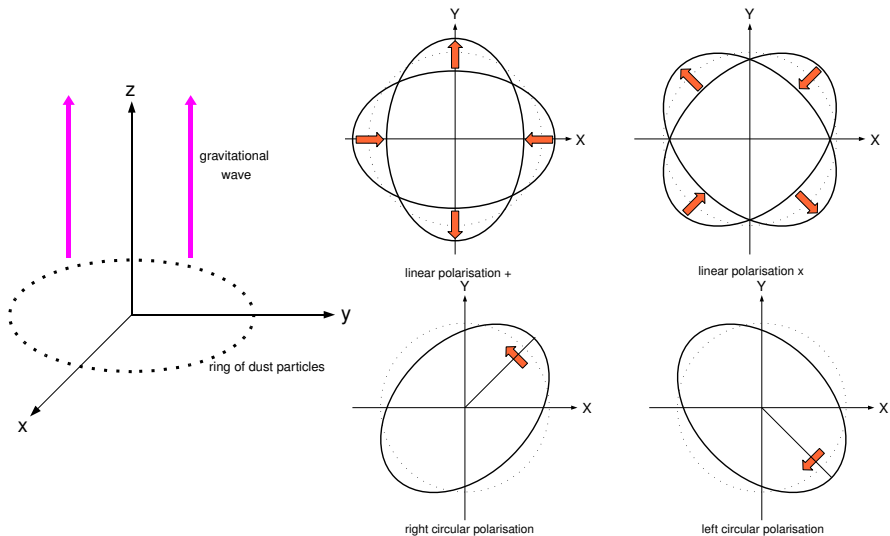


$h(t)$  = amplitude de la déformation de l'espace-temps

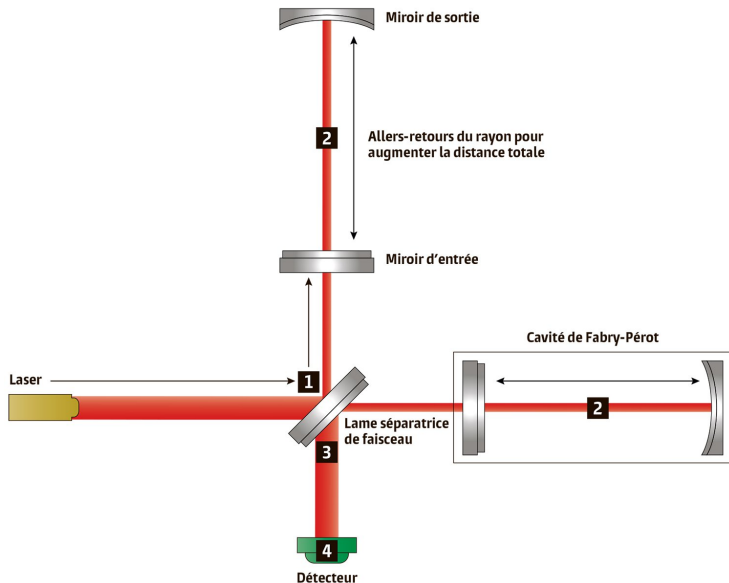
$$\boxed{\frac{h}{2} \sim \frac{\delta L}{L}}$$



# Effet de l'onde gravitationnelle sur la matière



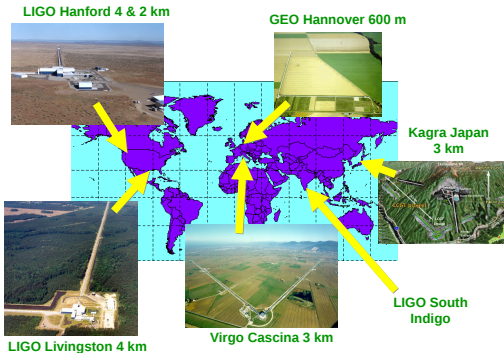
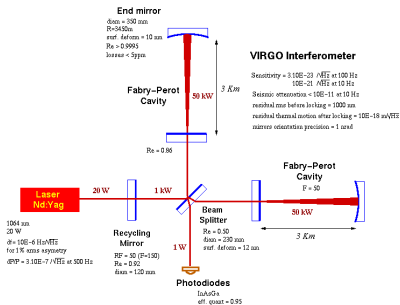
# Principe du détecteur d'OG à interférométrie laser



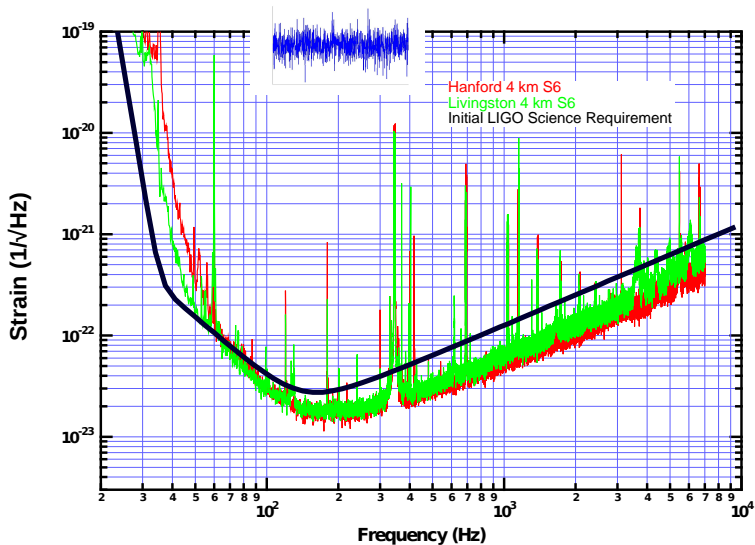
# Réseau de détecteurs interférométriques géants



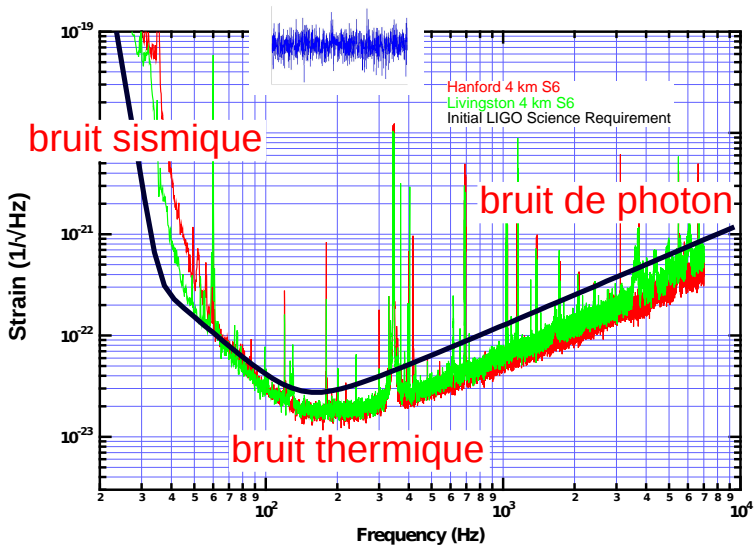
[Rainer Weiss, Barry Barish & Kip Thorne, prix Nobel 2017]



# Courbe de bruit dans les détecteurs LIGO/Virgo



# Courbe de bruit dans les détecteurs LIGO/Virgo



# Un défi expérimental et technologique

- Le déplacement des miroirs par rapport à la séparatrice est

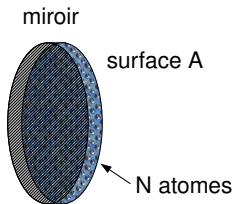
$$\frac{\delta L}{L} \sim \frac{h}{2}$$

avec  $L = 3$  km pour Virgo

- Pour un système binaire à une distance de  $\sim 100$  Mpc on a  $h \sim 10^{-21}$

$$\delta L \sim 10^{-18} \text{ m} = 10^{-3} \text{ fermi!}$$

Comment peut-on détecter un déplacement aussi faible?

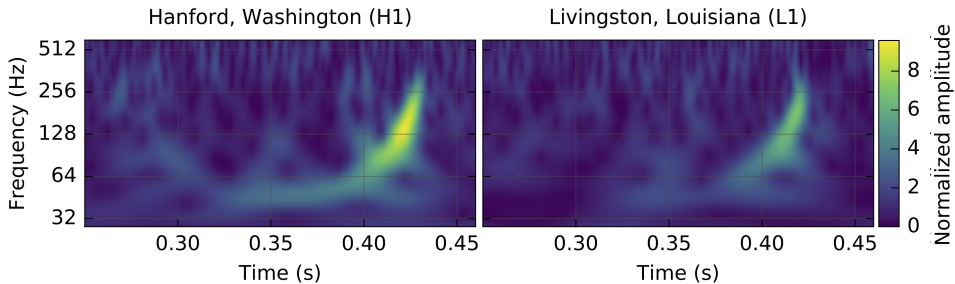


On mesure le **déplacement collectif de  $N$  atomes** d'une couche atomique sur la surface  $A$  du miroir

$$N \sim 10^{18} \implies \delta L_{\text{eff}} \sim \sqrt{N} \delta L \sim 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$$

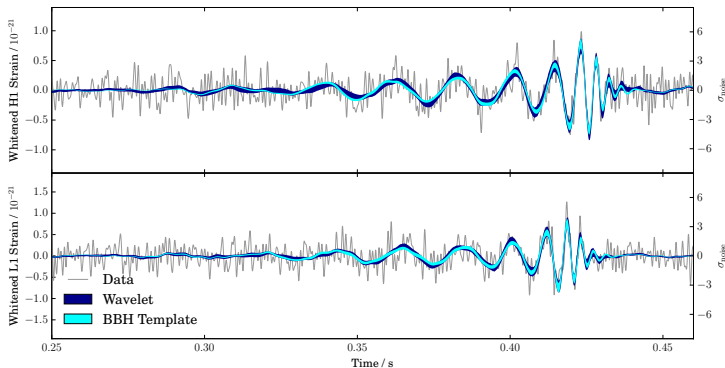
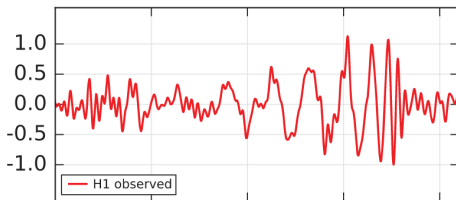
(ordre de grandeur des distances inter-atomiques)

# L'évènement du 14 septembre 2015 [LIGO/Virgo 2016]



# L'évènement du 14 septembre 2015 [LIGO/Virgo 2016]

Hanford, Washington (H1)





# La formule du quadrupôle marche encore !

- ① La fréquence de l'OG est donnée en fonction de  $\mathcal{M} = \mu^{3/5} M^{2/5}$

$$f = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{256 G \mathcal{M}^{5/3}}{5 c^5} (t_f - t) \right]^{-3/8}$$

- ② Donc cette masse est directement mesurée

$$\mathcal{M} = \left[ \frac{5 c^5}{96 G \pi^{8/3}} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

ce qui donne  $\mathcal{M} = 30 M_\odot$  donc  $M \geq 70 M_\odot$

- ③ L'amplitude de l'OG est prédite à

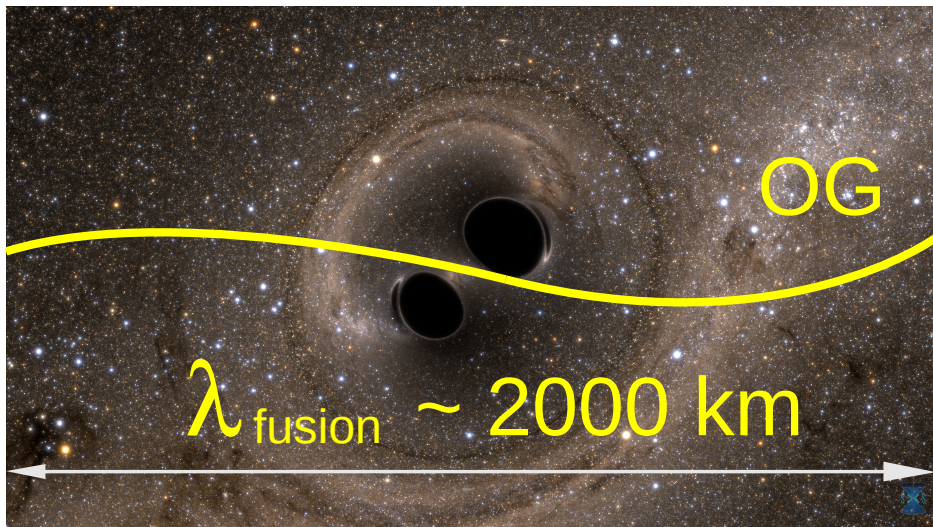
$$h_{\text{eff}} \sim 4.1 \times 10^{-22} \left( \frac{\mathcal{M}}{M_\odot} \right)^{5/6} \left( \frac{100 \text{ Mpc}}{r} \right) \left( \frac{100 \text{ Hz}}{f_{\text{merger}}} \right)^{-1/6} \sim 1.6 \times 10^{-21}$$

- ④ La distance  $r = 400 \text{ Mpc}$  est mesurée avec le signal lui-même

# Simulation numérique de la coalescence des TN



# Simulation numérique de la coalescence des TN



# Energie gravitationnelle totale émise

- ① L'énergie totale de l'espace-temps est constante

$$E = (m_1 + m_2)c^2 - \frac{Gm_1m_2}{2r} + \frac{G}{5c^5} \int_{-\infty}^t dt' (Q_{ij}^{(3)})^2(t')$$

- ② Initialement  $E = (m_1 + m_2)c^2$  alors que finalement (à l'instant  $t_f$ )

$$E = M_f c^2 + \frac{G}{5c^5} \int_{-\infty}^{t_f} dt' (Q_{ij}^{(3)})^2(t')$$

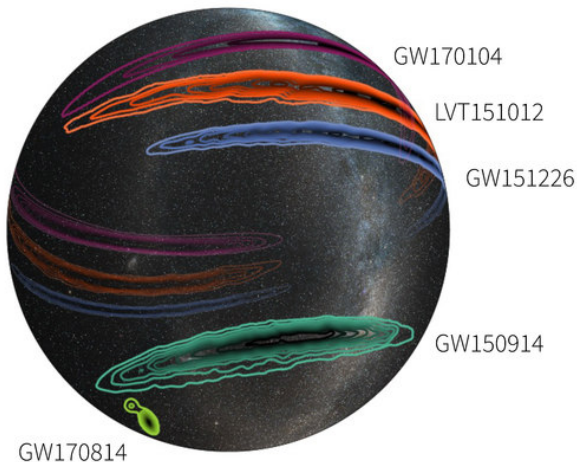
- ③ L'énergie totale émise en OG est donc

$$\Delta E^{\text{OG}} = (m_1 + m_2 - M_f)c^2 = \frac{G}{5c^5} \int_{-\infty}^{t_f} dt' (Q_{ij}^{(3)})^2(t') = \frac{Gm_1m_2}{2r_f}$$

- ④ La puissance totale associée est

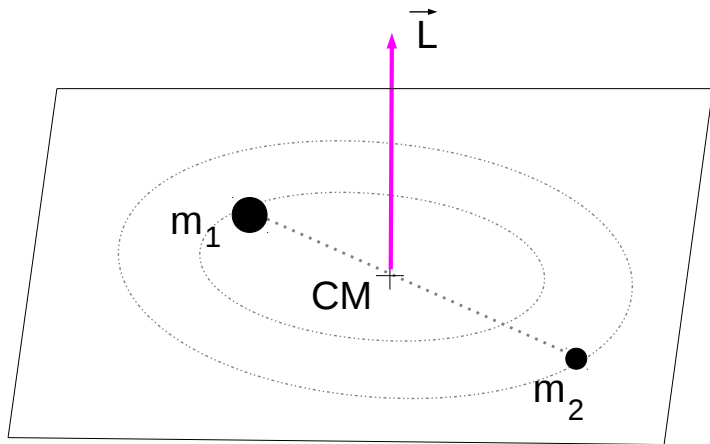
$$P^{\text{OG}} \sim \frac{3M_{\odot}c^2}{0.2\text{ s}} \sim 10^{49}\text{ W} \sim 10^{-3} \frac{c^5}{G}$$

# Localisation des événements dans le ciel [LIGO/Virgo 2017]

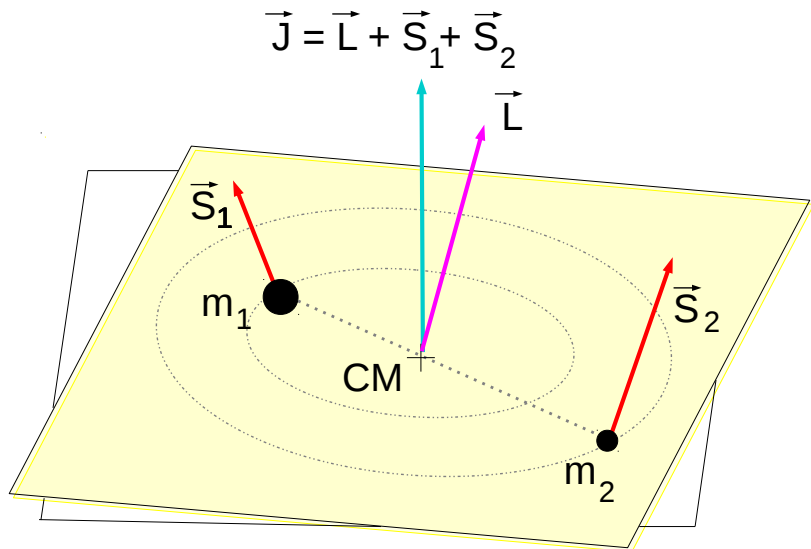


Pour GW170814 la région de localisation (90% de confiance) est de **1160 deg<sup>2</sup>** avec les deux détecteurs LIGO et **60 deg<sup>2</sup>** avec les trois détecteurs LIGO & Virgo

# Théorie des systèmes binaires d'objets compacts

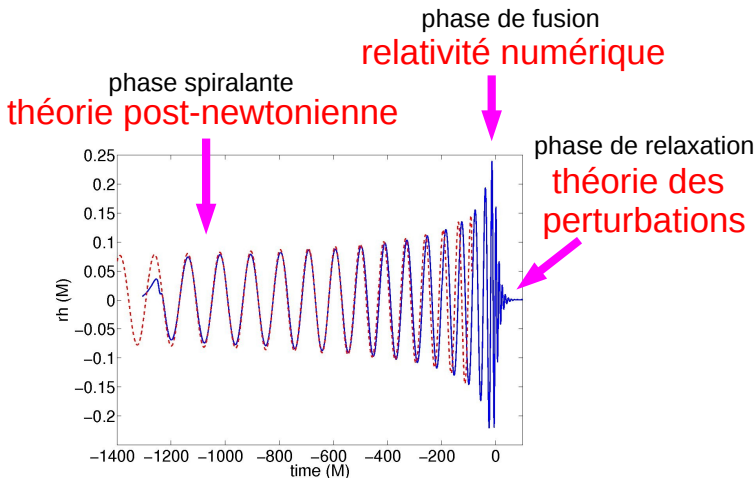


# Théorie des systèmes binaires d'objets compacts



# Le patron d'OG des systèmes binaires compactes

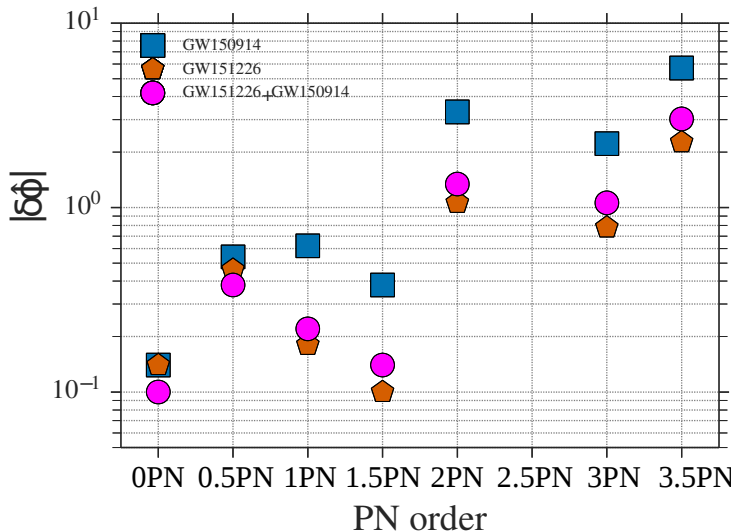
[Blanchet 1995; Buonanno & Damour 1998; Pretorius 2005]



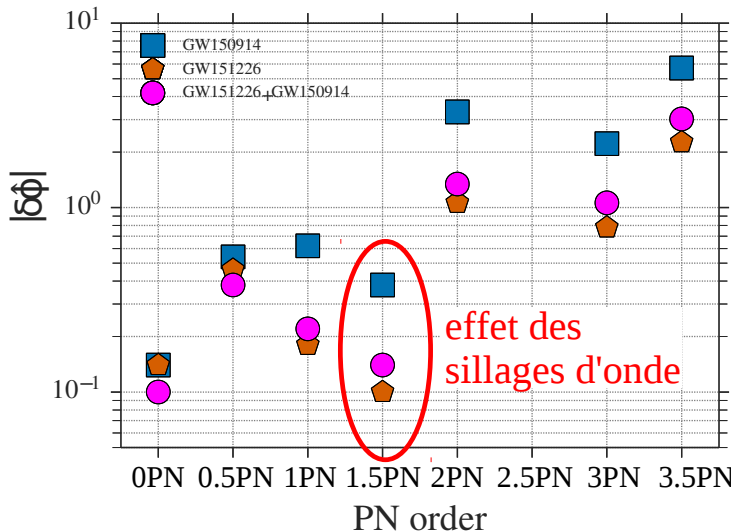
Aucune déviation par rapport à la relativité générale n'a été observée



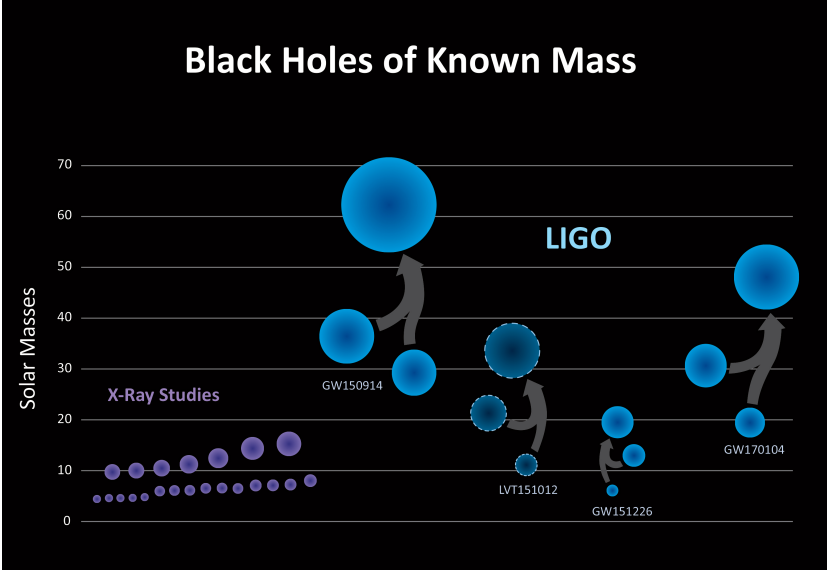
# Mesure des paramètres post-newtoniens [LIGO/VIRGO 2016]



# Mesure d'un effet non-linéaire [Blanchet & Sathyaprakash 1994, 1995]

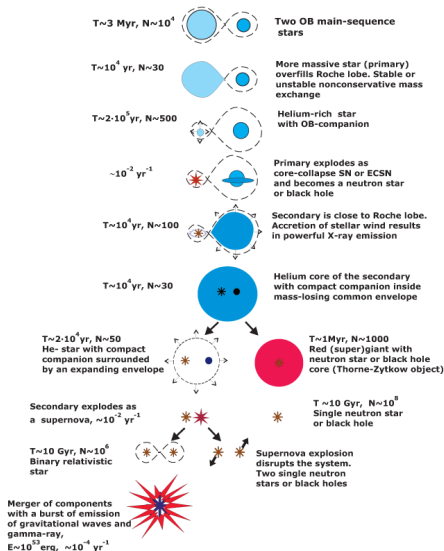


# D'énormes masses de trous noirs stellaires [LIGO/Virgo 2016]

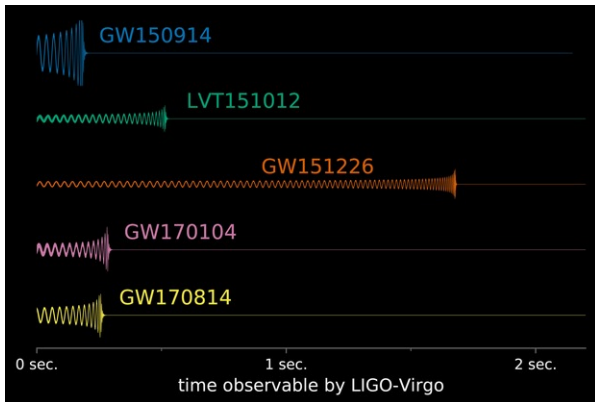


# Scénario de formation des trous noirs binaires

[Postnov & Yungelson 2006; Belczynski *et al.* 2014]

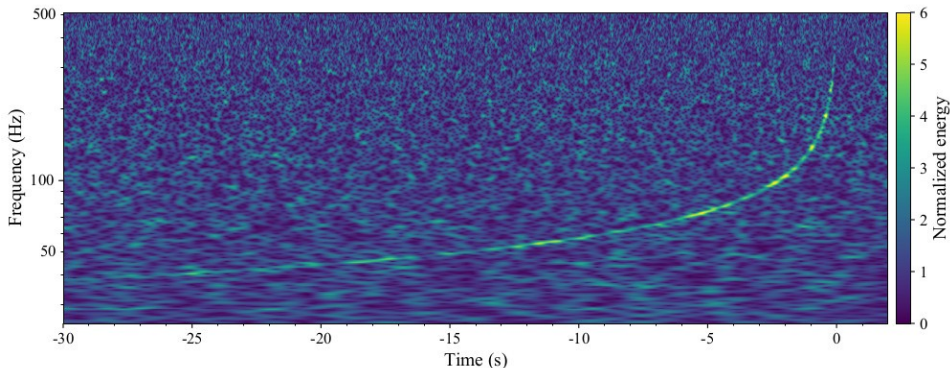


# Nombre de cycles observables [LIGO/Virgo 2016, 2017]



- Pour des trous noirs binaires les détecteurs sont surtout sensibles à la phase de fusion and **quelques cycles orbitaux sont observés** avant la coalescence
- Pour des binaires d'étoiles à neutrons les détecteurs sont sensibles à la phase spiralante et **des milliers de cycles orbitaux** sont observables

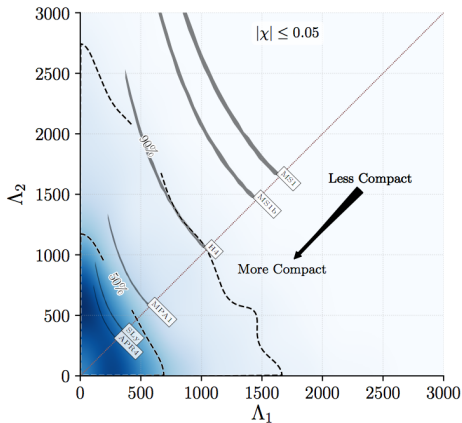
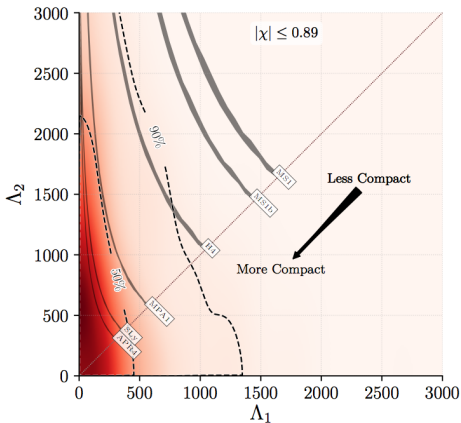
# L'événement de fusion d'étoiles à neutrons [LIGO/Virgo 2017]



- Le signal est observé pendant  $\sim 100$  s et  $\sim 3000$  cycles et est le **plus fort signal gravitationnel observé** avec un rapport signal-à-bruit combiné de 32,4
- La masse de gazouillement est mesurée à  $\mathcal{M} = \mu^{3/5} M^{2/5} = 1.18 M_{\odot}$
- La distance est évaluée à  $r = 40$  Mpc

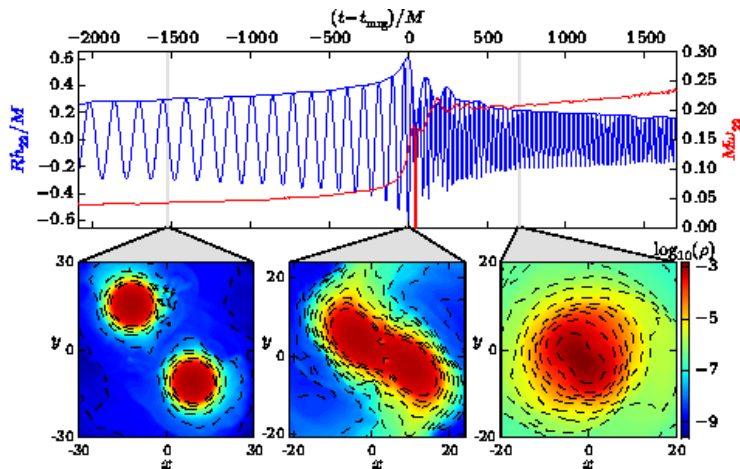
# Contraindre l'équation d'état des étoiles à neutrons

[LIGO/Virgo 2017]



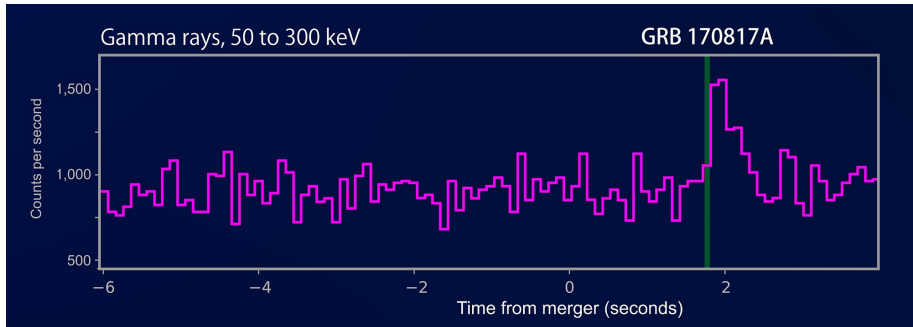
# La phase post-fusion des étoiles à neutrons

[Shibata *et al.*, Rezzolla *et al.* 1990-2010s]



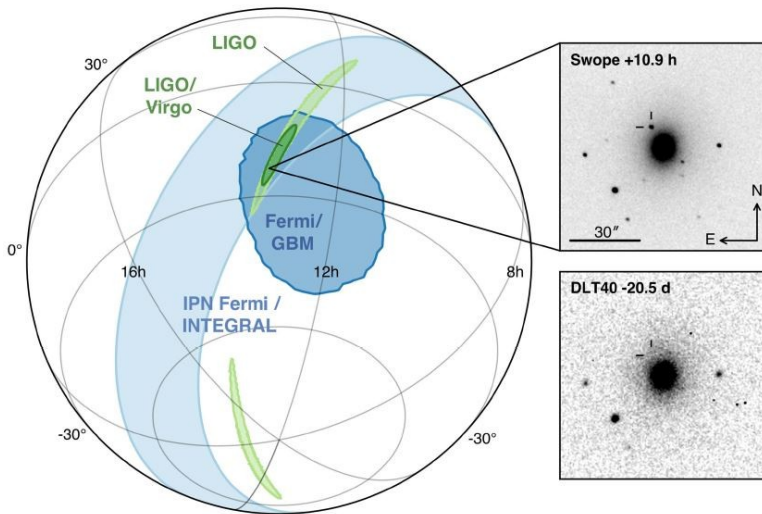


# Découverte d'un sursaut gamma [Fermi/GBM, INTEGRAL/SPI-ACS, etc.]



Le sursaut électromagnétique gamma a été détecté **1.7 seconde** après l'instant de **coalescence** des étoiles à neutrons, défini par le signal gravitationnel

# Découverte d'une kilonova en optique [Swope, DLT40, VISTA, etc.]

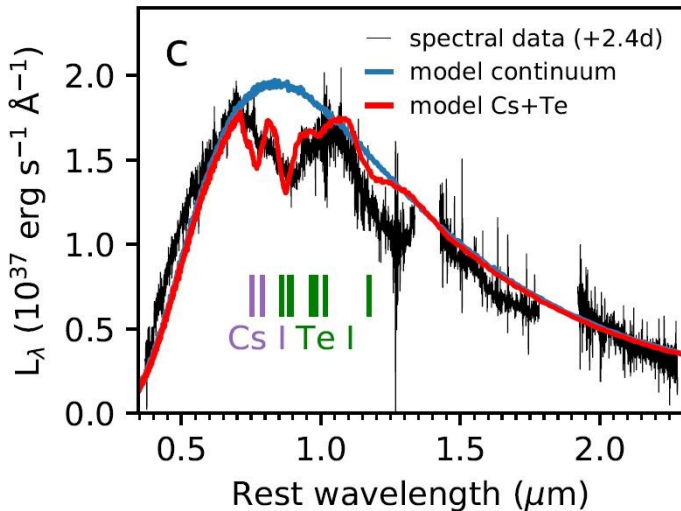


# L'explosion de la kilonova

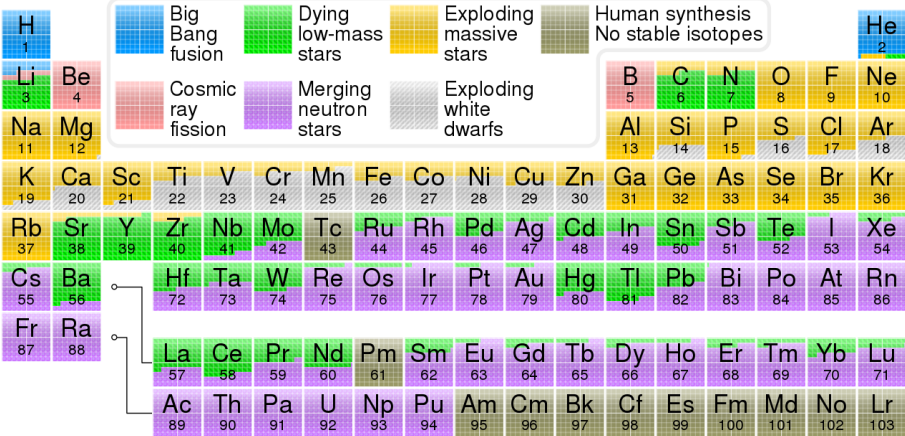
ESO



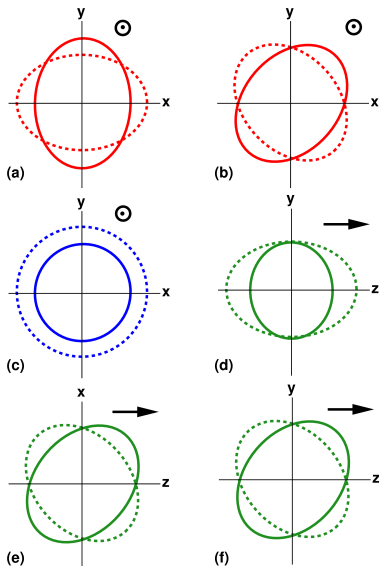
# Production d'éléments lourds [Smartt et al 2017]



# L'origine des éléments dans l'Univers

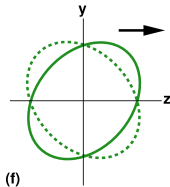
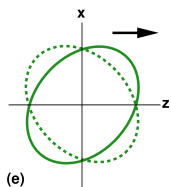
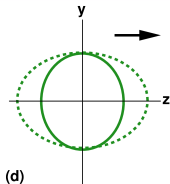
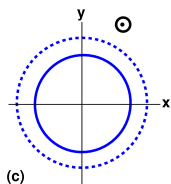
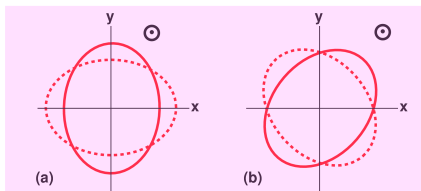


# Tester les théories alternatives de la gravitation



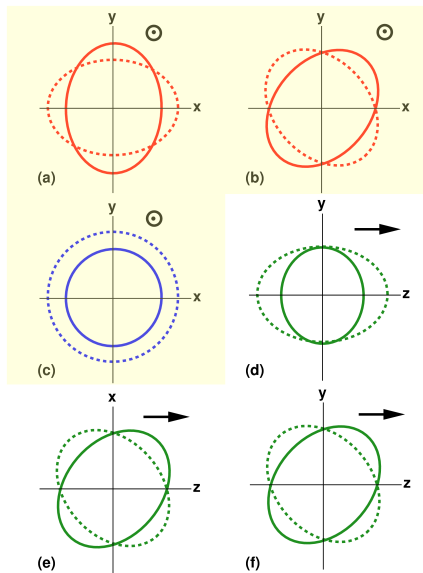
- Relativité générale
- Théorie tenseur-scalaire
- Théorie de gravité massive

# Tester les théories alternatives de la gravitation



- Relativité générale
- Théorie tenseur-scalaire
- Théorie de gravité massive

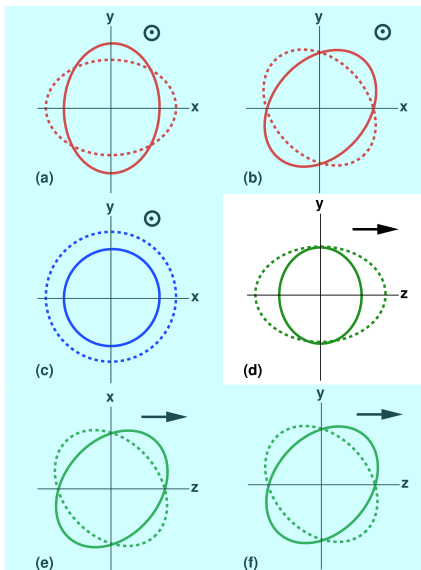
# Tester les théories alternatives de la gravitation



- Relativité générale
- Théorie tenseur-scalaire
- Théorie de gravité massive

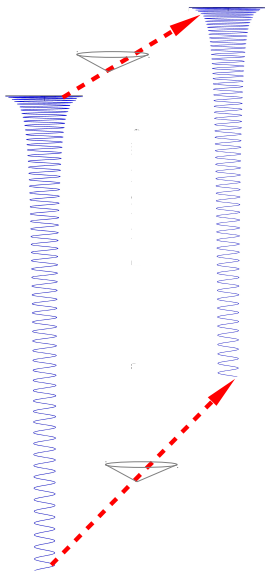


# Tester les théories alternatives de la gravitation



- Relativité générale
- Théorie tenseur-scalaire
- Théorie de gravité massive

# Mesurer la masse du graviton [Will 1998]



- Relation de dispersion du graviton massif

$$\frac{v_g^2}{c^2} = 1 - \frac{m_g^2 c^4}{E_g^2}$$

- Energie du graviton  $E_g = \hbar\omega$
- La fréquence des OG varie au cours du spiralement et la vitesse des OG augmente entre le début du spiralement et la fusion ce qui crée une distortion du signal par rapport à la prédiction de la RG
- La contrainte mesurée est [LIGO/Virgo 2016]

$$m_g \lesssim 10^{-22} \text{ eV}$$

# Contraindre les théories d'énergie noire [Creminelli & Vernizzi 2017]

- 1 La différence des temps d'arrivée entre GW170817 et GRB impose

$$|c_g - c_{em}| \lesssim 10^{-15} c$$

- 2 Classe des modèles d'énergie noire et de gravité modifiée caractérisés par un champ scalaire supplémentaire (théorie d'Horndeski)

$$\begin{aligned} L = & G_2(\phi, X) + G_3(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi, X)R \\ & - 2G_{4,X}(\phi, X) (\square\phi^2 - \phi^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu}) + G_5(\phi, X)E^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu} \\ & + \frac{1}{3}G_{5,X}(\phi, X) (\square\phi^3 - 3\square\phi\phi^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu} + 2\phi^{\mu\nu}\phi_{\mu\rho}\phi_{\nu}^{\rho}) \end{aligned}$$

- 3 Imposer que la vitesse des OG est égale à la vitesse des ondes EM réduit considérablement l'espace des théories permises

$$L_{c_g=c_{em}} = G_2(\phi, X) + G_3(\phi, X)\square\phi + B_4(\phi)R$$

# Avancées spectaculaires de l'astronomie des OG

## COTÉ ASTROPHYSIQUE

- Mise en évidence directe de l'existence des trous noirs
- Preuve que le moteur central des sursauts gamma courts est la coalescence d'étoiles à neutrons
- Évidence qu'une contribution importante à la production des éléments lourds dans l'Univers vient des coalescences d'étoiles à neutrons
- Contraintes sur l'équation d'état de la matière nucléaire à l'intérieur des étoiles à neutrons
- Mesure indépendante du paramètre de Hubble

## COTÉ PHYSIQUE THÉORIQUE

- Confirmation de la relativité générale dans un régime de champs forts
- Confirmation de la nature quadrupolaire des ondes gravitationnelles
- Évidence que les OG se propagent à la vitesse de la lumière
- Contrainte sur la masse du graviton et les théories alternatives
- Test nouveau du principe d'équivalence