



Observatoire  
de la CÔTE d'AZUR



# OBSERVATION D'ONDES GRAVITATIONNELLES DE LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS

---

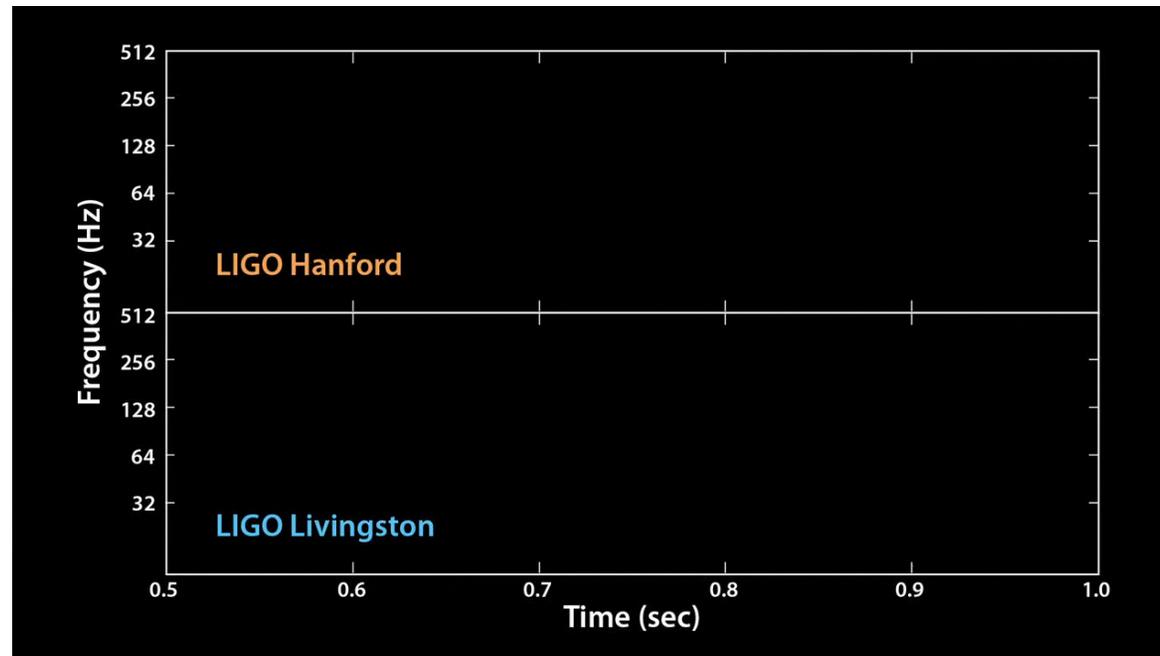
Tania Regimbau

pour la Collaboration Scientifique LIGO et la Collaboration Virgo

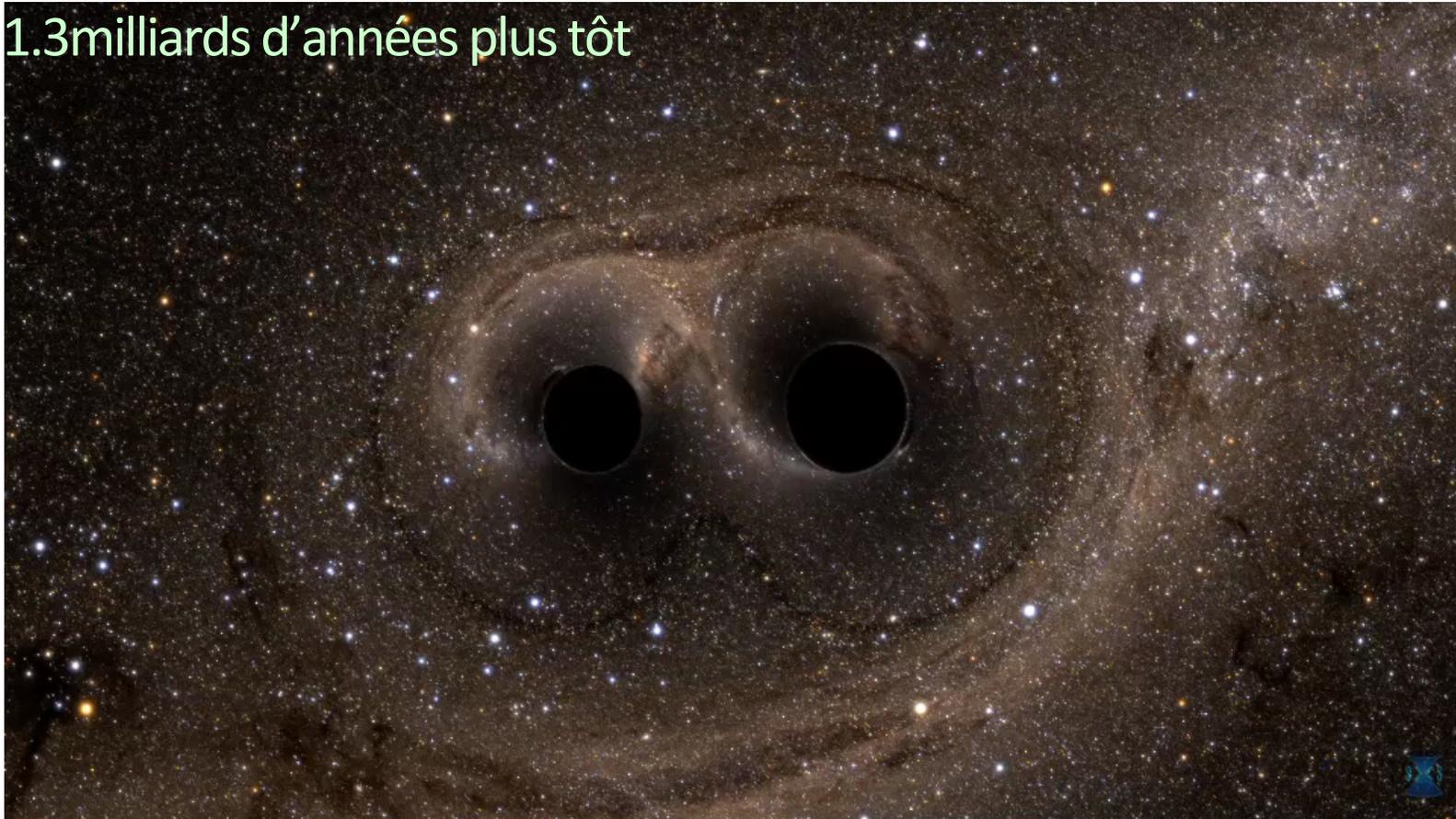
SF2A, LYON, 14/06/2016

# Nous avons détecté des Ondes Gravitationnelles !!

14 Septembre 2015 à 09:50:45 UTC



1.3milliards d'années plus tôt

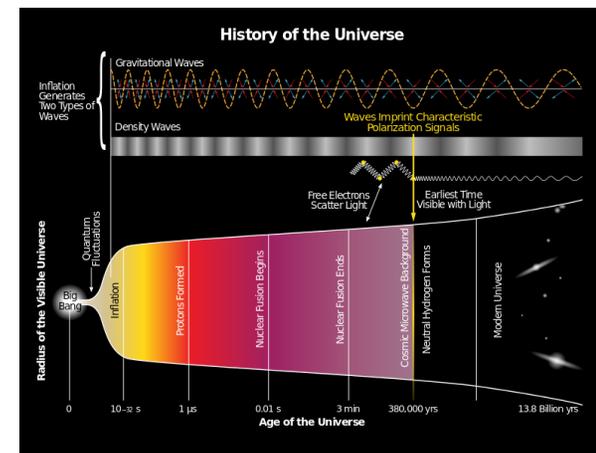


# Plan

- Introduction générale sur l'astronomie gravitationnelle
- La première détection de la fusion de deux trous noirs
- Implications en astronomie, cosmologie et physique fondamentale
- Et ensuite?

# L'Univers observé

- Presque tout ce que l'on connaît de l'Univers nous vient des ondes électromagnétiques.
- L'Univers observé représente une faible fraction de son contenu (matière noire, énergie noire)
- Le fond diffus cosmologique 300,000 ans après le big bang marque la frontière de l'Univers observé.
- Aujourd'hui une nouvelle fenêtre vient de s'ouvrir avec les ondes gravitationnelles !



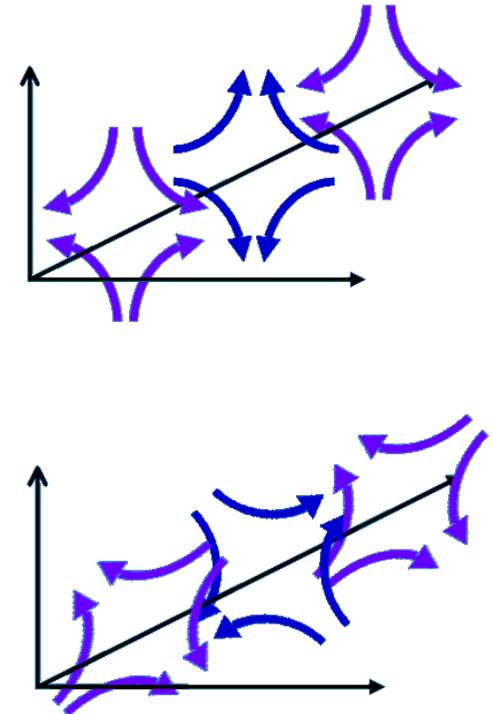
# Astronomie des ondes gravitationnelles

- Les OG sont des perturbations de l'espace-temps créées par l'accélération non symétrique de masses ou par des champs non stationnaires.
- Les OG sont produites dans des conditions extrêmes de vitesse et de compacité (étoiles à neutrons, trous noirs)
- Les OG se propagent à la vitesse de la lumière. Interaction faible avec la matière.
- Le pulsar binaire découvert par Hulse et Taylor en 1974 est la première preuve de l'existence des OG (Taylor et Weisberg).
- Le 16 Septembre 2015, première détection "directe" par Adv LIGO.

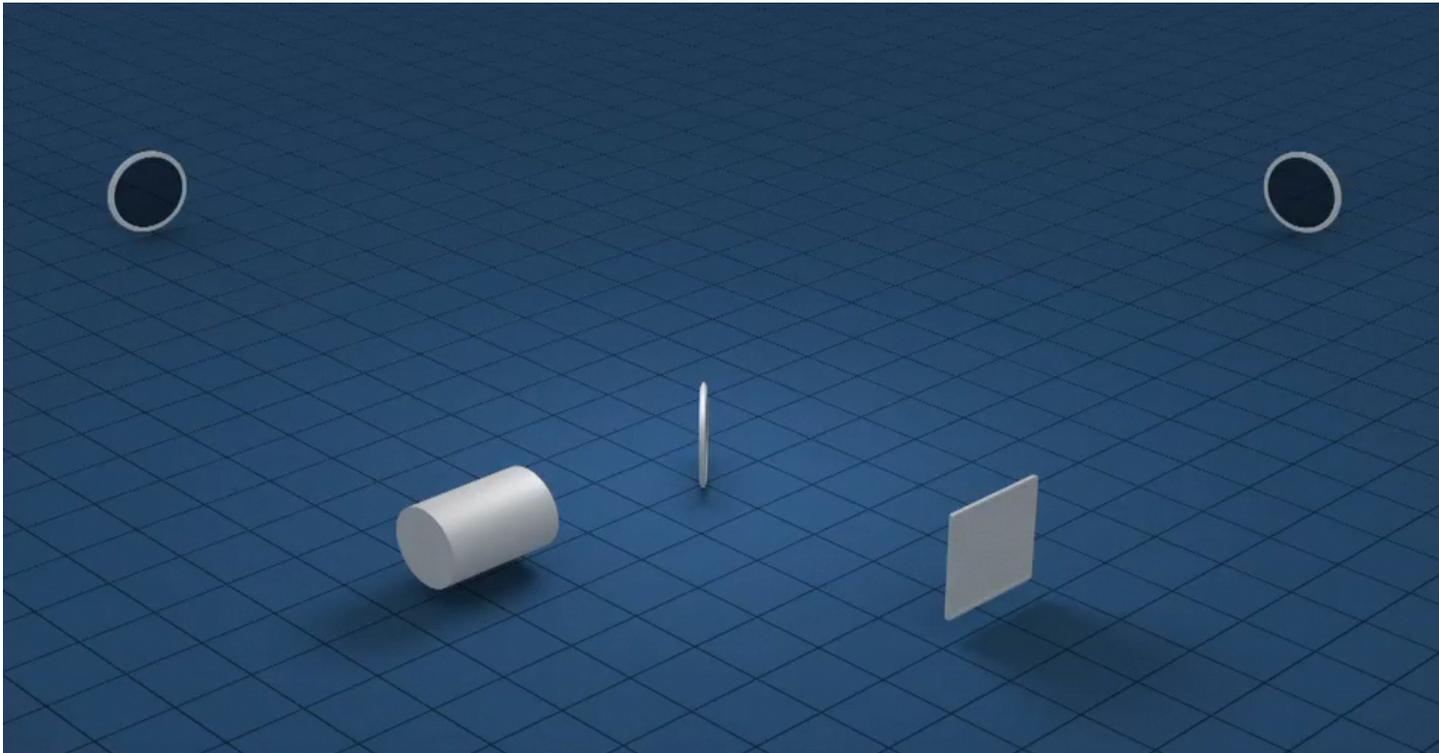
## Effets des ondes gravitationnelles

- Les OG modifient la structure de l'espace-temps.
- Une OG passant entre deux masses change la distance entre elles.
- En alternance, il y a contraction et élongation dans des directions perpendiculaires.
- Fusion de deux étoiles à neutrons dans l'amas de Virgo

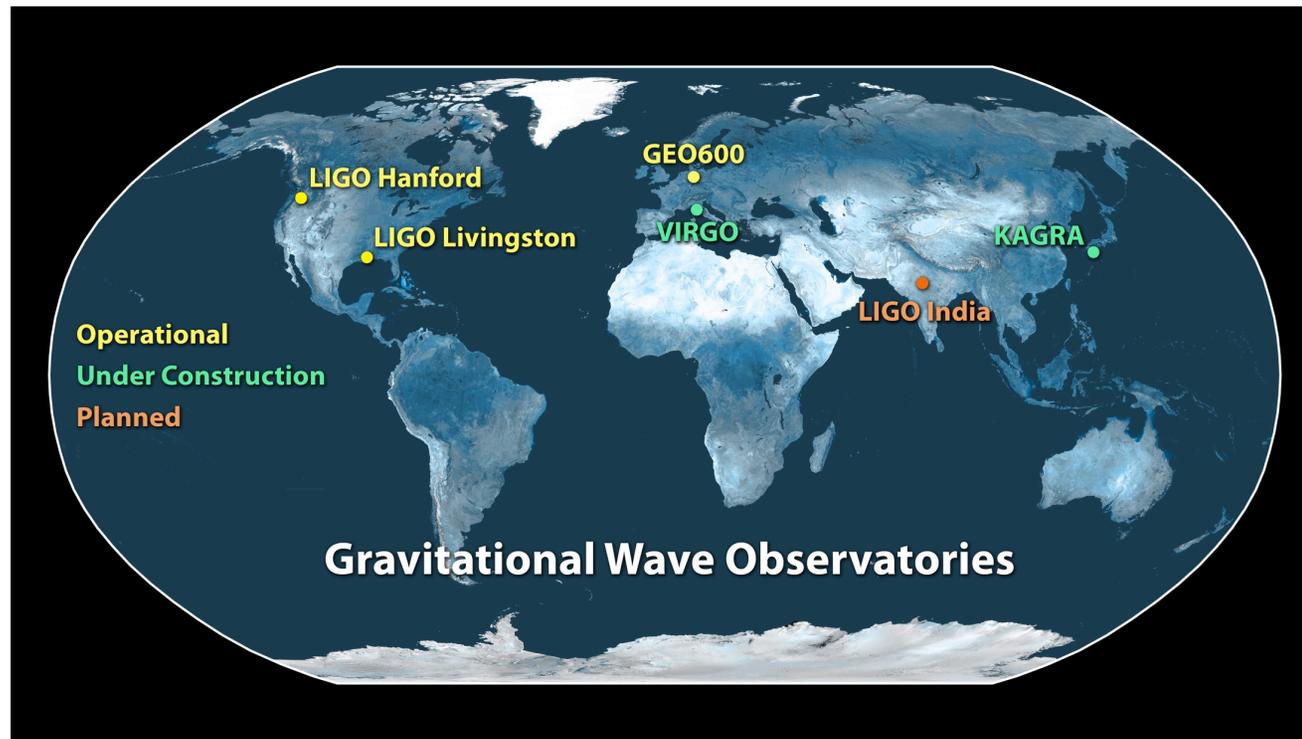
$$h = \delta l / l \sim 10^{-21}$$



# Interferométrie laser



## Le réseau de détecteurs



## La découverte

- Première détection ``directe'' d'une onde gravitationnelle

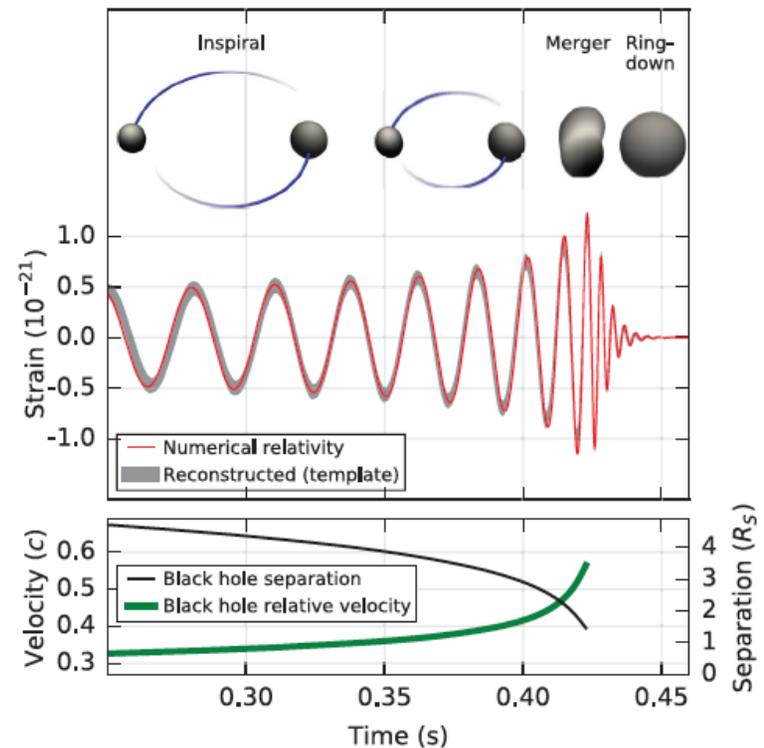
Mais aussi:

- Première observation directe d'un trou noir.
- Première observation directe d'un système binaire de trous noirs.
- Preuve que ces systèmes peuvent fusionner pendant le temps de Hubble.
- Événement astrophysique le plus énergétique jamais observé.
  - $\sim 3$  masses solaires en  $\sim 0.2$ s
  - Au maximum de l'émission :  $3.6 \cdot 10^{56}$  erg/s!

# Coalescence de deux trous noirs

- 8 cycles entre 35 et 150 Hz.
  - Vitesse relative atteint  $\sim 0.6c$ .
  - Séparation de quelques centaines de km
- 
- Mesure de la masse totale ( $>70 M_{\odot}$ ) et de la "chirp mass" ( $30 M_{\odot}$ ) à partir du maximum de la fréquence et de la dérivée de la fréquence.

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{M^{1/5}} \simeq \frac{c^3}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$



## Recherche générique

- Hypothèses minimales sur l'origine ou la forme du signal gravitationnel.
- Identification d'un excès de puissance dans le plan temps/fréquence, en coïncidence dans les données des deux détecteurs.
- La forme d'onde reconstruite est consistante avec un signal gravitationnel commun dans les deux détecteurs (multidetector maximum likelihood)
- La statistique de détection tient compte du rapport signal à bruit et de la cohérence entre les sites:

$$\eta_c = \sqrt{2E_c / (1 + E_n/E_c)}$$

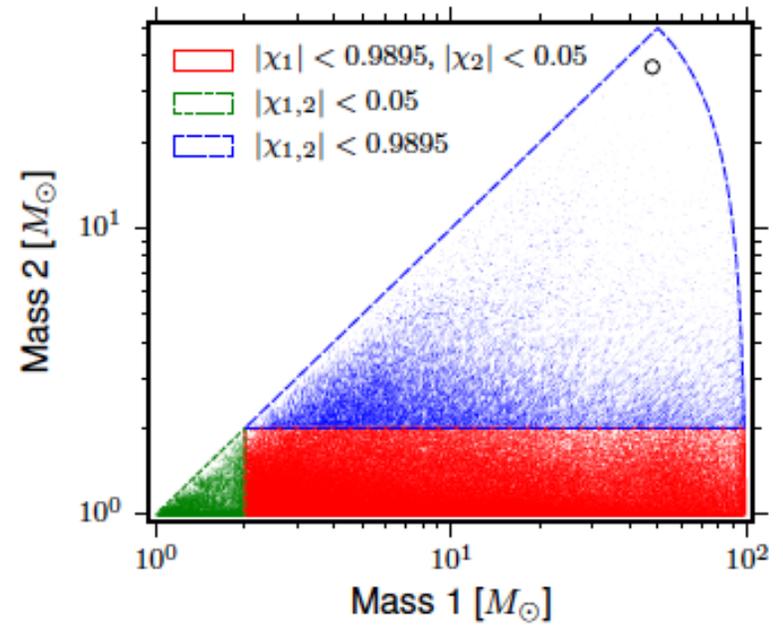
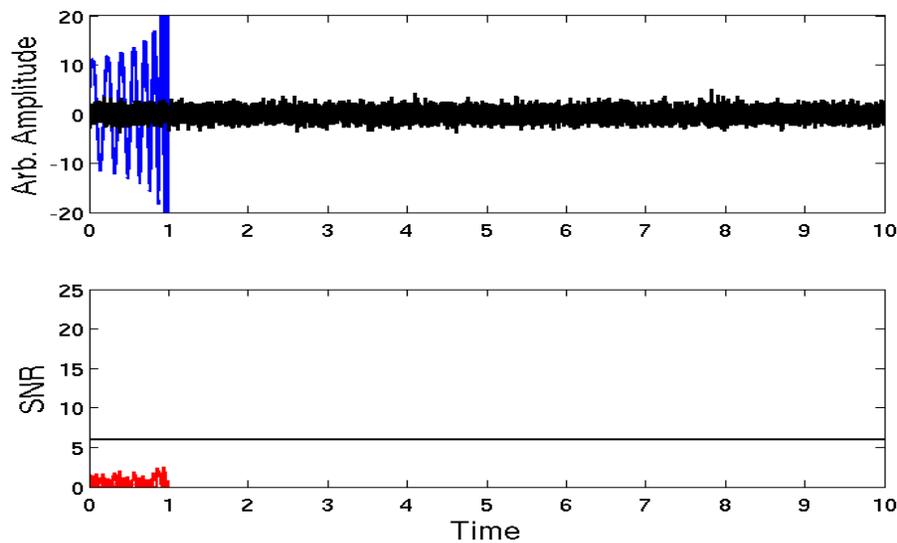
## Recherche de coalescences de binaires

- Le signal gravitationnel est très bien modélisé dans le cadre des théories post-newtoniennes (phase spirale), des théories perturbatives (ringdown), et de la relativité numérique (fusion). La méthode optimale est celle du filtre adapté.
- Calcule du "match-filter SNR" pour chaque "template" et chaque détecteur (adéquation de 90%)

$$\langle s|h \rangle(t) = 4 \int_0^\infty \frac{\tilde{s}(f)\tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df$$

- Sélection d'évènements en coïncidence dans les deux détecteurs (délais <15 ms pour le même "template").
- Tests d'adéquation entre les données et le "template" (chi-squared, goodness of fit) permettent de supprimer les valeurs élevées du SNR dues au bruit non gaussien.

# Filtre adapté



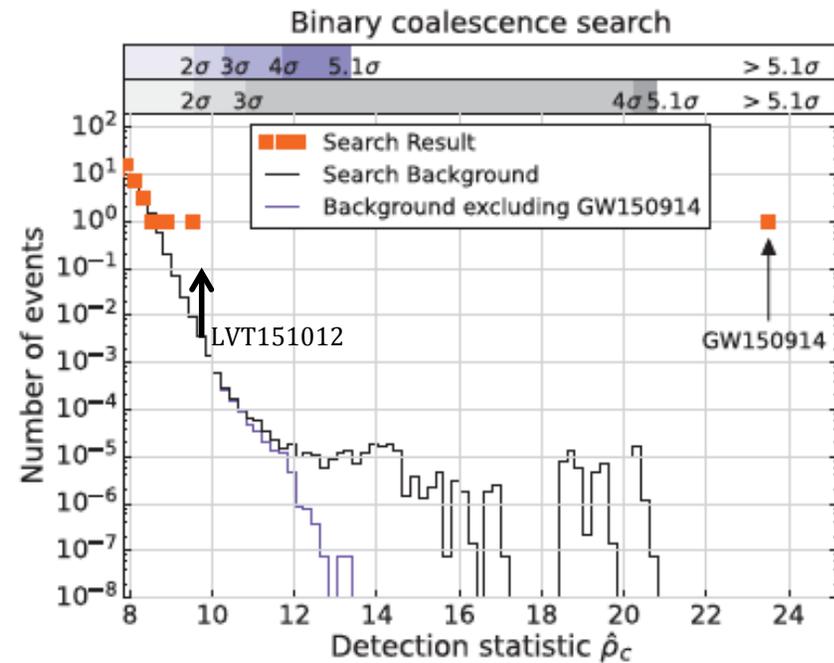
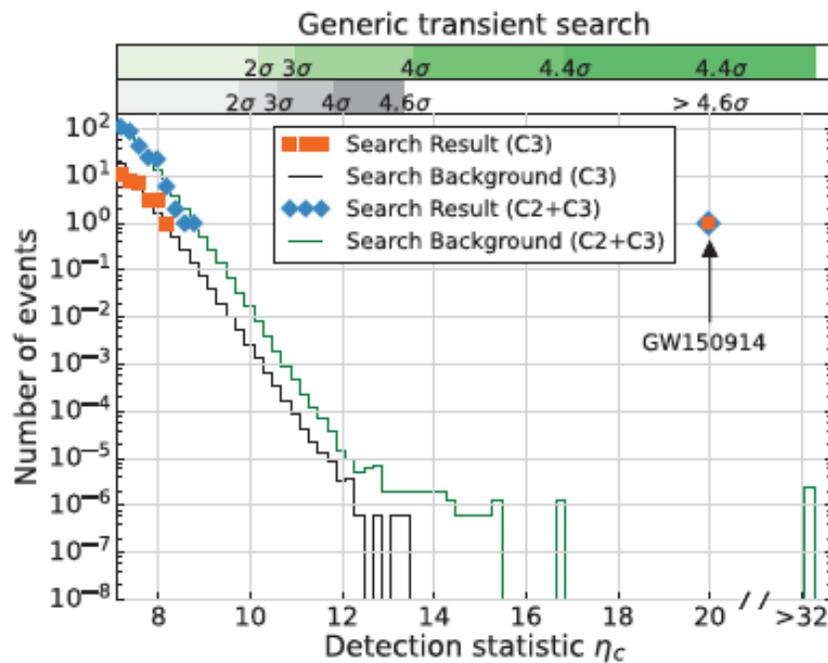
Credit Chad Hanna

250,000 templates

## Degré de signification

- Taux auquel le bruit du détecteur produit des évènements avec une statistique de détection supérieure à celle du candidat (background)
- Difficulté: pas de ``null stream'', bruit non stationnaire et non Gaussien.
- Techniques de ``time-shift'' pour produire de nouveaux échantillons
- Surestimation du background (OG toujours présente)

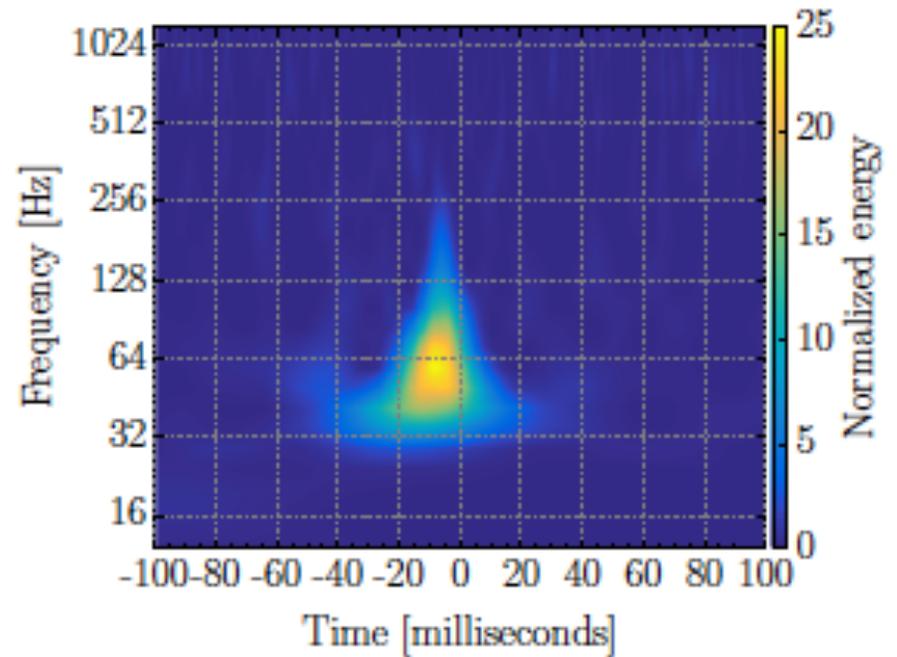
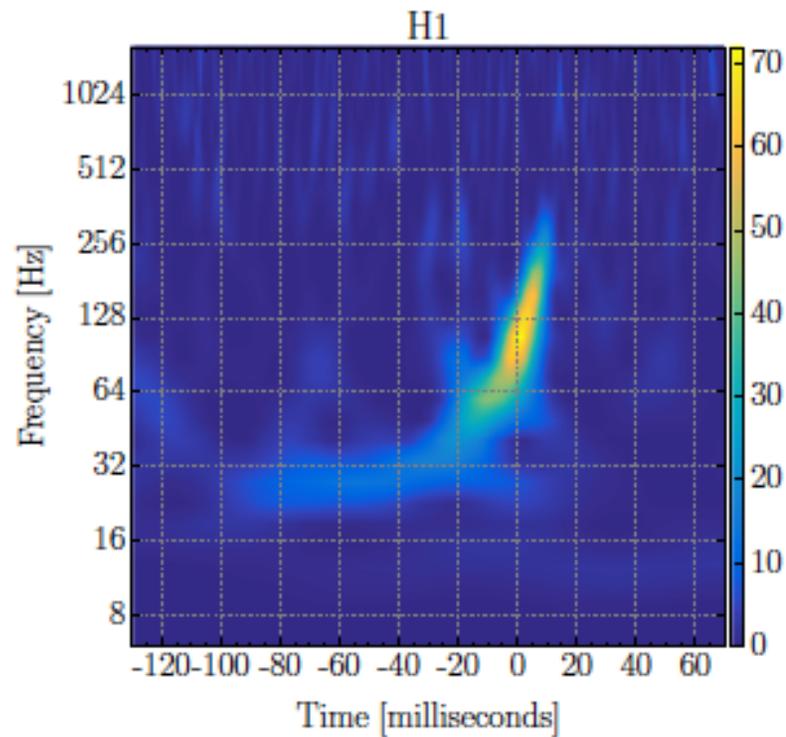
Générique:  $4.6\sigma$  (FAR = 1/22,500 ans, FAP <  $2E-6$ )  
 Filtre adapté:  $5.1\sigma$  (FAR = 1/203,000 ans, FAP <  $2E-7$ )



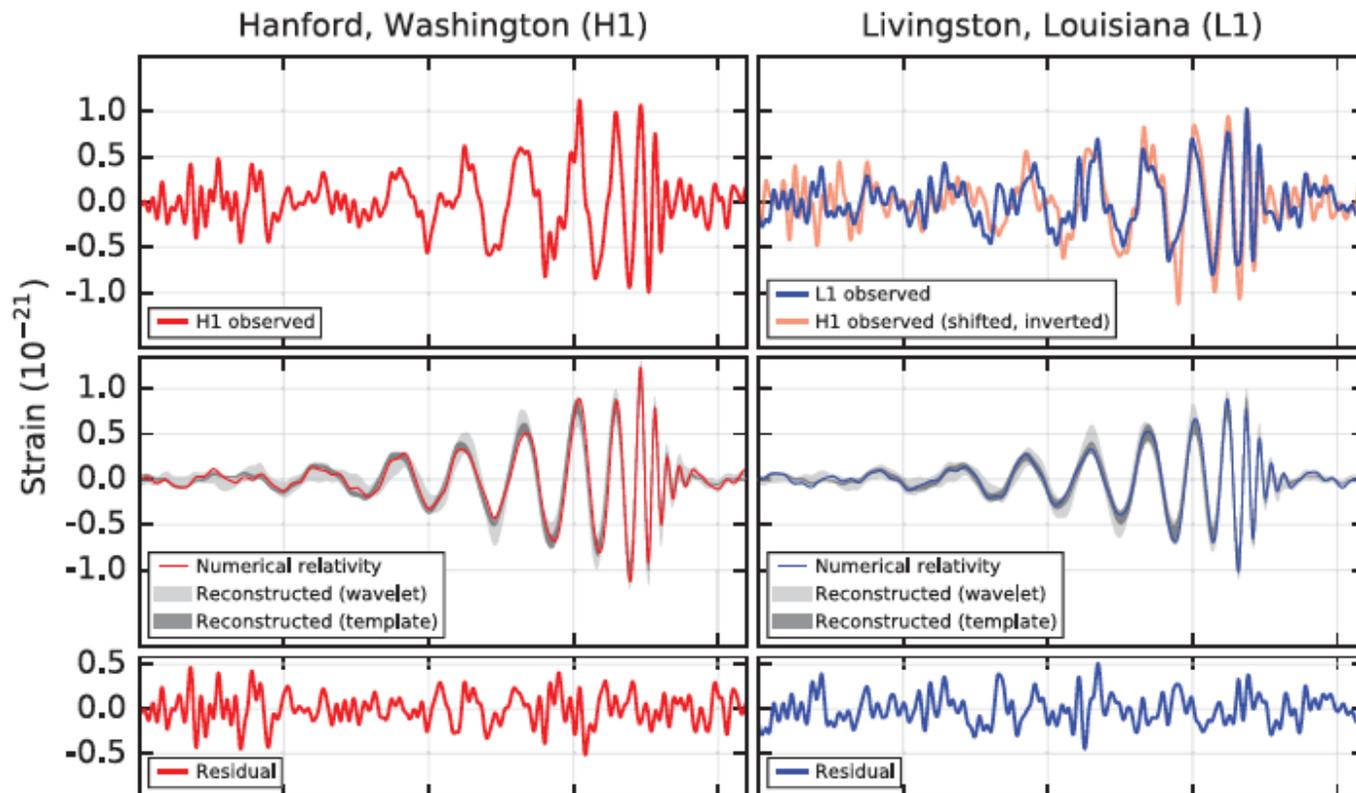
## Qualité des données

- Détecteurs stables pendant plusieurs heures autour de GW150914 (pas de veto).
- Sensibilité moyenne et ``background`` typiques de la période totale analysée (12/09/2015-20/10/2015)
- Etude exhaustive des bruits instrumentaux et environnementaux (magnétiques, fréquences radio, acoustiques...)
- Etude d'autres sources de bruit (activité humaine, météo, avions...)

# GW150914 versus Blip



# Reconstruction du signal



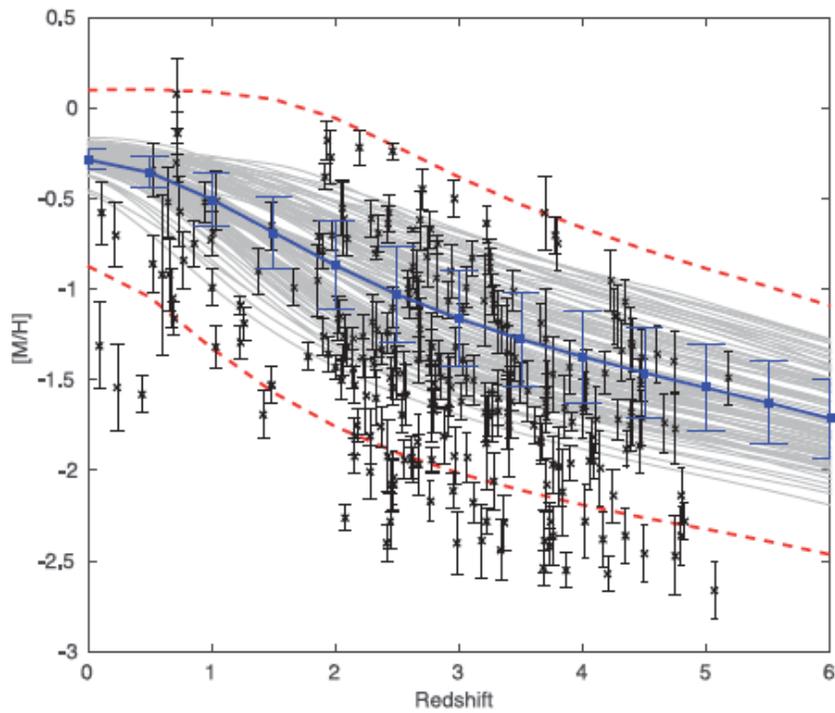
## Estimation des paramètres

- Méthodes bayésiennes (Markov Chain, Nested sampling)  
8 paramètres intrinsèques (masses, spins) 9 paramètres supplémentaires (coordonnées célestes, distance de luminosité, orientation, temps et phase de coalescence).
- Bonnes contraintes sur les masses
- Mesure de la distance de luminosité mais pas du redshift.
- Mauvaise localisation dans le ciel ( $600 \text{ deg}^2$ ) par triangulation. Amélioration avec Virgo d'un facteur 10.
- Taux :  $2\text{-}400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  (avant GW150914:  $0.1\text{-}300 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ )

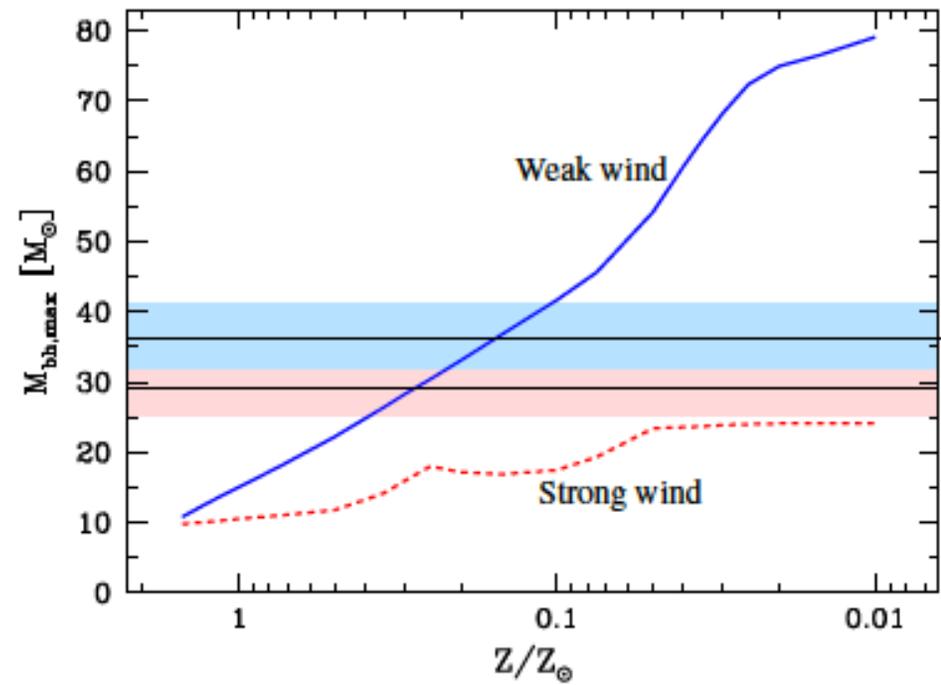
## Interprétation astrophysique

Masses des trous noirs ( $m_1=36M_\odot$  and  $m_2=29M_\odot$ ) supérieures aux masses mesurées LMXRBs ( $M<20 M_\odot$ ).

- Scénario d'évolution:
  - Formes dans un environnement peu métallique (vent solaire et perte de moment angulaire réduits).
  - Binaire isolée avec court ou long délais.
  - Ou capture dynamique dans un environnement dense (ségrégation de masse).



Dvorkin et al. 2015



Belczynski et al. 2010

## Tests de la Relativité Générale

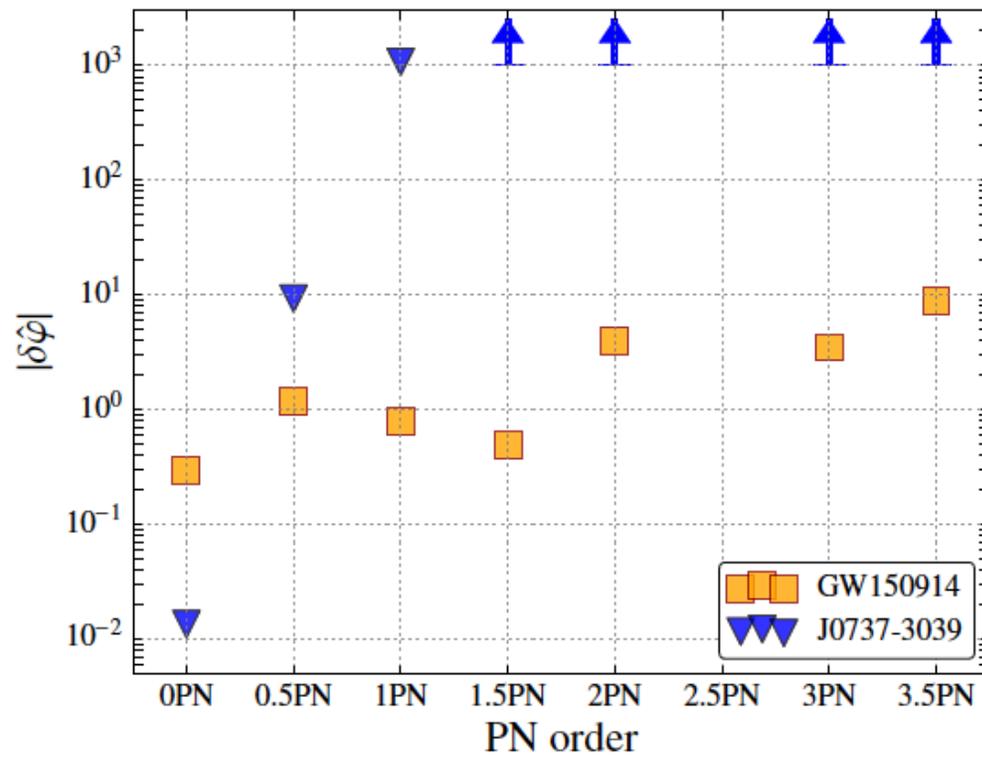
- Premiers tests en champs fort
  - Formes d'ondes retrouvées sont en accord avec les prédictions de la RG (~94%)
  - Masses et spins mesures du trou noir final en accord avec les valeurs calculées avec la RG.
  - Premières contraintes dynamiques sur les séries post-newtonniennes.
  - Contraintes sur la masse du graviton (ou longueur d'onde compton)

$$\Psi_{eff}(f) = \Psi(f) - \beta f^{-1} + \phi_g + \tau_g f$$

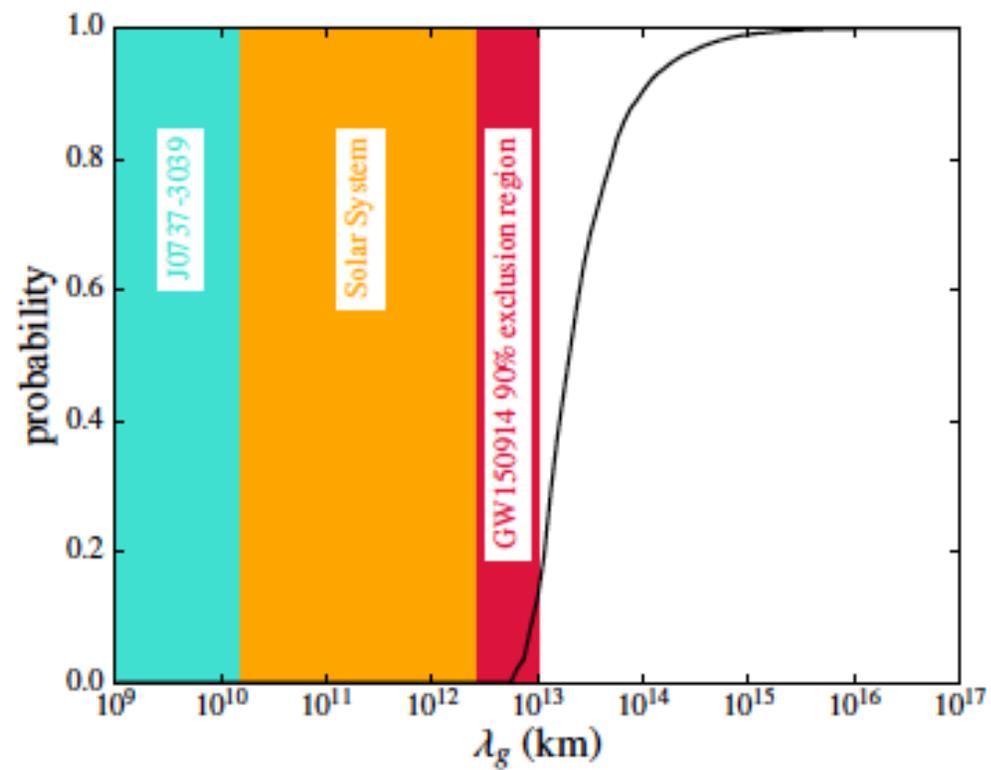
$$\beta = \pi D / \lambda_g^2 (1+z)$$

- **Aucune évidence de violation de la RG**

# Tests de la Relativité Générale

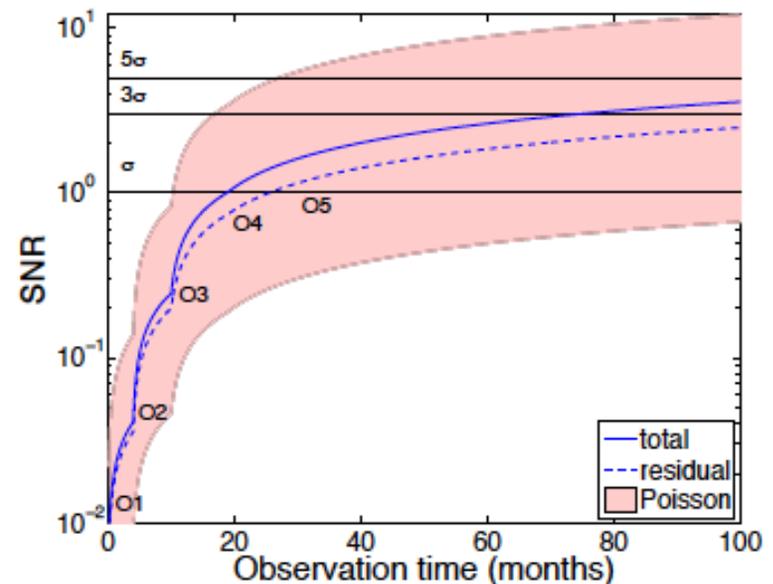
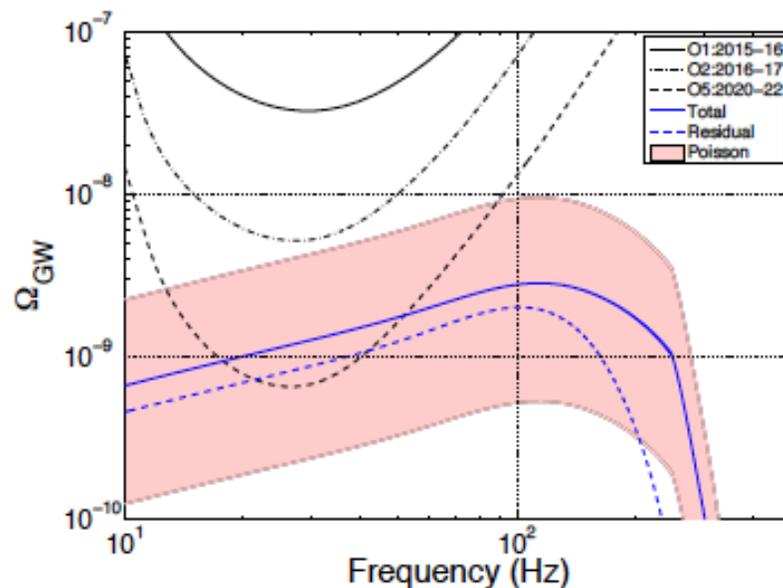


## Tests de la Relativité Générale



## Fond stochastique

La superposition des systèmes de trous noirs non résolus forment un fond gravitationnel qui pourrait être détecté par des techniques de cross-correlation avant que la sensibilité nominale ne soit atteinte.



## Et ensuite?

Beaucoup d'autres détections sont attendues avec d'importantes conséquences en physique fondamentale, astrophysique et cosmologie. (nous avons publié l'analyse de  $\sim 1/3$  de O1 pour des masses  $< 100 M_{\odot}$ )

- Tests de RG en champ fort
- Distribution de la masse des trous noirs et son évolution avec le redshift
- Evolution des étoiles massives
- Energie noire
- Astronomie multimessager

## Extra Slides

## Articles

Detection: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

<https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>

LIGO-P1500237: GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries

LIGO-P1500229: Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions

LIGO-P1500269: GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO

LIGO-P1500218: Properties of the binary black hole merger GW150914

LIGO-P1500217: The Rate of BBH Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914

LIGO-P1500262: Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914

LIGO-P1500213: Tests of general relativity with GW150914

LIGO-P1500222: GW150914: Implications for the stochastic gravitational-wave background from binary black holes

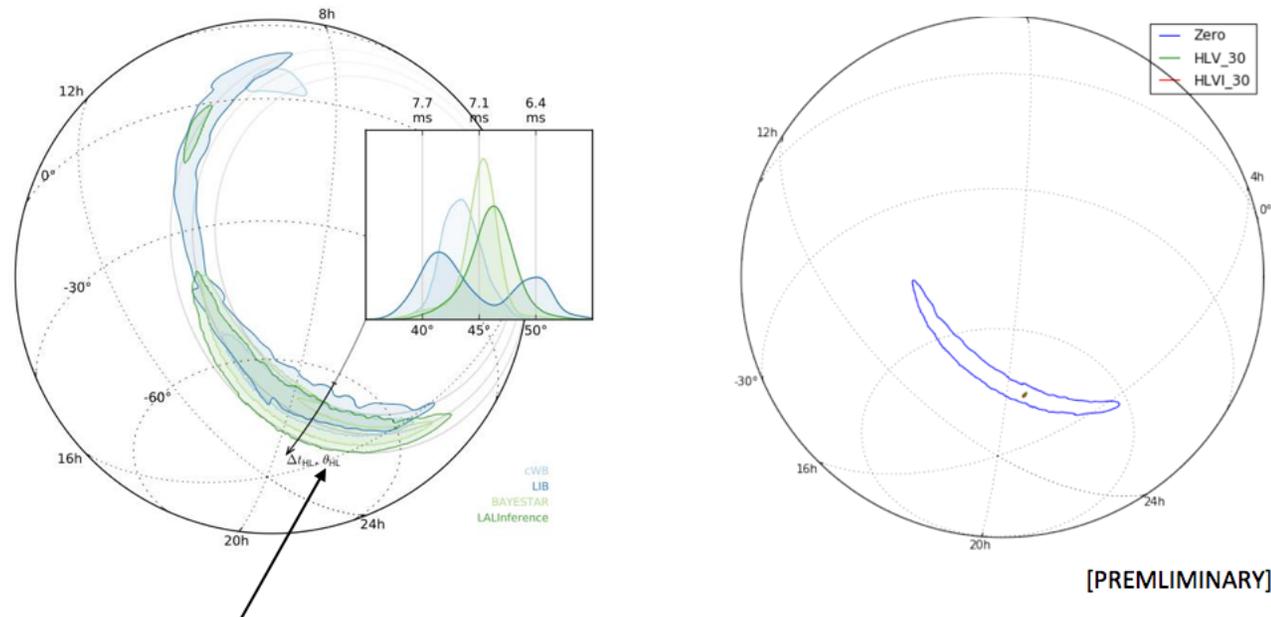
LIGO-P1500248: Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of BBH merger GW150914

LIGO-P1500238: Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to GW signal GW150914

LIGO-P1500227: Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914

LIGO-P1500271: High-energy Neutrino follow-up search of GW Event GW150914 with IceCube and ANTARES

# Sky Maps + Virgo/LIGO India

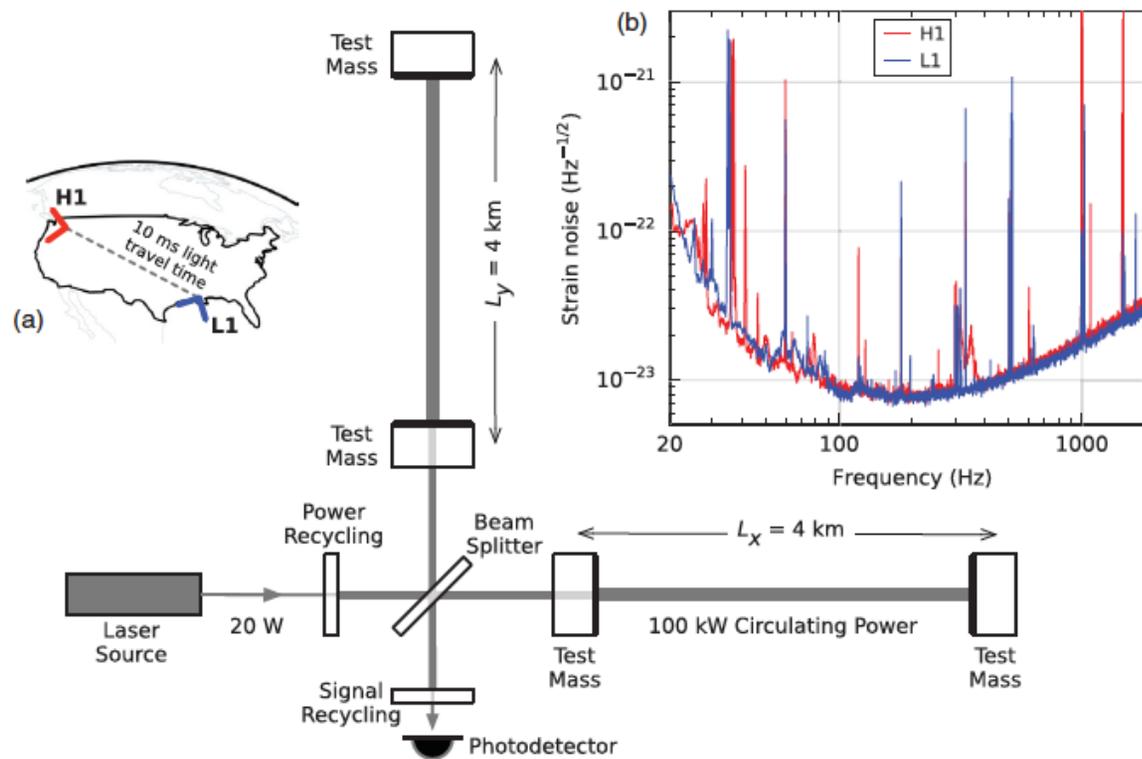


annulus where polar angle is determined by the arrival time at two detectors

factor of 10 (Virgo);  
further improvement of 1.2 (LIGO India)<sup>1</sup>

[PRELIMINARY]

# Advanced LIGO au moment de GW150914



	EOBNR	IMRPhenom	Overall
Detector-frame total mass $M/M_\odot$	$70.3^{+5.3}_{-4.8}$	$70.7^{+3.8}_{-4.0}$	$70.5^{+4.6\pm 0.9}_{-4.5\pm 1.0}$
Detector-frame chirp mass $\mathcal{M}/M_\odot$	$30.2^{+2.5}_{-1.9}$	$30.5^{+1.7}_{-1.8}$	$30.3^{+2.1\pm 0.4}_{-1.9\pm 0.4}$
Detector-frame primary mass $m_1/M_\odot$	$39.4^{+5.5}_{-4.9}$	$38.3^{+5.5}_{-3.5}$	$38.8^{+5.6\pm 0.9}_{-4.1\pm 0.3}$
Detector-frame secondary mass $m_2/M_\odot$	$30.9^{+4.8}_{-4.4}$	$32.2^{+3.6}_{-5.0}$	$31.6^{+4.2\pm 0.1}_{-4.9\pm 0.6}$
Detector-frame final mass $M_f/M_\odot$	$67.1^{+4.6}_{-4.4}$	$67.4^{+3.4}_{-3.6}$	$67.3^{+4.1\pm 0.8}_{-4.0\pm 0.9}$
Source-frame total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.0^{+5.0}_{-4.4}$	$64.6^{+4.1}_{-3.5}$	$64.8^{+4.6\pm 1.0}_{-3.9\pm 0.5}$
Source-frame chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$27.9^{+2.3}_{-1.8}$	$27.9^{+1.8}_{-1.6}$	$27.9^{+2.1\pm 0.4}_{-1.7\pm 0.2}$
Source-frame primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.3^{+5.3}_{-4.5}$	$35.1^{+5.2}_{-3.3}$	$35.7^{+5.4\pm 1.1}_{-3.8\pm 0.0}$
Source-frame secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$28.6^{+4.4}_{-4.2}$	$29.5^{+3.3}_{-4.5}$	$29.1^{+3.8\pm 0.2}_{-4.4\pm 0.5}$
Source-frame final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.0^{+4.4}_{-4.0}$	$61.6^{+3.7}_{-3.1}$	$61.8^{+4.2\pm 0.9}_{-3.5\pm 0.4}$
Mass ratio $q$	$0.79^{+0.18}_{-0.19}$	$0.84^{+0.14}_{-0.21}$	$0.82^{+0.16\pm 0.01}_{-0.21\pm 0.03}$
Effective inspiral spin parameter $\chi_{\text{eff}}$	$-0.09^{+0.19}_{-0.17}$	$-0.03^{+0.14}_{-0.15}$	$-0.06^{+0.17\pm 0.01}_{-0.18\pm 0.07}$
Dimensionless primary spin magnitude $a_1$	$0.32^{+0.45}_{-0.28}$	$0.31^{+0.51}_{-0.27}$	$0.31^{+0.48\pm 0.04}_{-0.28\pm 0.01}$
Dimensionless secondary spin magnitude $a_2$	$0.57^{+0.40}_{-0.51}$	$0.39^{+0.50}_{-0.34}$	$0.46^{+0.48\pm 0.07}_{-0.42\pm 0.01}$
Final spin $a_f$	$0.67^{+0.06}_{-0.08}$	$0.67^{+0.05}_{-0.05}$	$0.67^{+0.05\pm 0.00}_{-0.07\pm 0.03}$
Luminosity distance $D_L/\text{Mpc}$	$390^{+170}_{-180}$	$440^{+140}_{-180}$	$410^{+160\pm 20}_{-180\pm 40}$
Source redshift $z$	$0.083^{+0.033}_{-0.036}$	$0.093^{+0.028}_{-0.036}$	$0.088^{+0.031\pm 0.004}_{-0.038\pm 0.009}$

## Coalescence rate of stellar BBHs

- Number of triggers (Poisson process)

$$\frac{dN}{dx} = \Lambda_1 p_1(x) + \Lambda_0 p_0(x),$$

- Detection volume depends on detector sensitivity and source parameters.

$$\langle VT \rangle = T \int dz d\theta \frac{dV_c}{dz} \frac{1}{1+z} s_i(\theta) f(z, \theta).$$

- Assume uniform distribution in comoving volume (small distances)

$$R_i = \Lambda_i / \langle VT \rangle$$

- Rate estimate : 2-400 Gpc<sup>-3</sup> yr<sup>-1</sup>
- Before GW150914: 0.1-300 Gpc<sup>-3</sup> yr<sup>-1</sup> (Abadie et al. 2010)

Mass Distribution	$R/ (\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$		
	pycbc	gstlal	Combined
GW150914	$16^{+38}_{-13}$	$17^{+39}_{-14}$	$17^{+39}_{-13}$
LVT151012	$61^{+152}_{-53}$	$62^{+164}_{-55}$	$62^{+165}_{-54}$
Both	$82^{+155}_{-61}$	$84^{+172}_{-64}$	$83^{+168}_{-63}$
Astrophysical			
Flat	$33^{+64}_{-26}$	$32^{+65}_{-25}$	$33^{+62}_{-26}$
Power Law	$102^{+198}_{-79}$	$99^{+203}_{-79}$	$100^{+201}_{-79}$