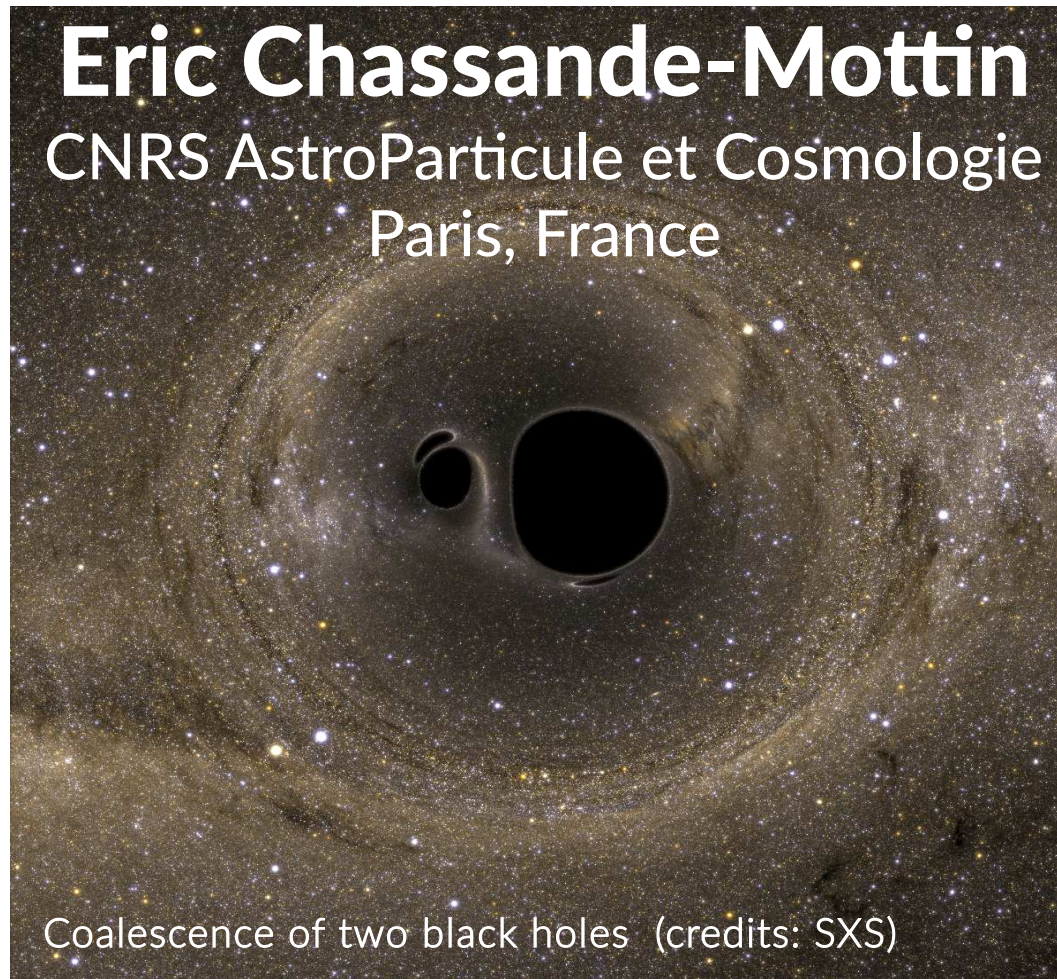


“Deux trous noirs dans une meule de foin”

Analyse de données pour l'astronomie
gravitationnelle

Eric Chassande-Mottin
CNRS AstroParticule et Cosmologie
Paris, France



Coalescence of two black holes (credits: SXS)



La quasi totalité de **notre connaissance de l'Univers**
provient de l'observation de sources lumineuses

ondes électromagnétiques
radio, micro-onde, rayon X et gamma

Credit: ESO/Babak Tafreshi btafreshi@twanight.org

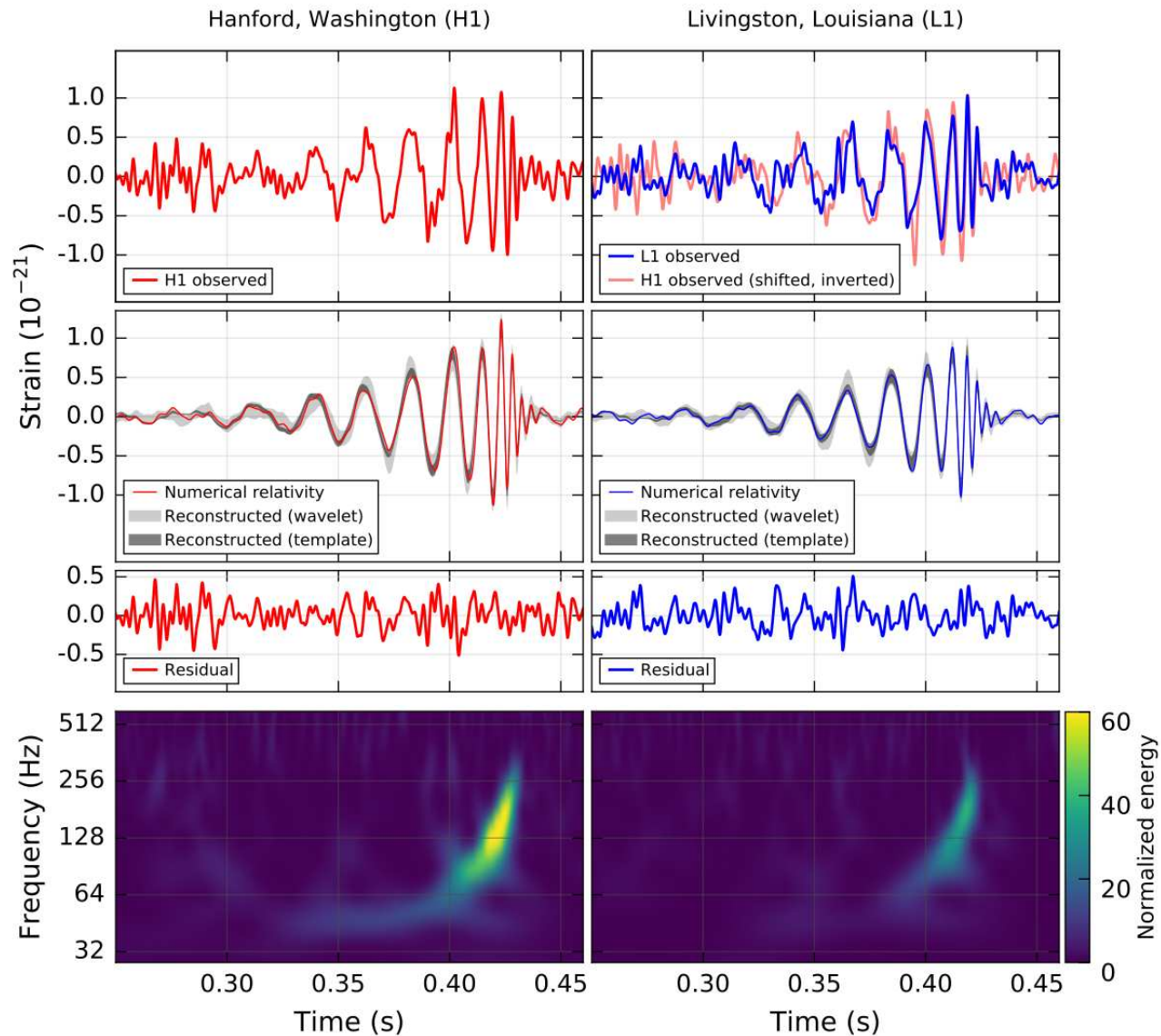


Les **ondes gravitationnelles**
sont les seules autres ondes
se propageant dans le vide
que nous connaissons

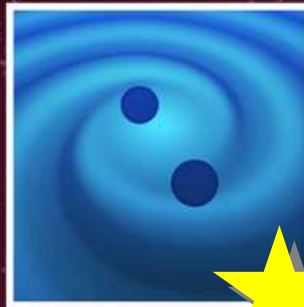
Un **nouveau moyen d'observation** de l'Univers,
particulièrement des sources obscures

Coalescence of two black holes (credits: SXS)

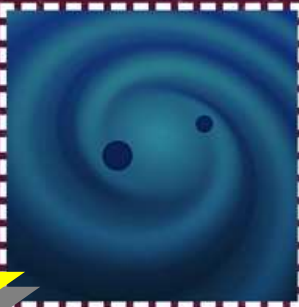
Sep 14, 2015 09:50:45 UTC



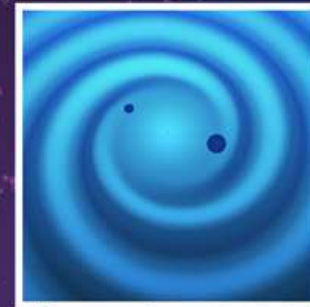
September 14, 2015
CONFIRMED



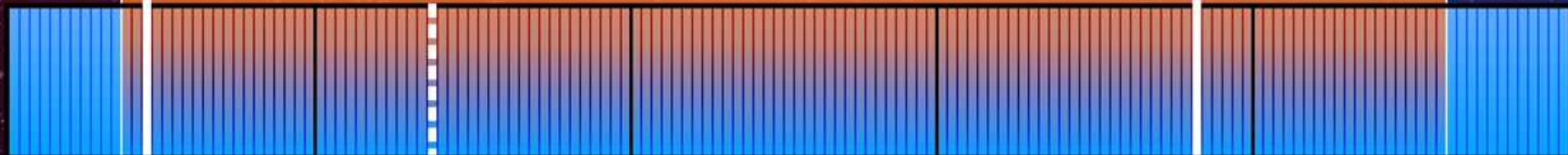
October 12, 2015
CANDIDATE



December 26, 2015
CONFIRMED



LIGO's first observing run
September 12, 2015 - January 19, 2016



September 2015

October 2015

November 2015

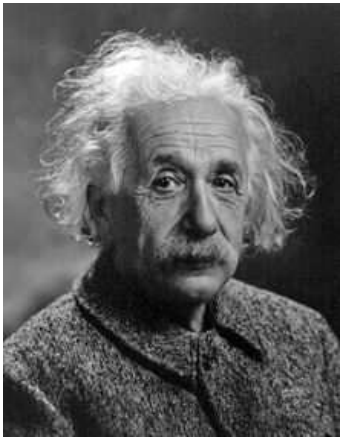
December 2015

January 2016

Plan de la présentation

- Introduction sur les ondes gravitationnelles
- Détecteurs interférométriques
- Analyse de données
 - Comment extrait-on le signal et l'information des données ?

Relativité générale



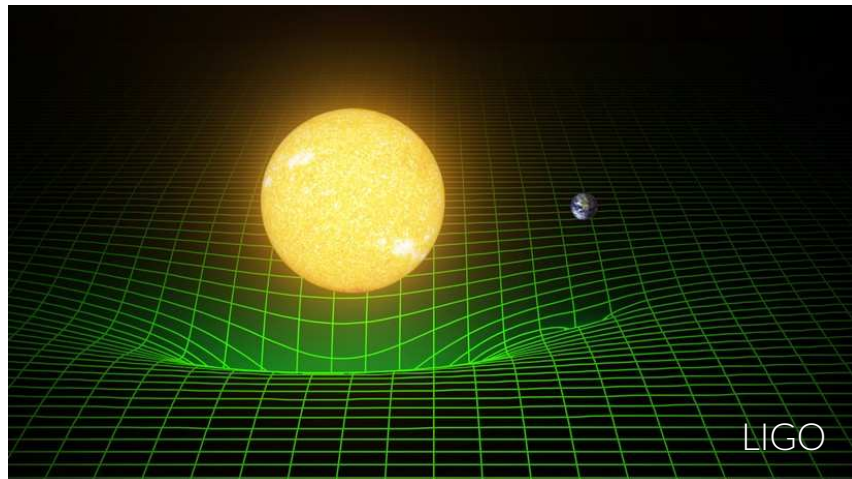
Albert Einstein, 1915

- L'espace-temps est un **objet déformable et dynamique**
- La gravité est un effet géométrique qui provient de la courbure de l'espace-temps
- **Equations d'Einstein**

Géométrie de
l'espace-temps
(métrique)

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Energie
Matière



« Spacetime tells matter how to move;
matter tells spacetime how to curve »

JA Wheeler

Ondes gravitationnelles (1)

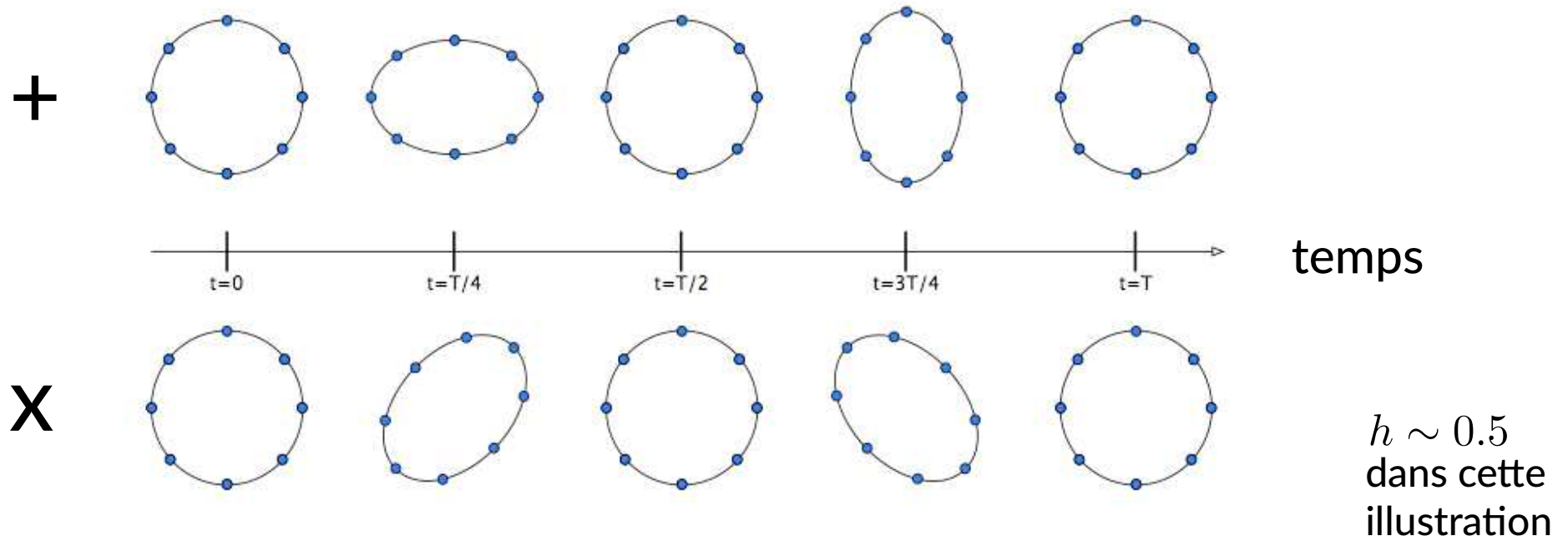
Résolution des équations d'Einstein
pour une petite perturbation de la métrique (plate) de l'espace-temps

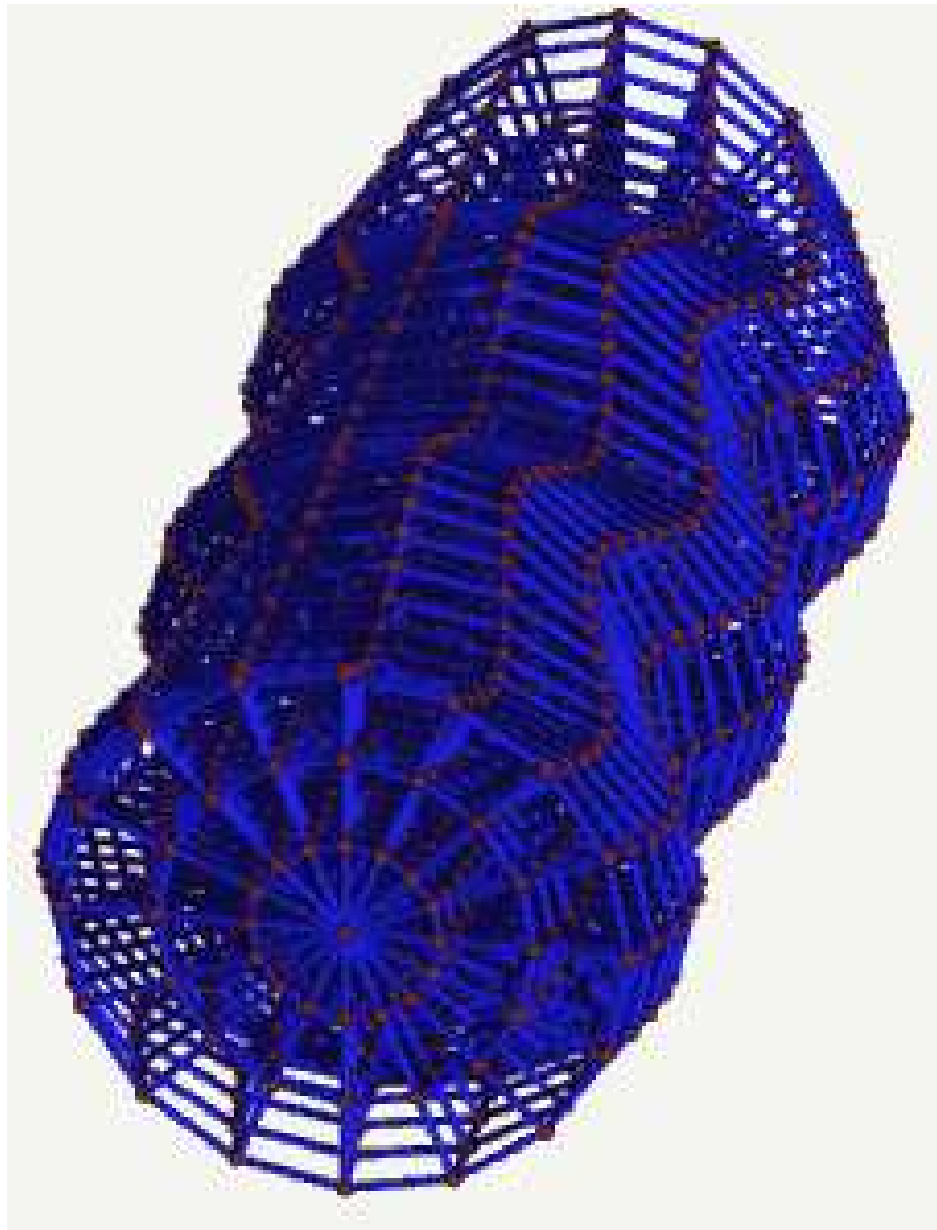
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1 \quad \square \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

Il existe des ondes de l'espace-temps !

Ondes gravitationnelles (2)

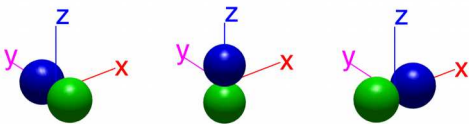
- ♦ Se propagent à la vitesse de la lumière
- ♦ Ondes transverses
- ♦ Deux polarisations indépendantes
- ♦ Amplitude h (sans dimension)

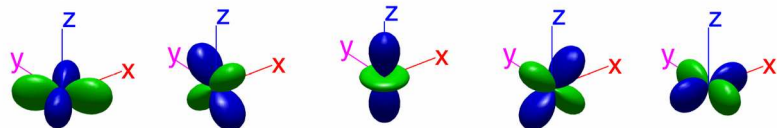




Ondes gravitationnelles (3)

monopôle 

dipôle 


quadrupôle



- Ondes électromagnétiques produites par les **charges accélérées**
 - Dérivée seconde du dipôle électrostatique
 - Ondes gravitationnelles produites par les **masses accélérées**
 - Dérivée seconde du dipôle gravitationnel est nulle (conservation de la quantité de mouvement)
 - Dérivée seconde du **quadrupôle gravitationnel** (mesure de la déformation de l'objet le long d'un axe)
 - Pas d'émission pour les objets sphériques
- non axi-symétrie nécessaire**

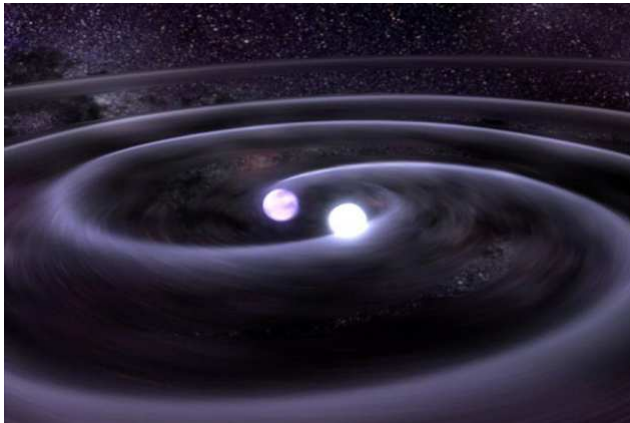
Ondes gravitationnelles (4)

De grandes masses et vitesses
sont nécessaires

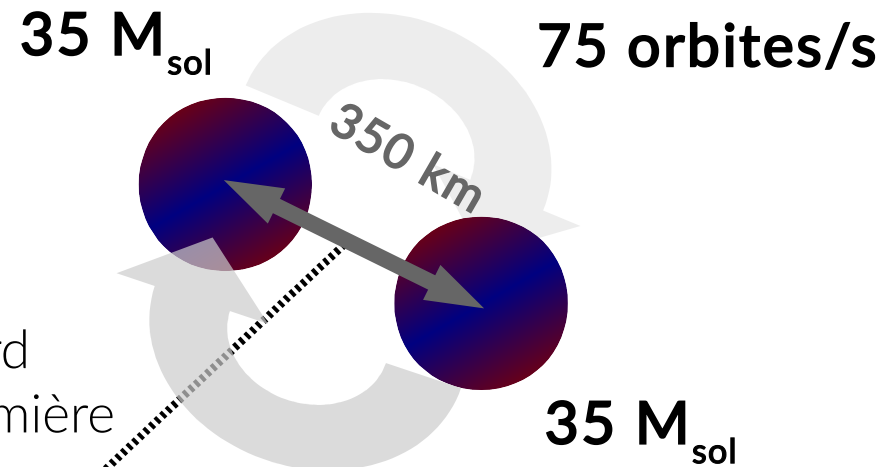
→ **systèmes astrophysiques**
par ex., binaires d'étoiles

$$h \approx G/c^4 \ddot{Q}/R$$

$$G/c^4 \sim 1/[10^{44} N]$$



$R \sim 1$ milliard
d'années lumière

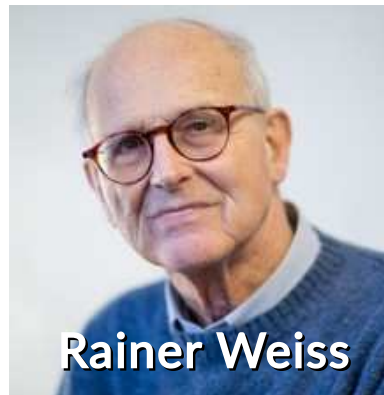
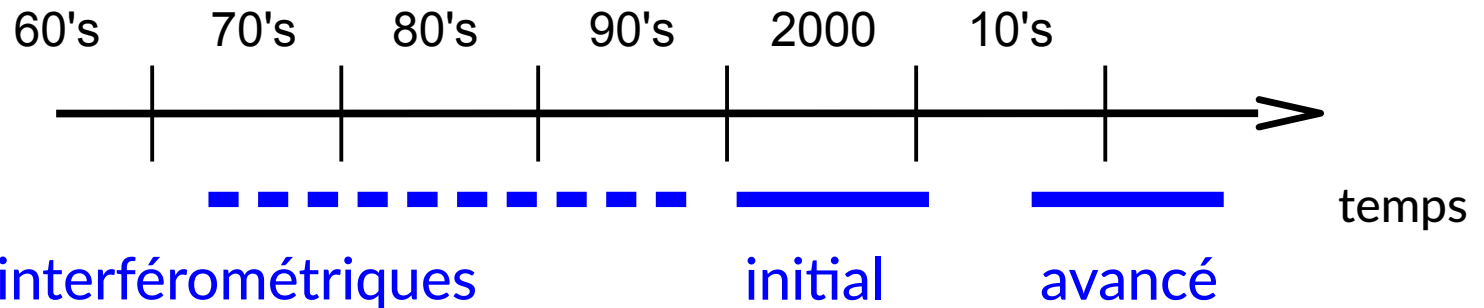


observateur

$$h \sim 10^{-21}$$

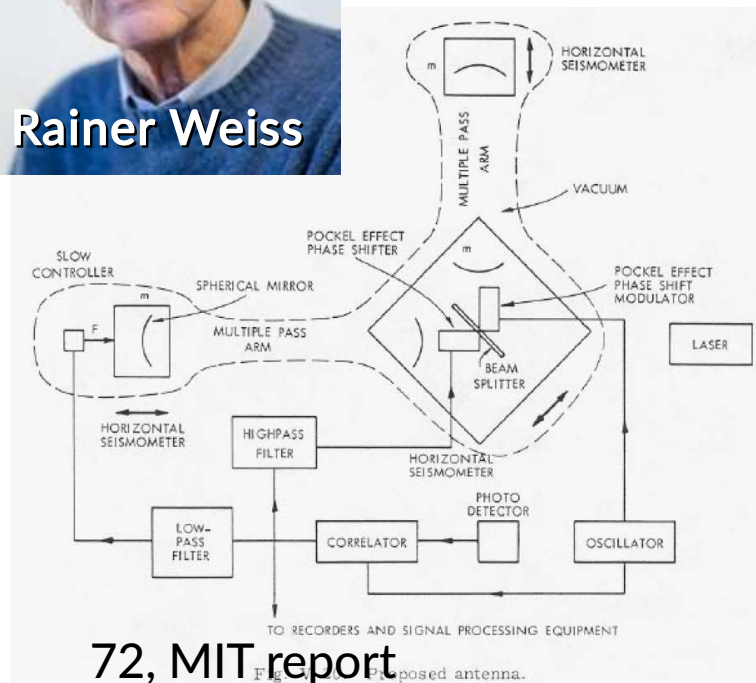
$$f_{OG} \approx 2f_{orb}$$

Histoire de la détection directe

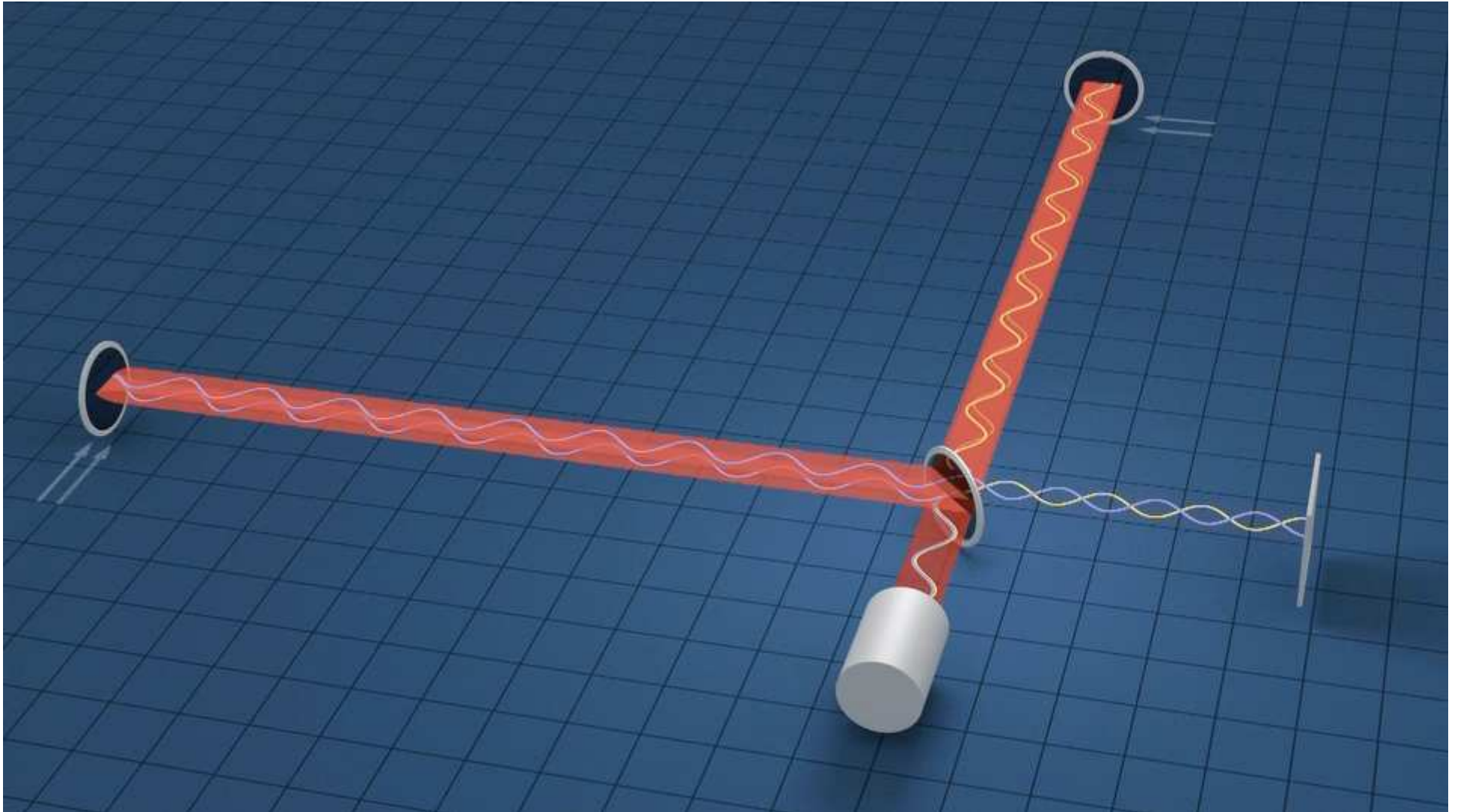


Adalberto Giazotto
Alain Brillet

Depuis 2007 LIGO et Virgo fonctionnent en réseau
Les données sont analysées et publiées ensemble

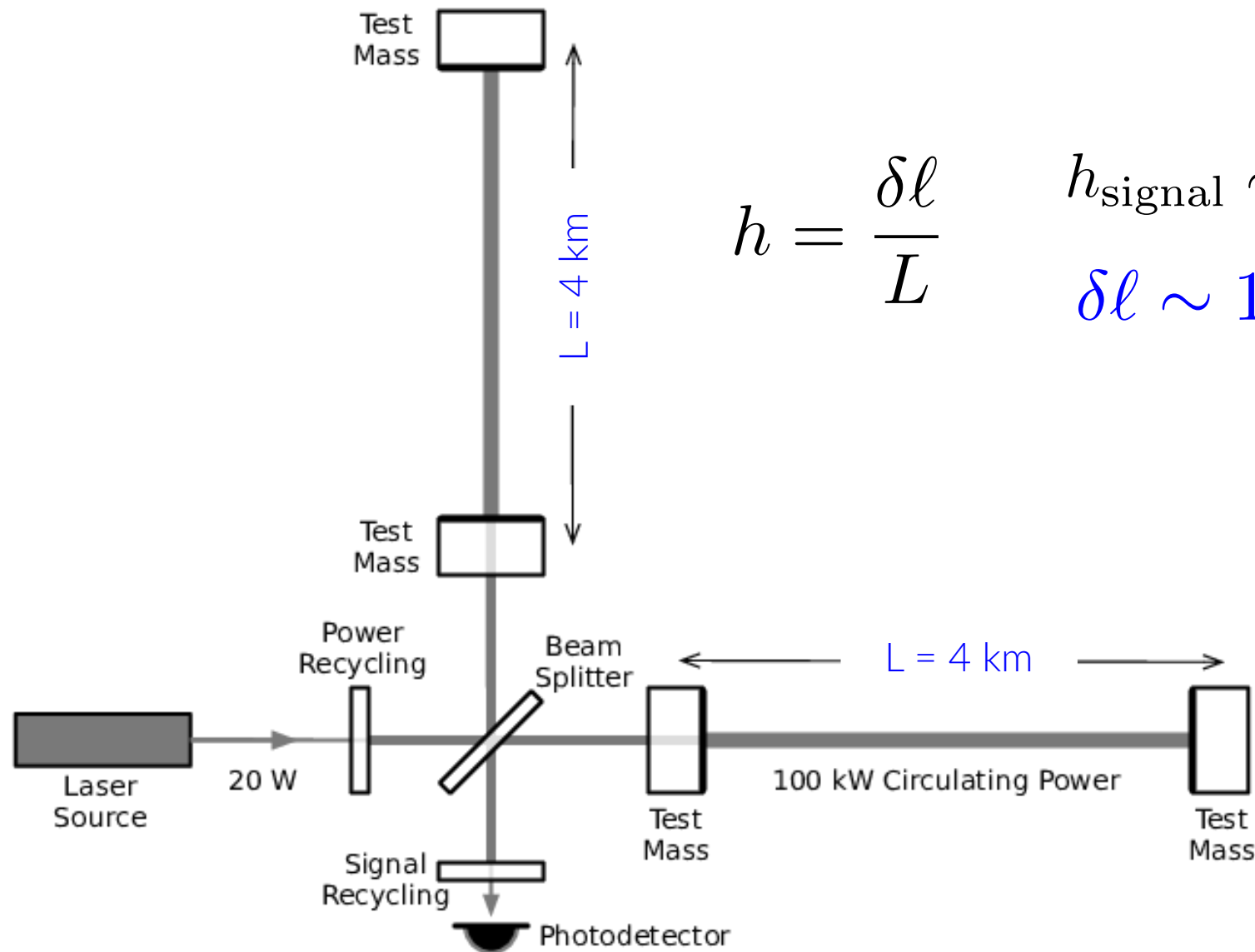


Interféromètre de Michelson



<https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A>

Advanced LIGO

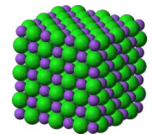


$$h = \frac{\delta \ell}{L}$$

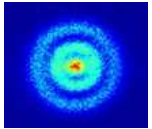
$$h_{\text{signal}} \sim 10^{-21}$$

$$\delta \ell \sim 10^{-18} m$$

$$\delta \ell \sim 10^{-18} m \quad ?$$



Distance interatomique dans un cristal $10^{-9} m$ (x 1 milliard)



Rayon de l'atome d'hydrogène $10^{-11} m$ (x 10 millions)



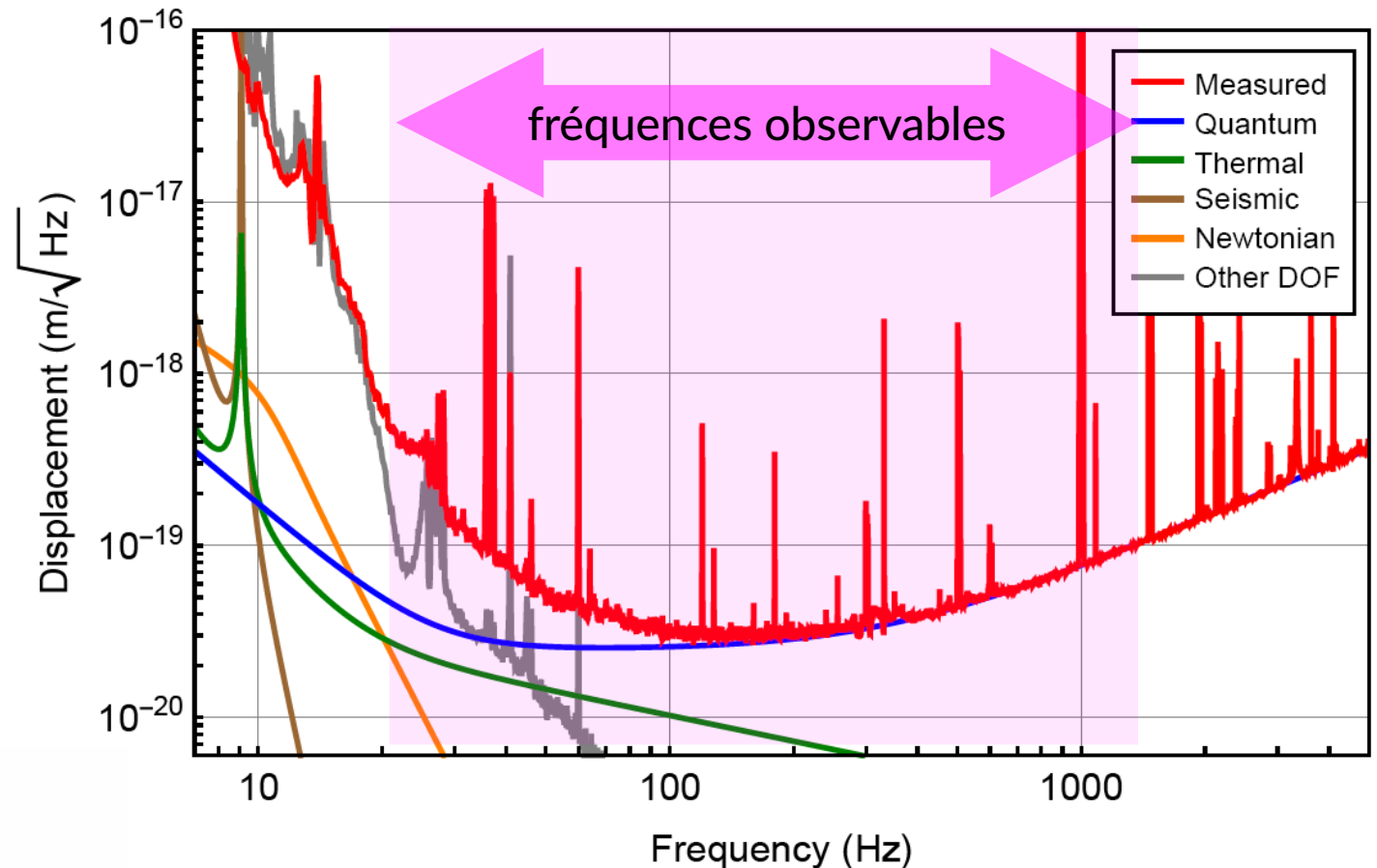
Rayon du noyau atomique $10^{-15} m$ (x 1000)

Science run O1

Deux instruments

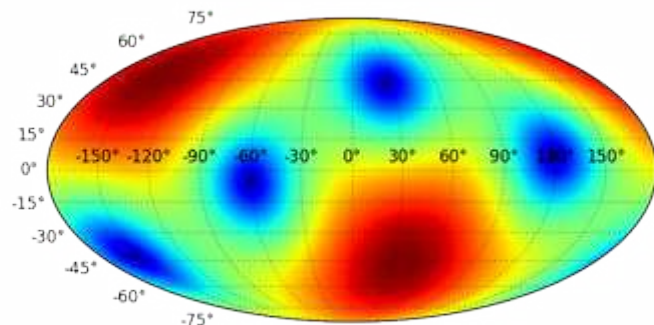


~3000 km
(10 ms lumière)



- Observatoire **quasiment omnidirectionnel**

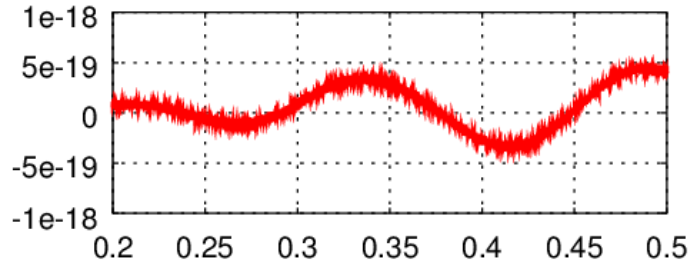
- La terre est transparente
- Ne peut pas être “pointé” dans une direction du ciel
- Localisation avec plusieurs détecteurs par triangulation



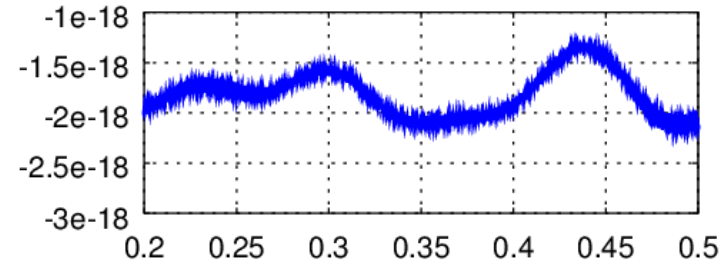
En partant des données brutes (1)

$h(t)$

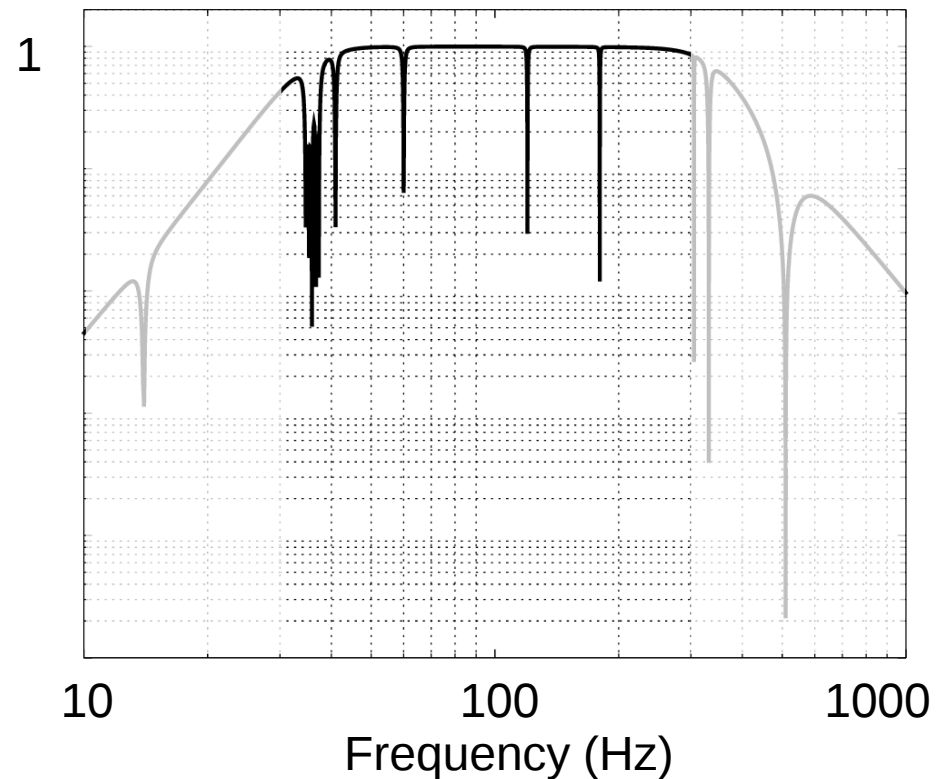
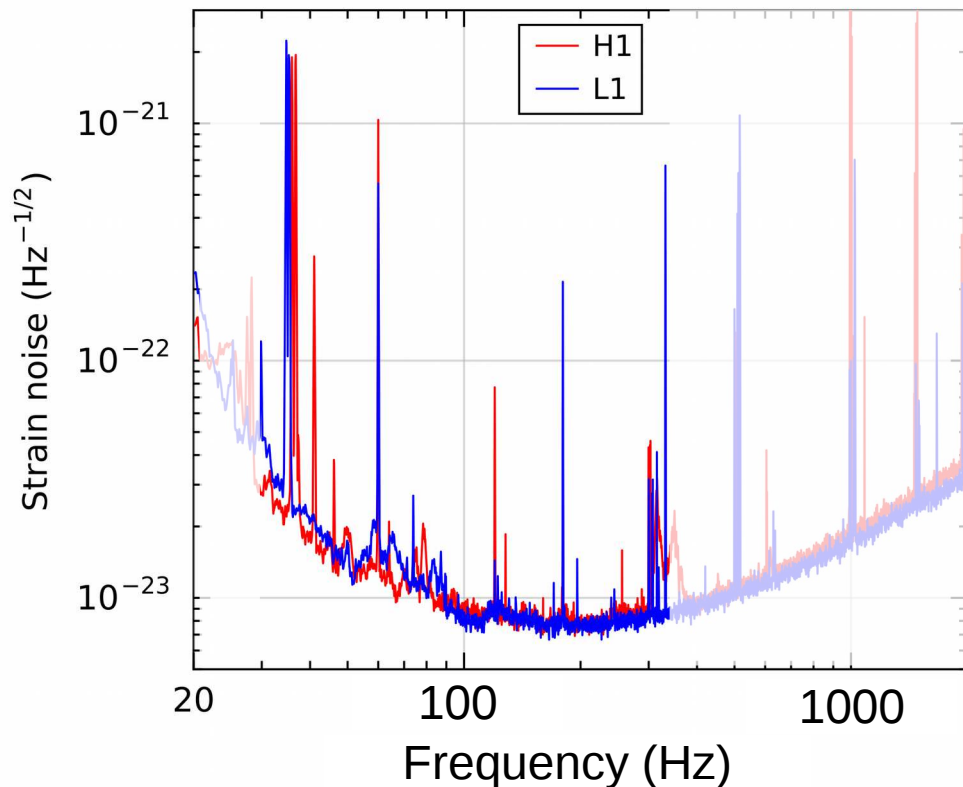
Hanford H1: raw data



Livingston L1: raw data



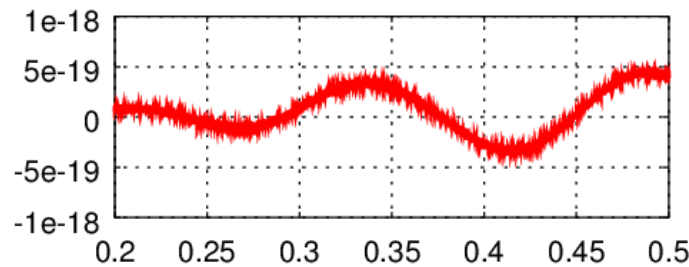
Bandpass filter + frequency notch



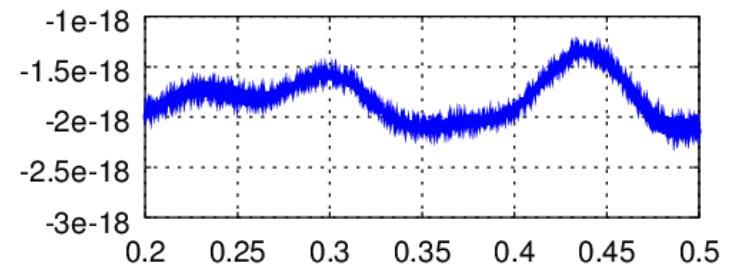
En partant des données brutes (2)

$h(t)$

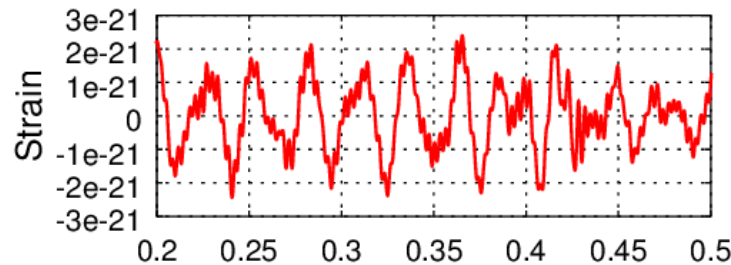
Hanford H1: raw data



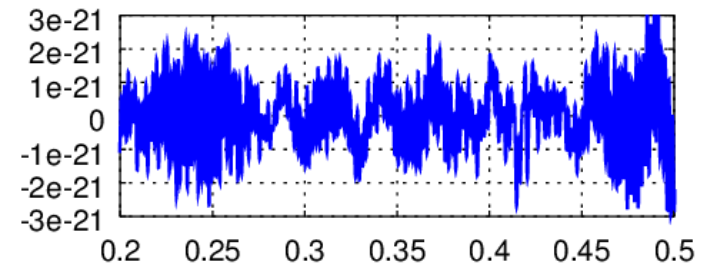
Livingston L1: raw data



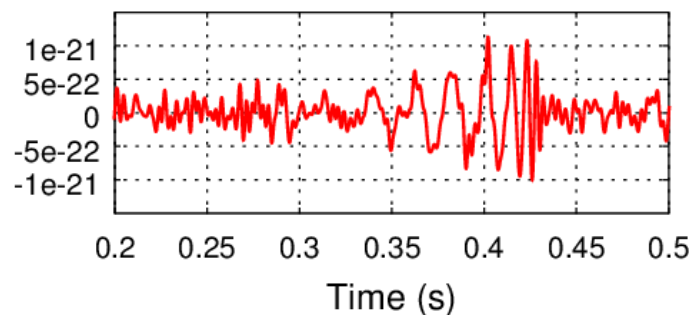
Bandpass filtered



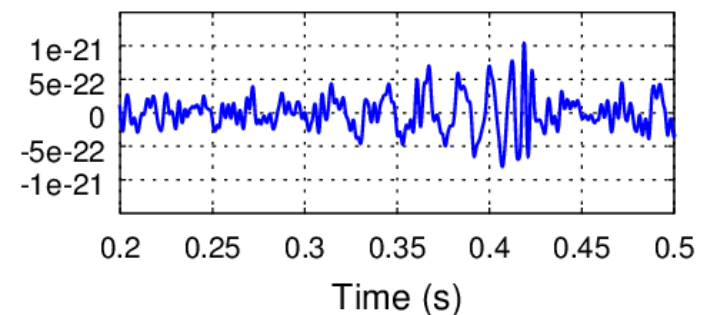
Bandpass filtered



Bandpass filtered & notch

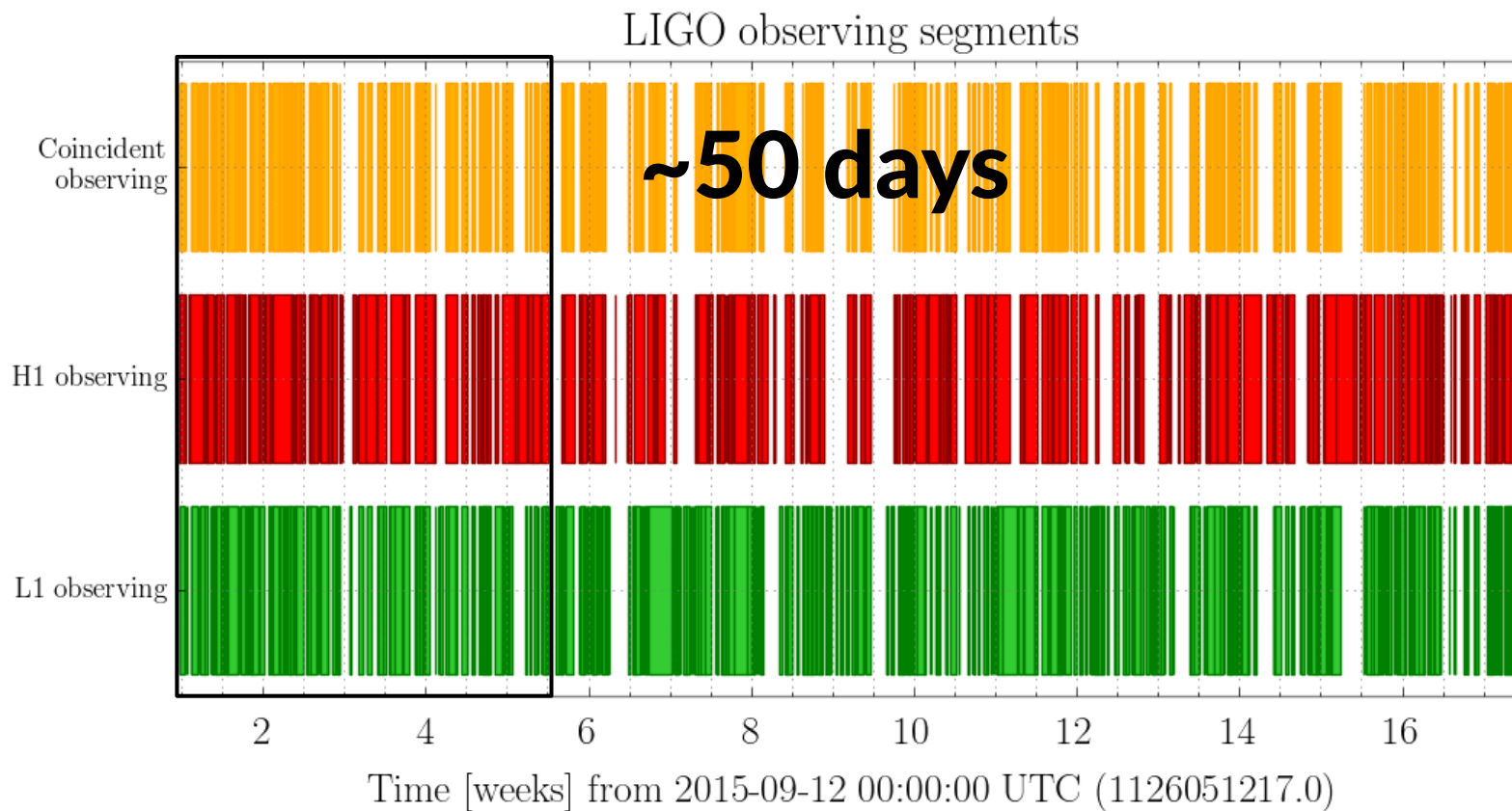


Bandpass filtered & notch

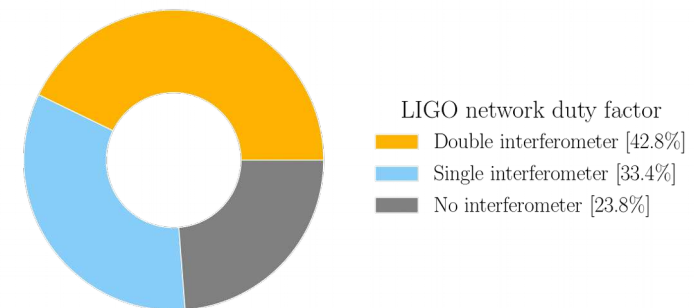


$\div 500$

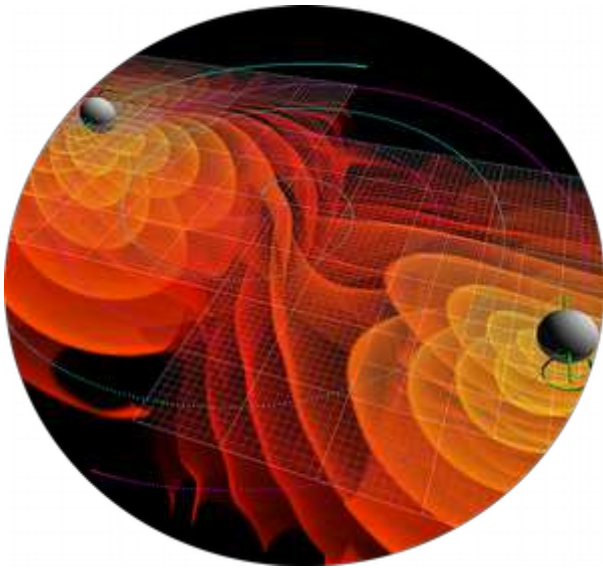
O1 : sep 2015 à jan 2016 – 4 mois



~30 TB for operation/environment data set
~150 GB for science data product
7 millions segments, average 10,000 sec

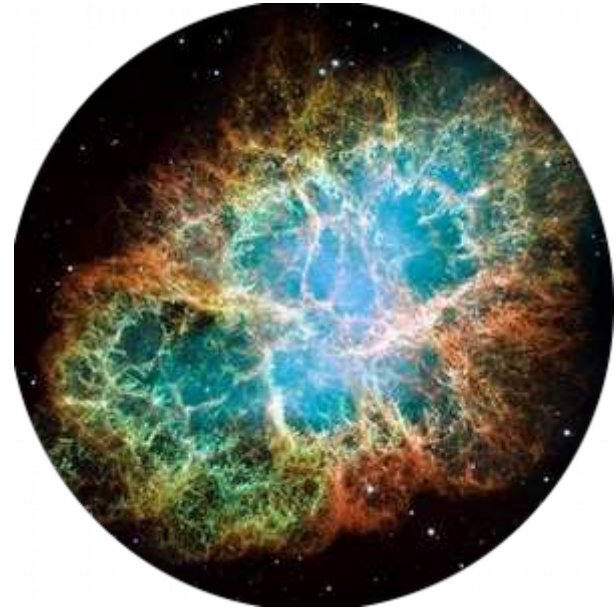


Comment cherche-t-on les signaux transitoires ?



Avec un modèle

Filtrage adapté



Sans modèle

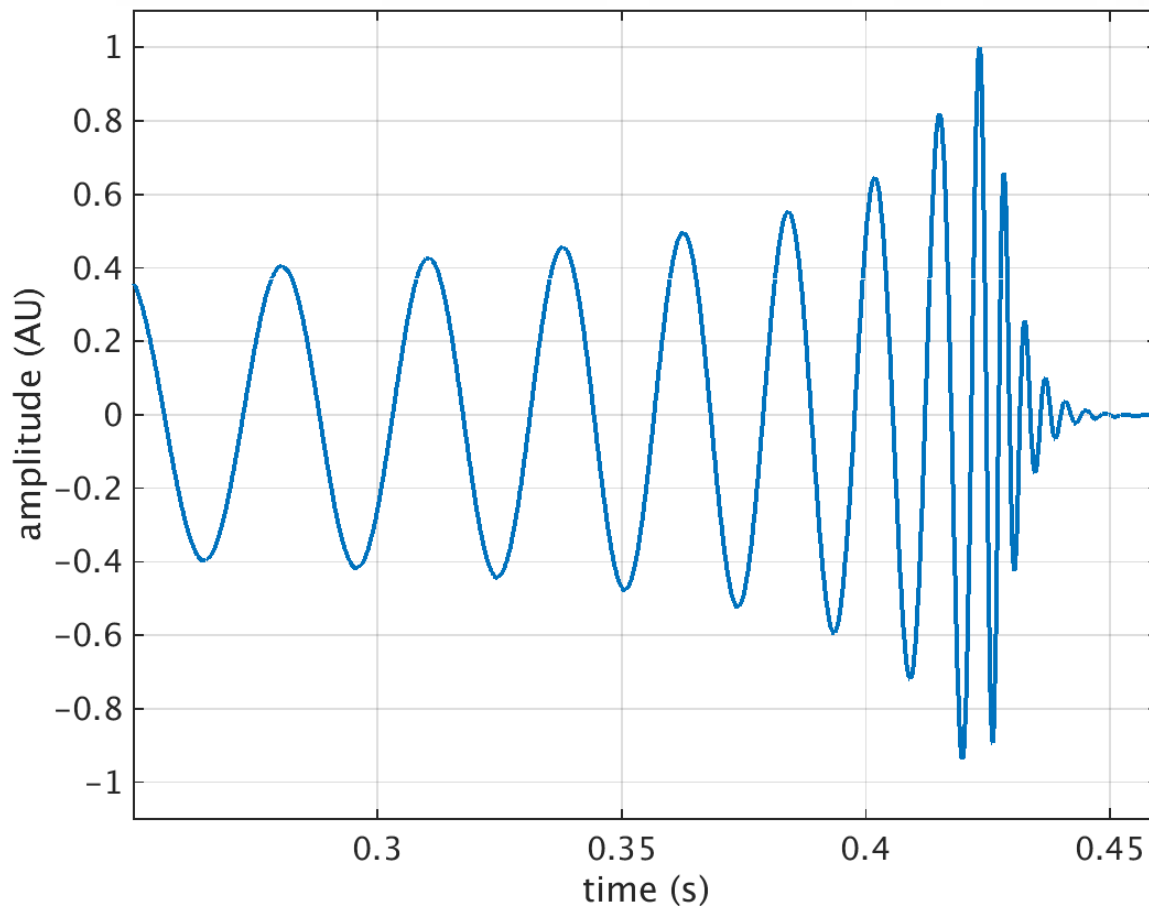
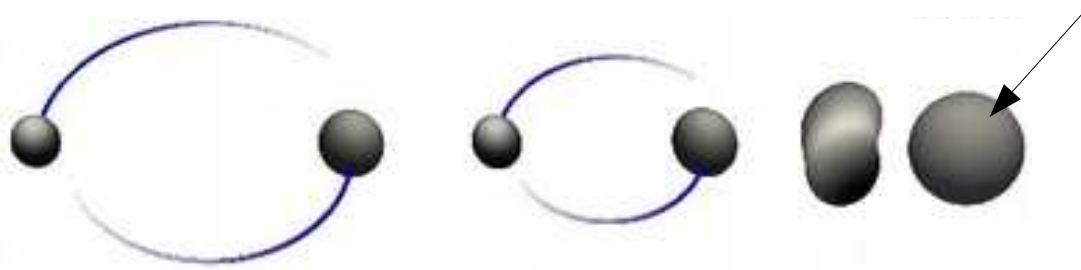
Temps-fréquence
Ondelettes

Fusion de trous noirs

spirale

fusion

désexcitation



Signature gravitationnelle
caractéristique “chirp”

$$f_{\text{OG}} \approx 2f_{\text{orb}}$$

m_1, m_2 et spins

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$



Filtre adapté (1)

Modèle du signal astrophysique

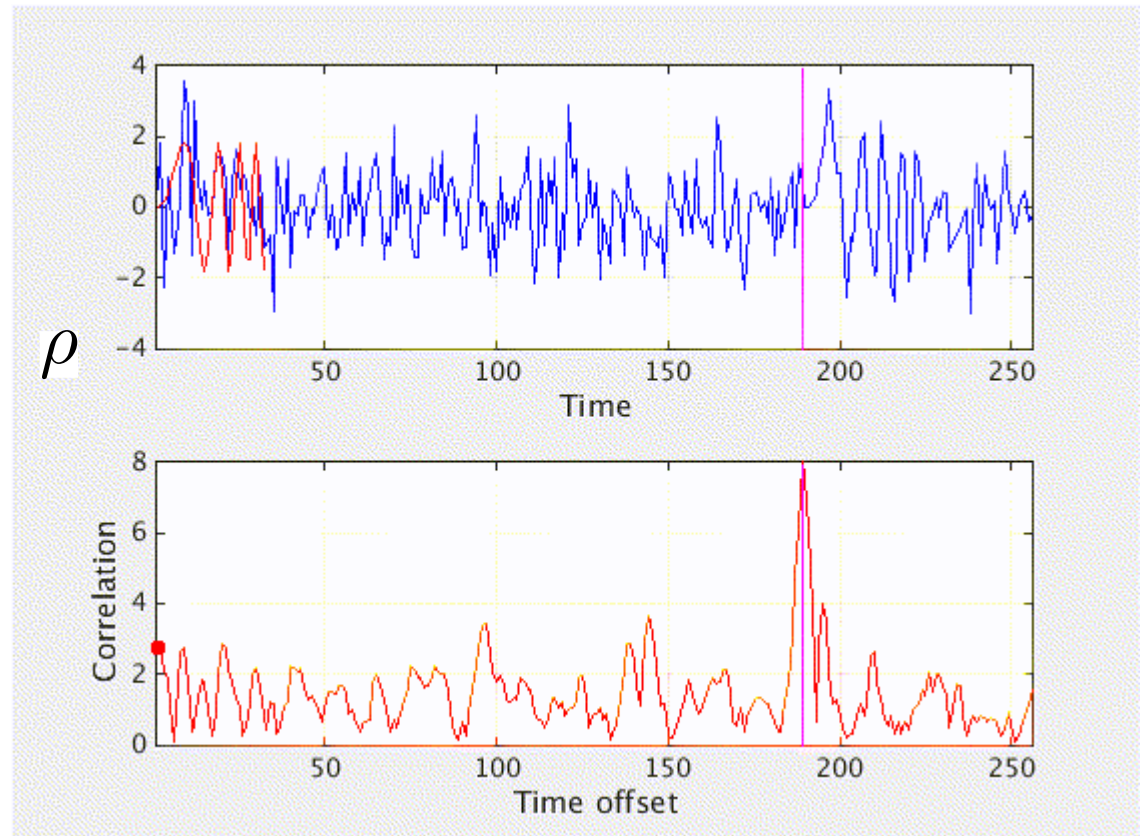
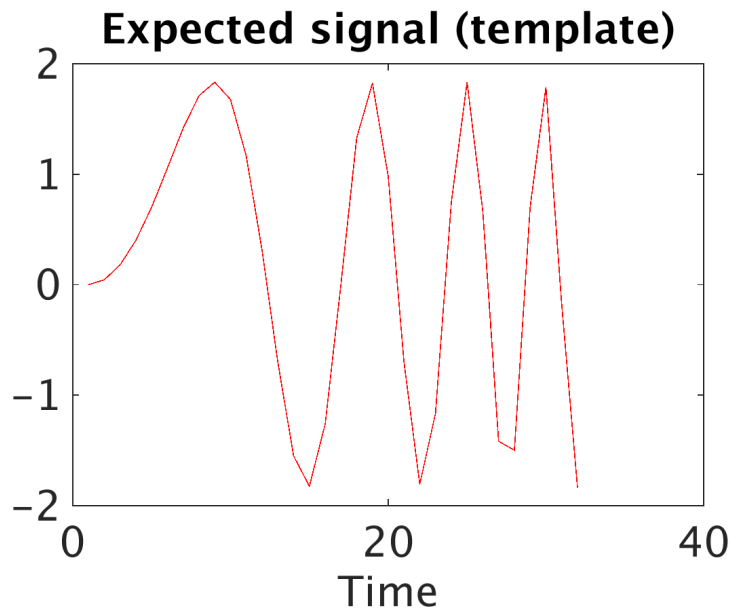
(patron d'onde, "template")

[Ici, un modèle-jouet]

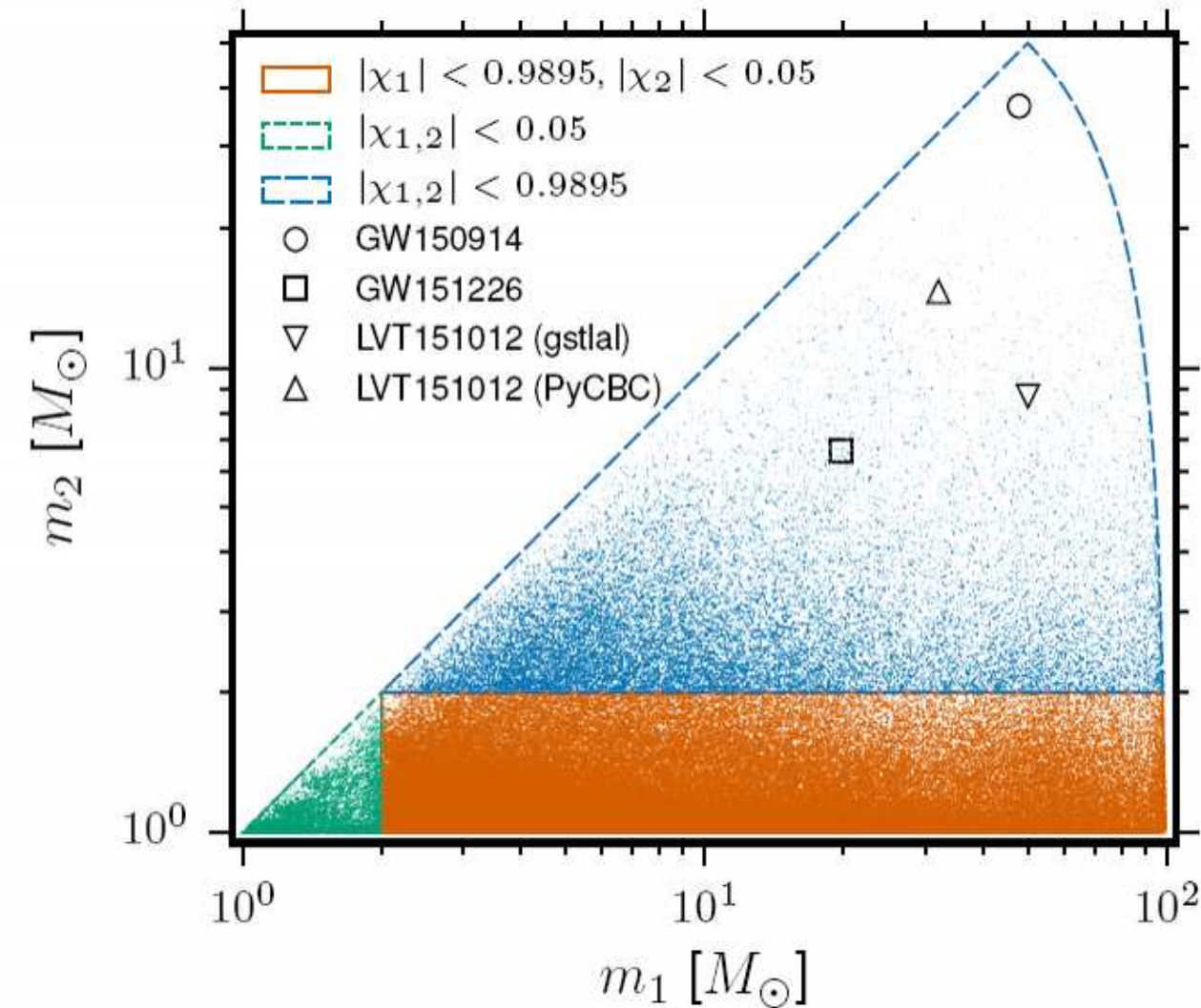


Filtre

Corrélation modèle-données



Filtre adapté (2)



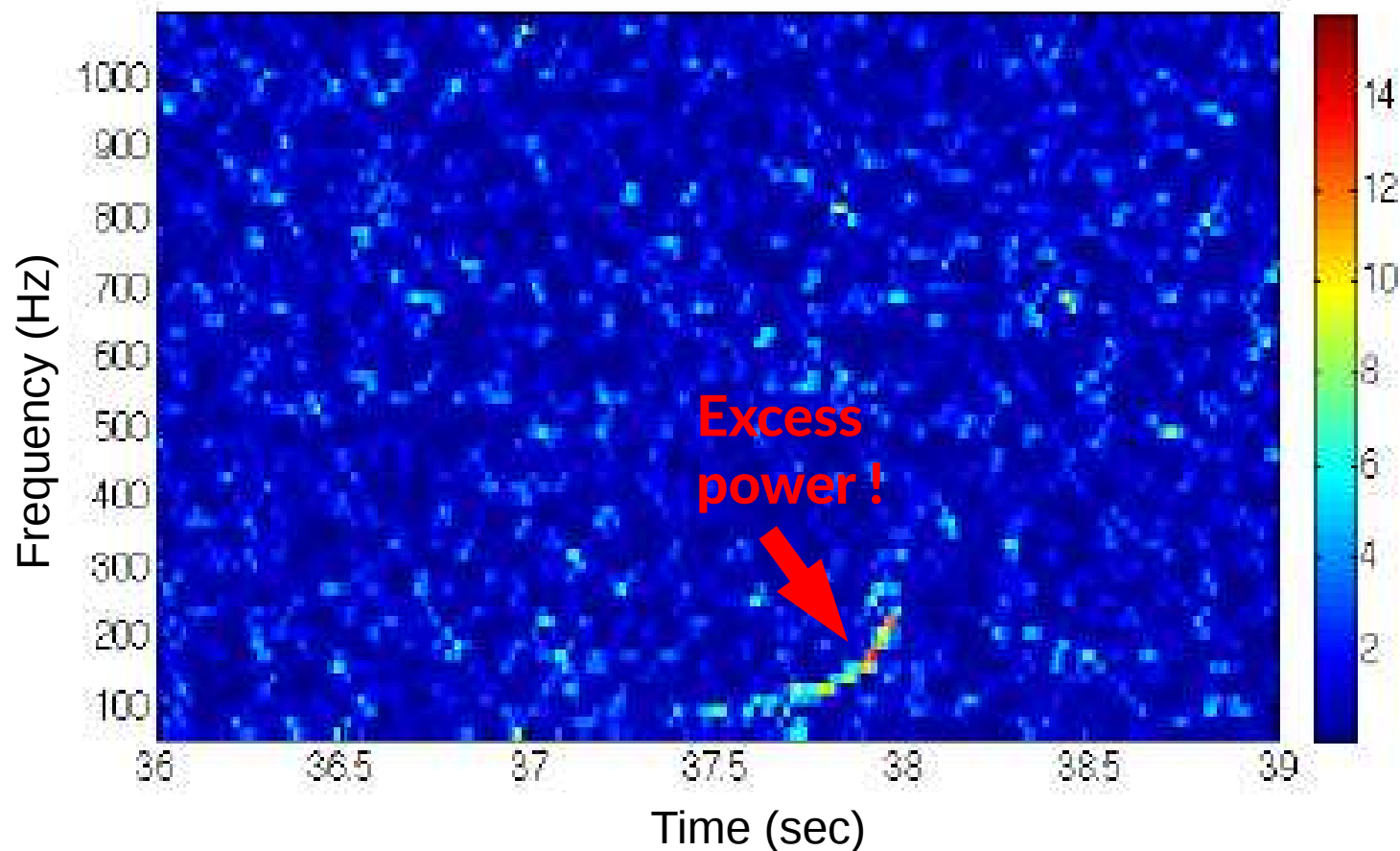
1 point = 1 filtre
250 000 filtres !

On retient les événements
en **coïncidence temporelle**
sur deux détecteurs
provenant du **même filtre**

Recherche temps-fréquence

Signaux transitoires = valeurs extrêmes dans
une distribution temps-fréquence

Time-frequency representation



Recherche temps-fréquence

- Décomposition en paquets d'ondes régulièrement distribués

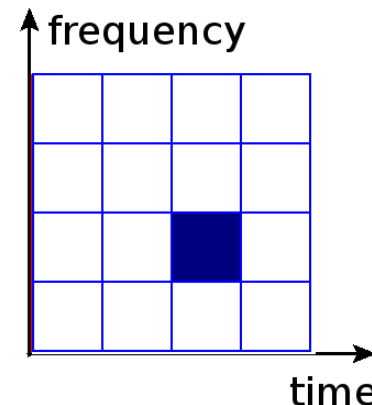
$$g_{m,n}(t) = e^{2i\pi\alpha mt} g(t - \beta n)$$

et bien localisés en temps *et* en fréquence

$$\int t^2 |g(t)|^2 dt < \infty \quad \int f^2 |\hat{g}(f)|^2 df < \infty$$

e.g. Gabor/Morlet

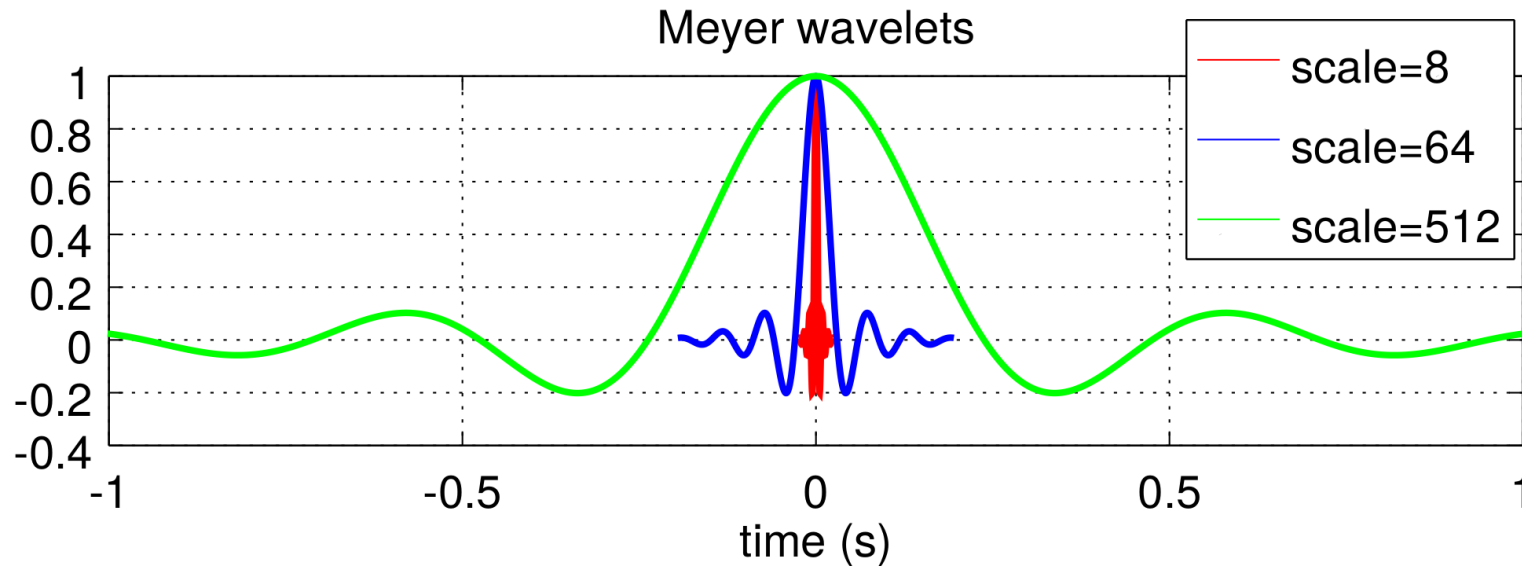
$$g(t) \propto e^{-\pi t^2}$$



- R Balian & F Low (1981): base orthonormale impossible
- Contournement suggéré par K G Wilson (1987), Generalized Wannier Functions Daubechies, Jaffard & Journé (1991) → Wilson basis

remplacer l'exp complexe par des cos et sin alternés

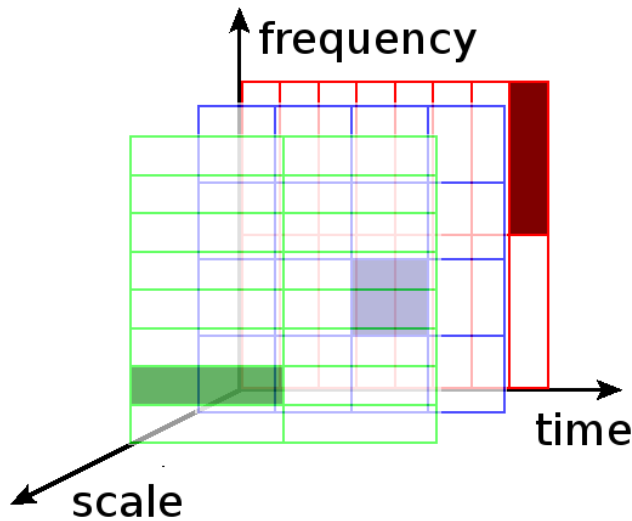
Coherent WaveBurst (1)



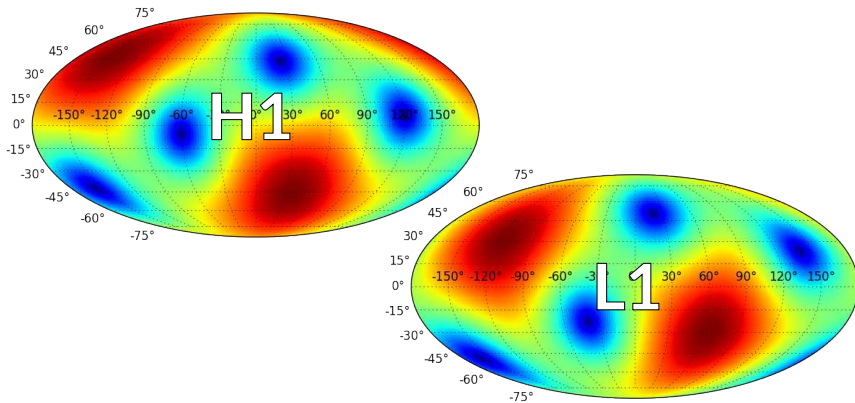
- Transformées de Wilson à **plusieurs échelles**
- Basées sur la **fonction d'échelle de Meyer**

Pourquoi des bases orthogonales?

Représentations compactes, gain algorithmique pour l'application de décalage temporel directement dans le domaine temps-fréquence



Coherent WaveBurst (2)

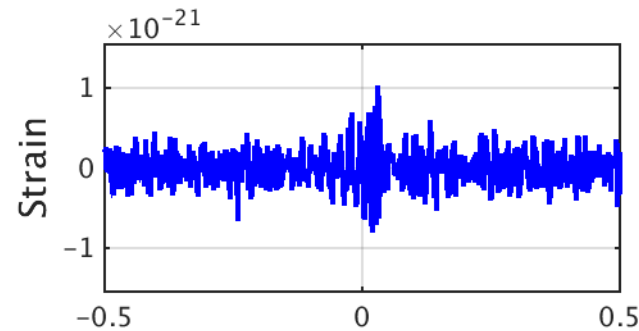
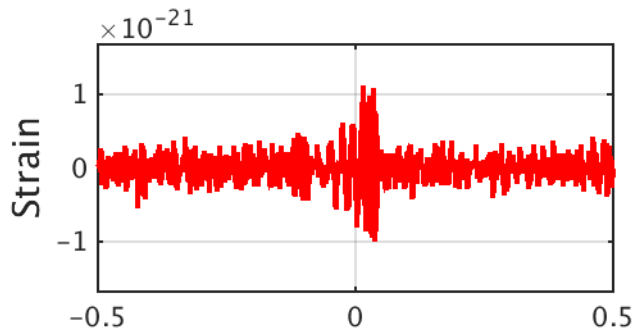


$$\begin{bmatrix} x_H \\ x_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_H^+ & F_H^\times \\ F_L^+ & F_L^\times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_+ \\ h_\times \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_H \\ n_L \end{bmatrix}$$

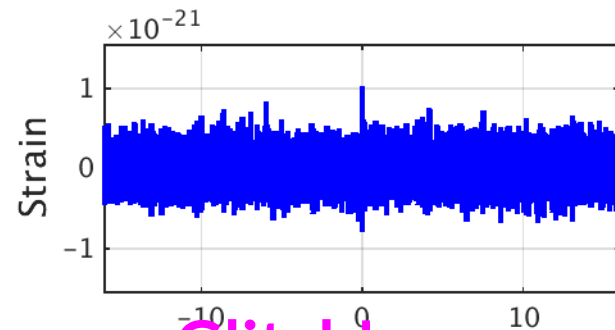
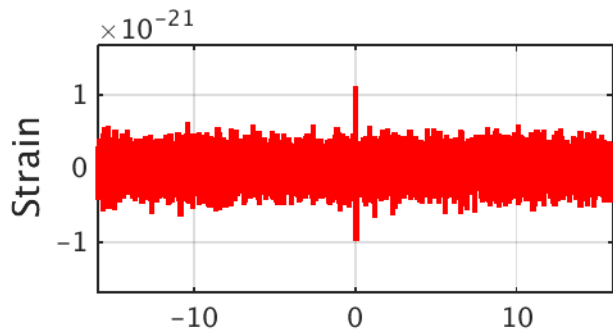
- Réseaux de détecteurs
 - Reçoivent la même onde gravitationnelle
- Recherche de signaux *cohérents* (en phase)
 - Formation de voie (radar, radioastro)
 - Compensation du délai de propagation et décalage de phase
 - Identifier des pixels temps-fréquence cohérents
- La relativité générale n'est pas requise
 - Peut détecter des sources non-anticipées

Bruit “impulsionnel” – *Glitch*!

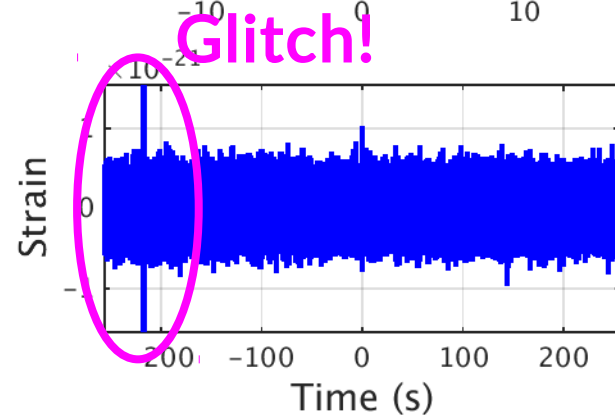
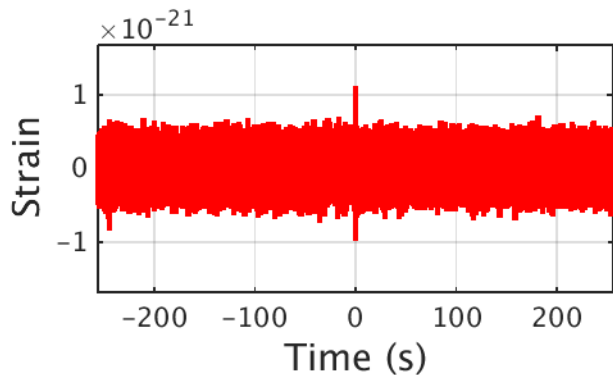
second



~minutes

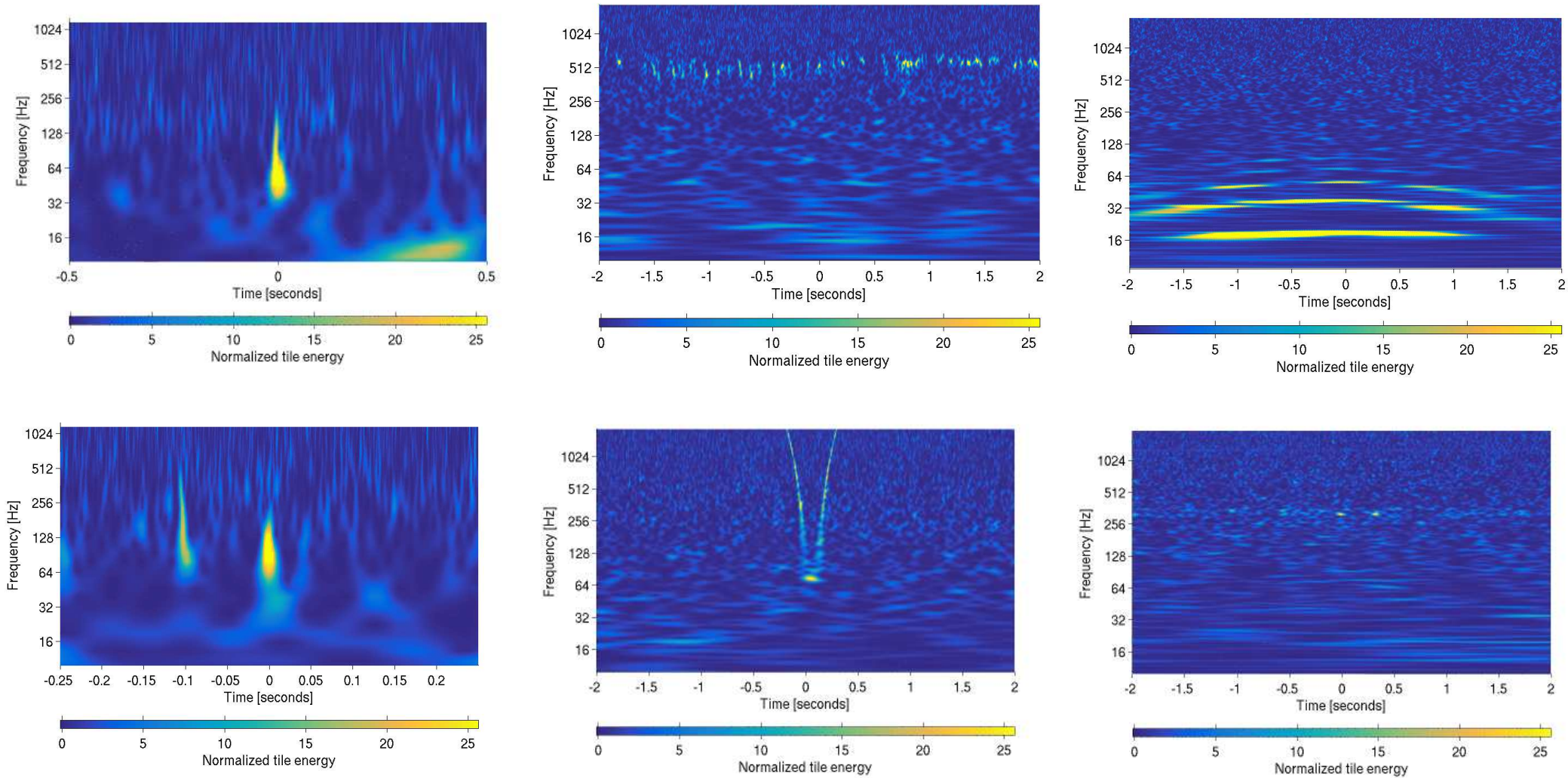


~ 10 minutes



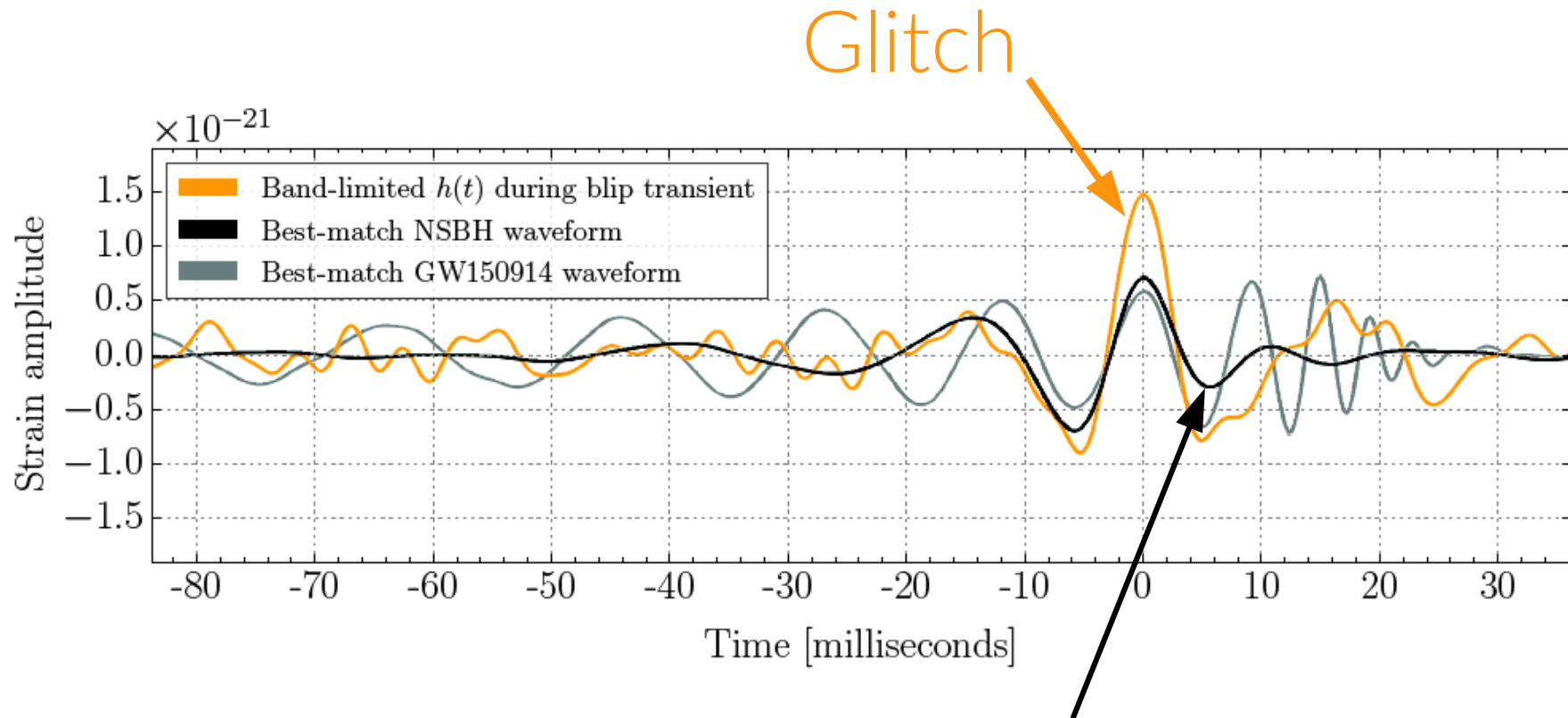
1 toutes les quelques secondes à 1 toutes les 20 mins

Glitch zoo



Credits: Coughlin, Smith et al, Gravity-spy zooniverse.org

Les glitches peuvent ressembler aux ondes gravitationnelles



Onde gravitationnelle (modèle)

Les glitches limitent la sensibilité
(peuvent masquer les vrais signaux)

Qualité des données et statistique

Réduire l'impact des glitches

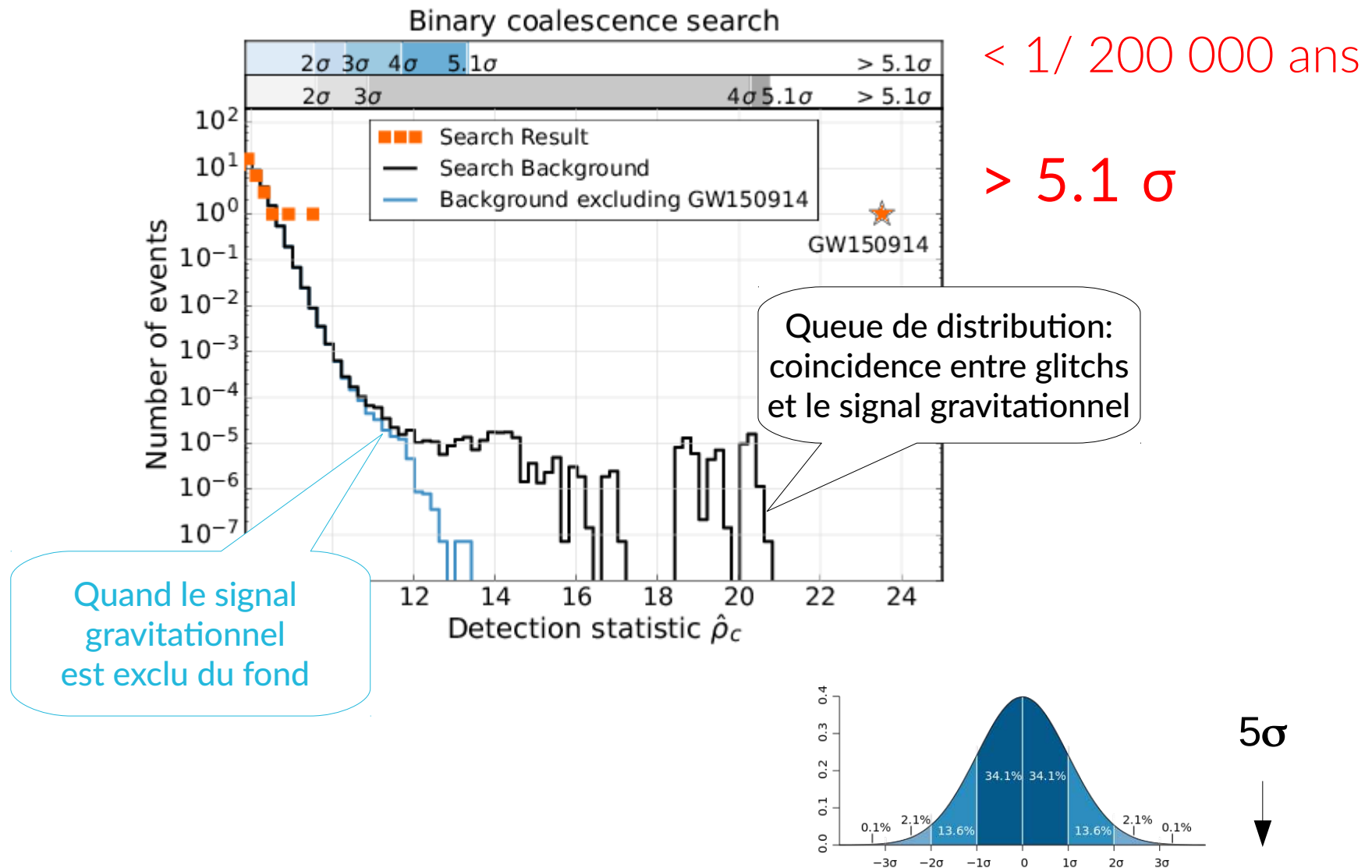
- Statistique “robuste”
 - ♦ Pondération par une mesure d'accord aux données
- Caractérisation de l'instrument et de son environnement
 - ♦ 200 000 mesures auxiliaires (seismo-, magnetometers, microphones, ...)
 - ♦ On écarte les événements quand on sait que les données sont mauvaises

Glitches inexpliqués

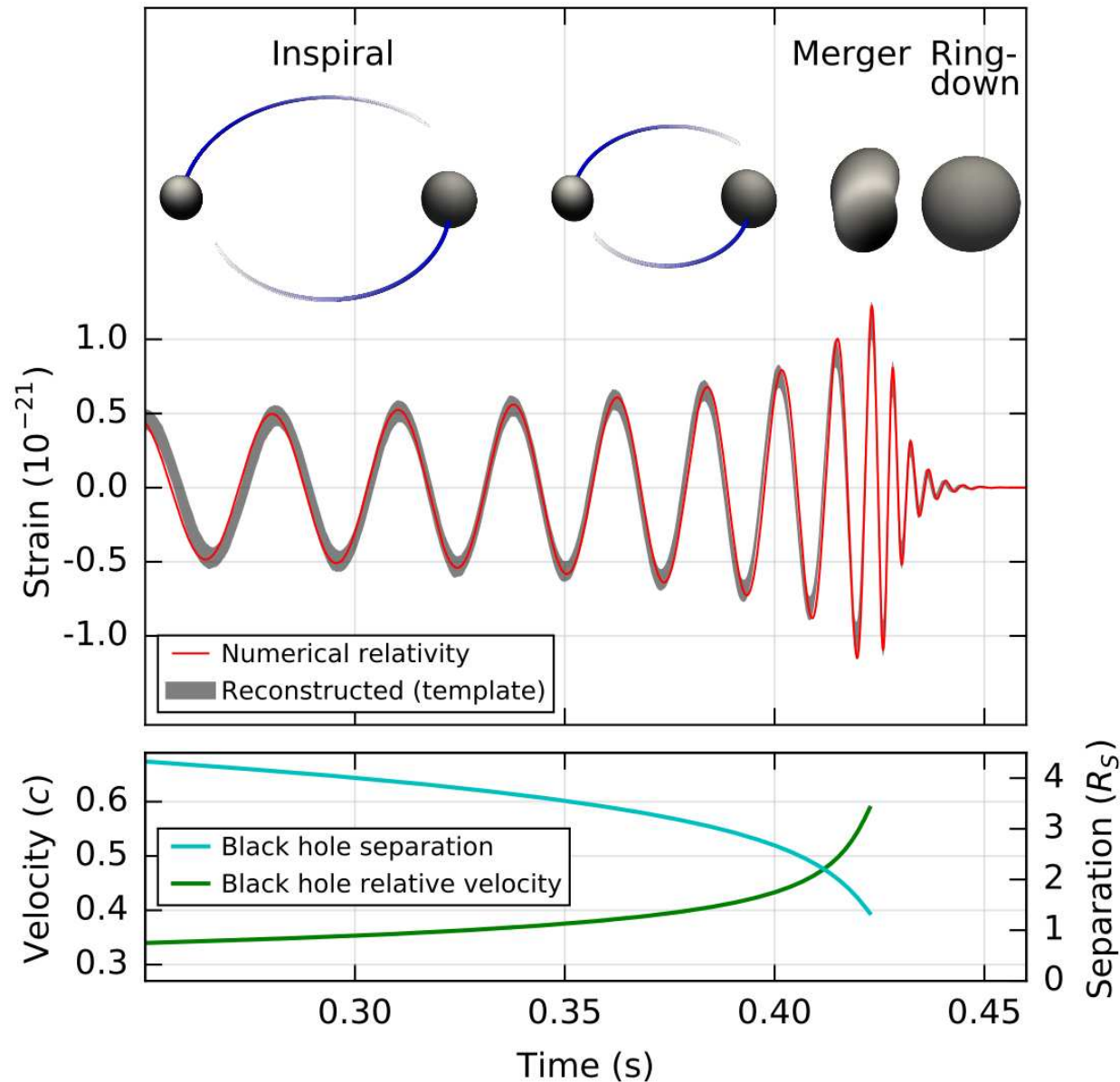
- Population impossible à modéliser
- Estimation empirique via des **données de substitution** par des décalages temporels non-physiques entre détecteurs
 - ♦ Monte Carlo – 200 000 années de données “fictives” analysées
 - ♦ Partie dominante du calcul
- → Fréquence d'occurrence des glitches en coïncidence
 - ♦ Signification statistique – Règle des **5 écarts types** (1/1.7 million)

Signification statistique

Matched filtering



“Décrypter” le signal gravitationnel

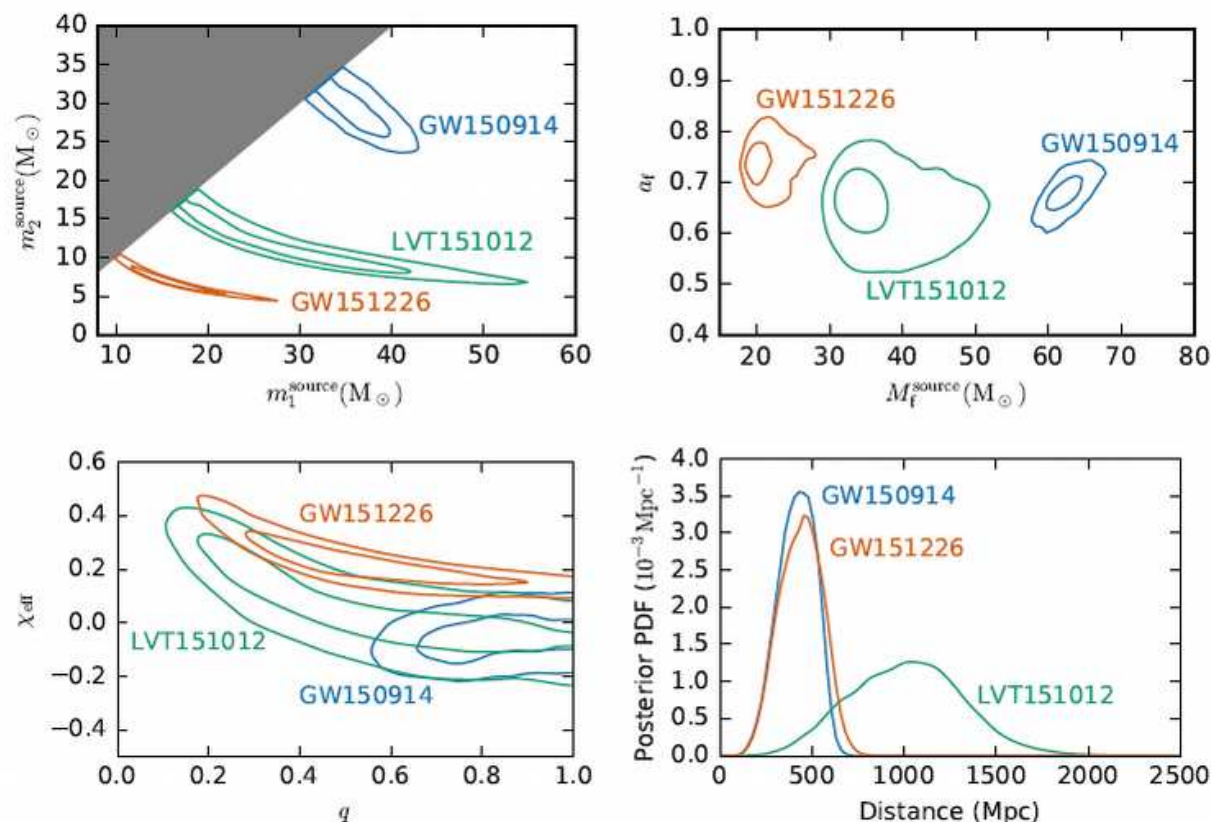


Estimation des paramètres astrophysiques

11 paramètres = masses et spins (= 4) + géométrie

Template de meilleur accord fournit une estimation peu précise

Distribution a posteriori via **inférence bayésienne et analyse cohérente**



Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio ρ	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr ⁻¹	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}	0.045
Significance	$> 5.3\sigma$	$> 5.3\sigma$	1.7σ
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	23^{+18}_{-6}
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	13^{+4}_{-5}
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	37^{+13}_{-4}
Effective inspiral spin χ_{eff}	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	35^{+14}_{-4}
Final spin a_f	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance D_L/Mpc	420^{+150}_{-180}	440^{+180}_{-190}	1000^{+500}_{-500}
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$	230	850	1600

GW150914

$$E_{\text{rad}} \approx 3M_\odot c^2 \sim 5 \times 10^{47} J$$

en 0.2 s

$$L_{\text{rad}} \sim 3 \times 10^{48} W$$

Événement astrophysique le plus
lumineux jamais observé

Estimation de derrière d'enveloppe de la
luminosité de l'Univers = $10^{48} W$

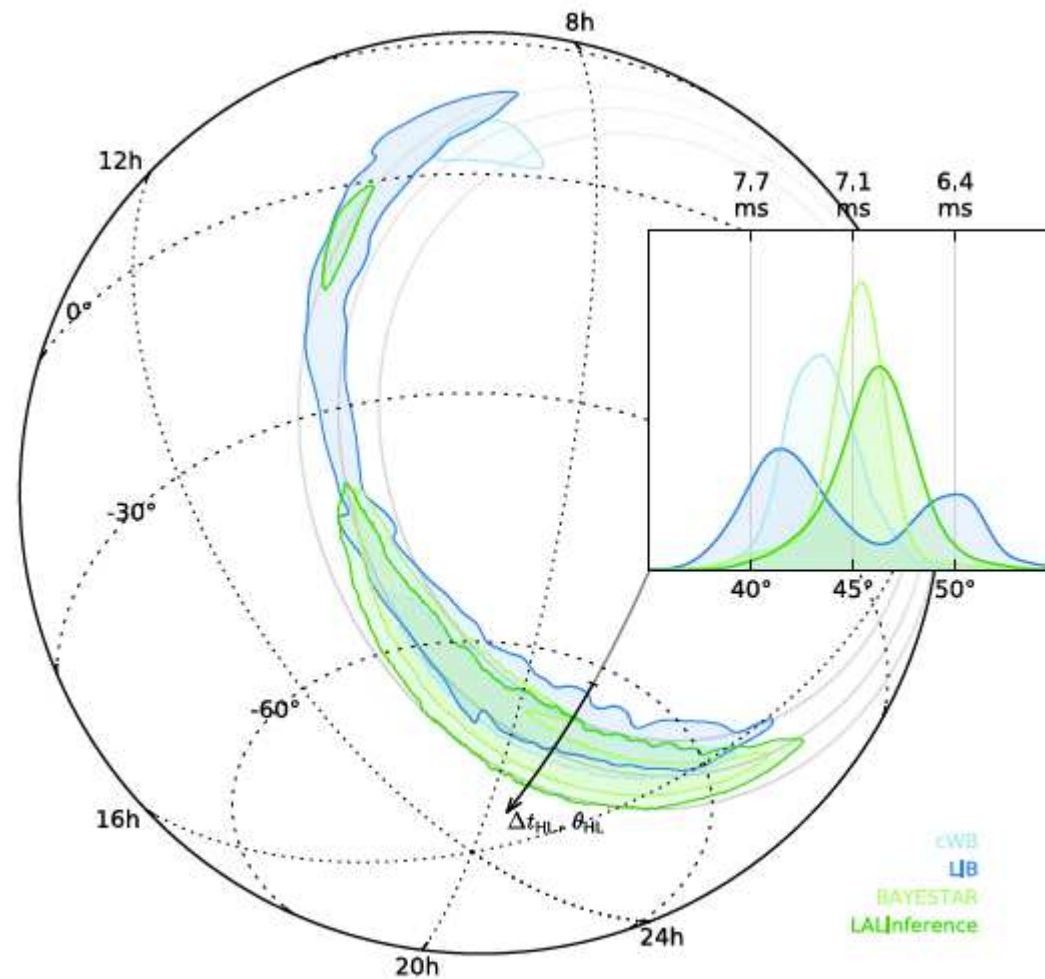
10^{11} étoiles par galaxie

10^{11} galaxies dans l'Univers

Luminosité d'une étoile $\sim 10^{26} W$

Position de la source

GW150914

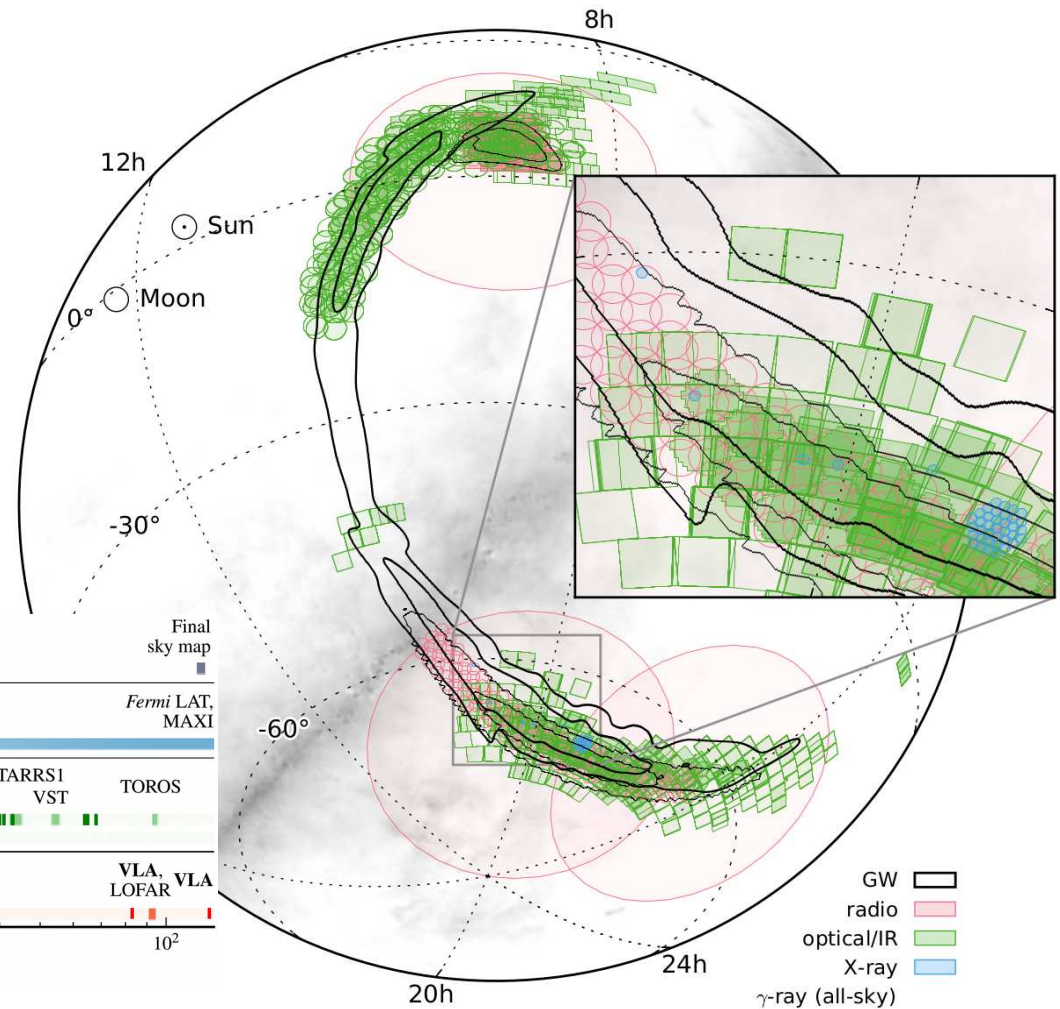
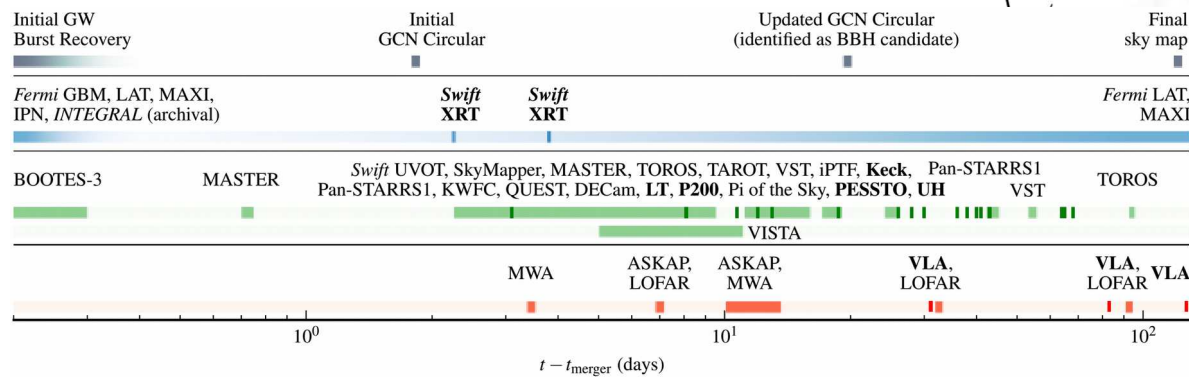


600 degrés carrés

Suivi électromagnétique

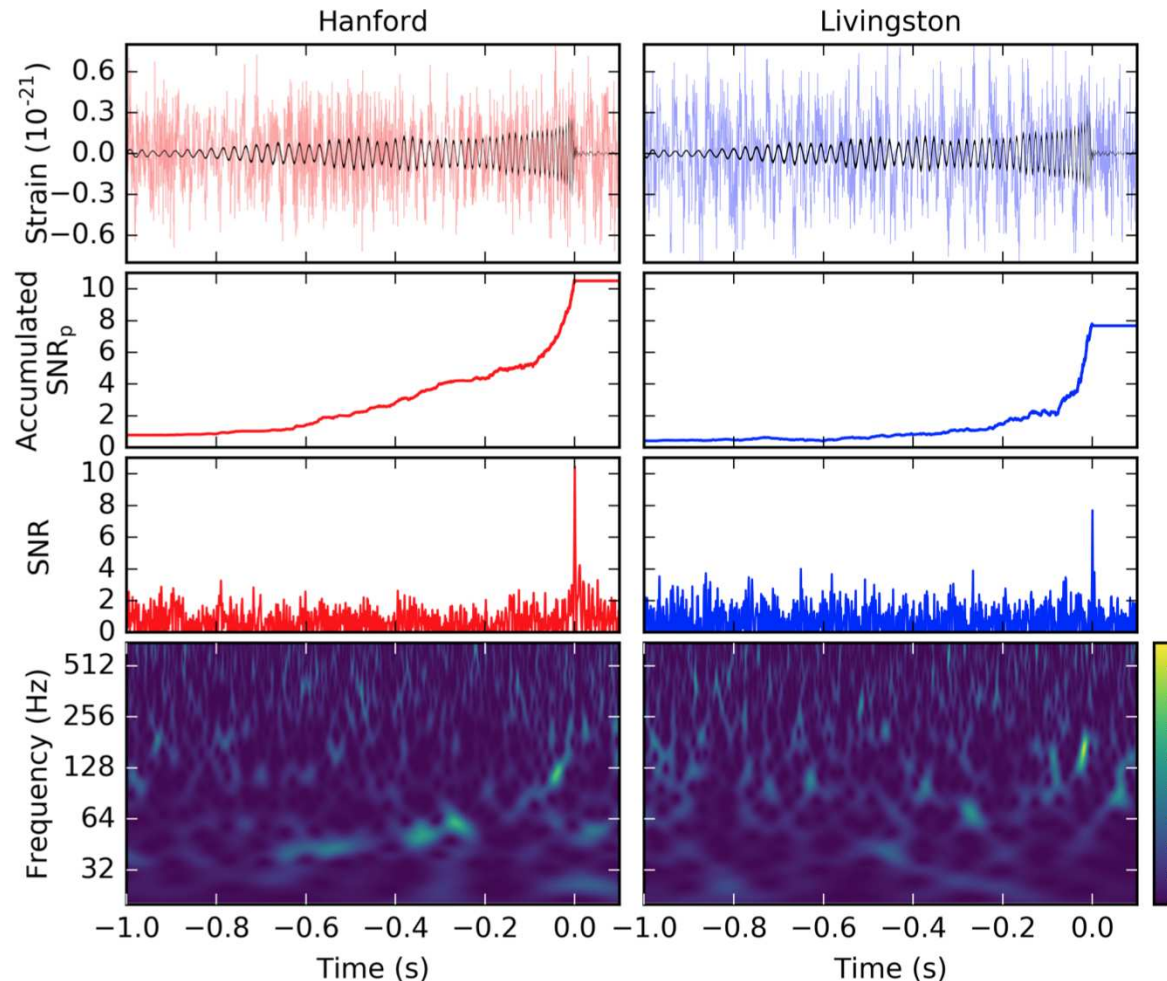
GW150914

Observations par 25 équipes



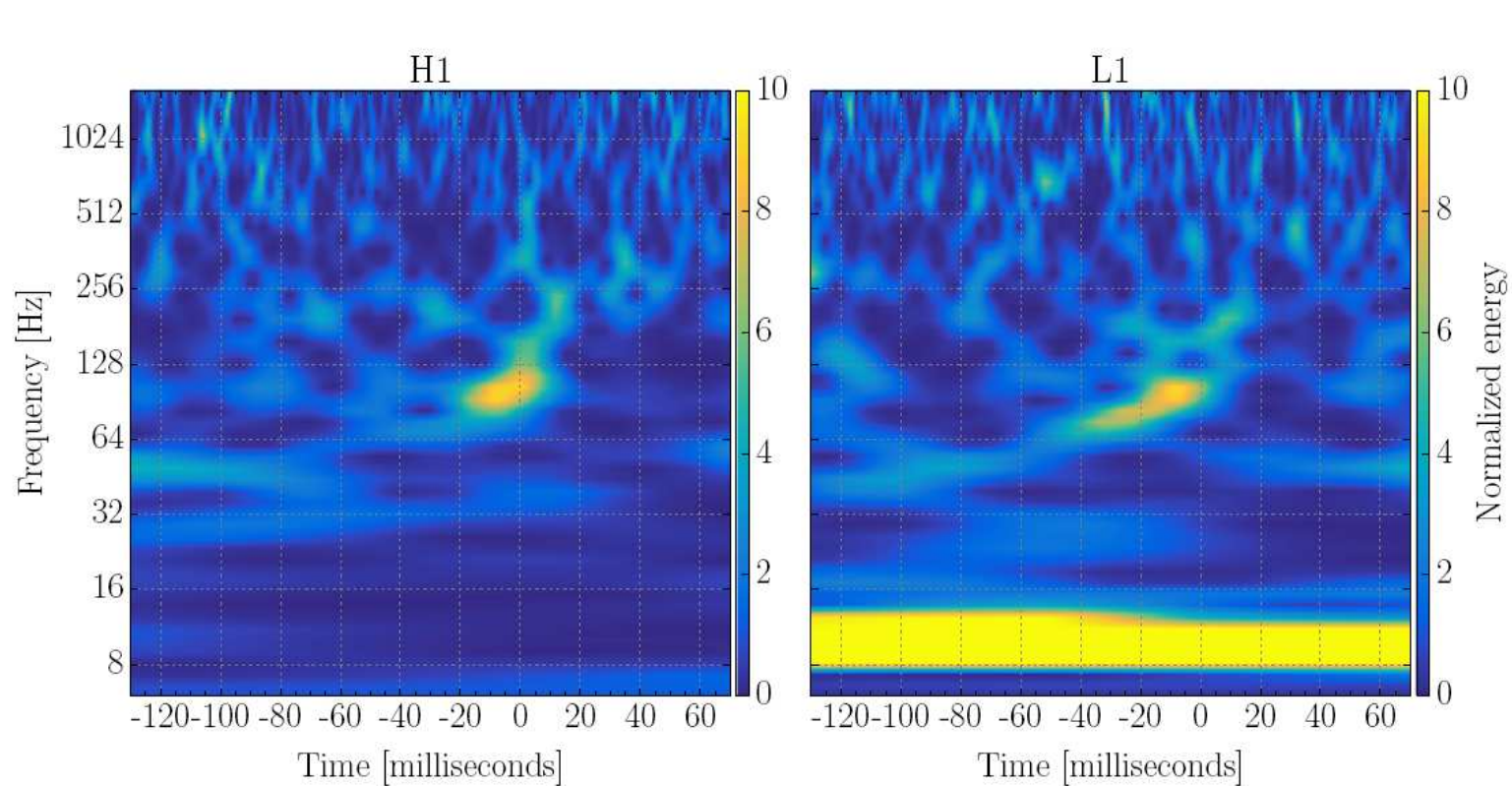
Pas de contrepartie convaincante
Ce qui n'est pas nécessairement surprenant

Dec 26 2015 03:38:53 UTC



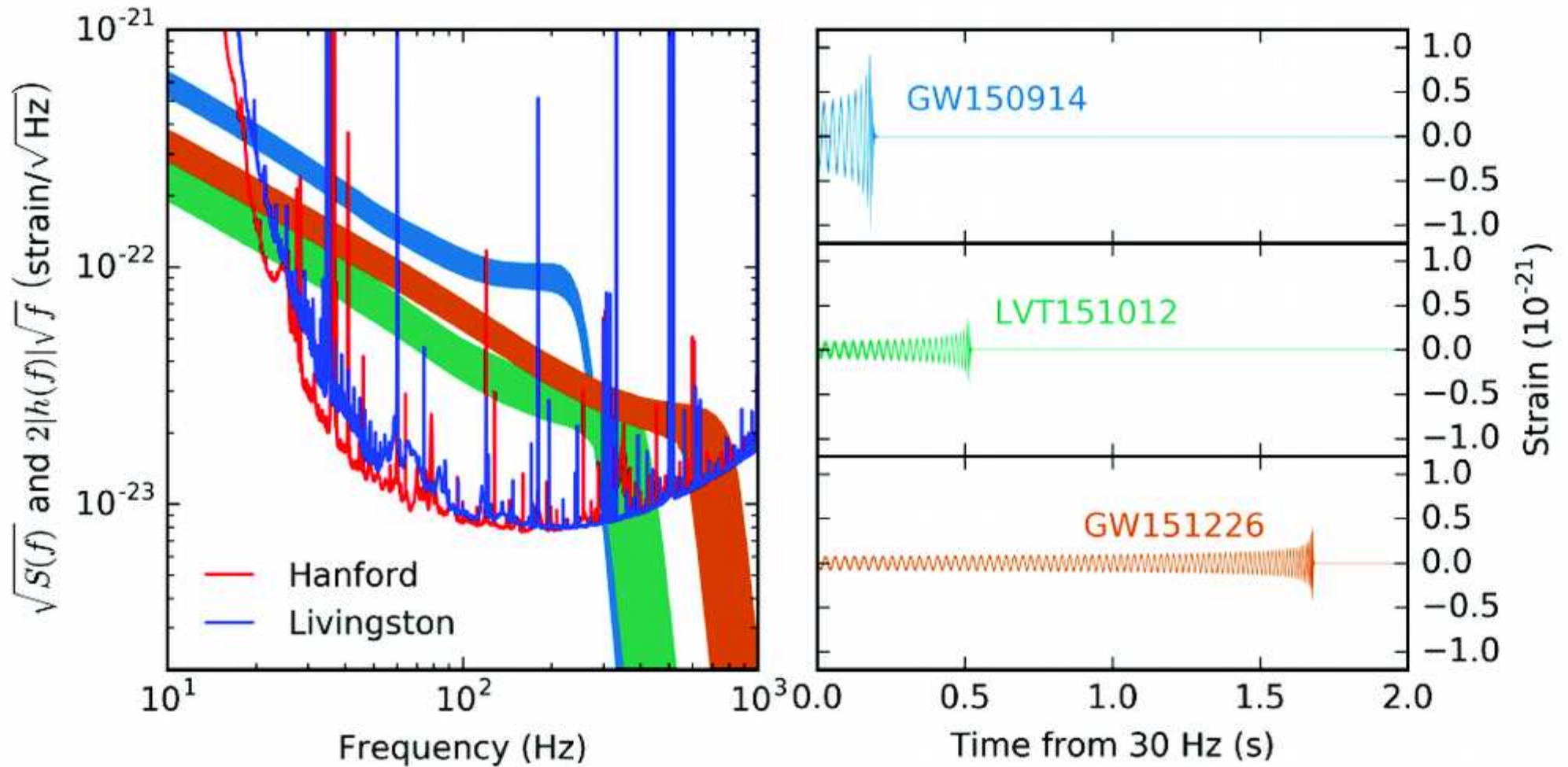
Merger of $14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$ and $7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$ black holes at 440^{+180}_{-190} Mpc

Oct 12 2015 09:54:43 UTC

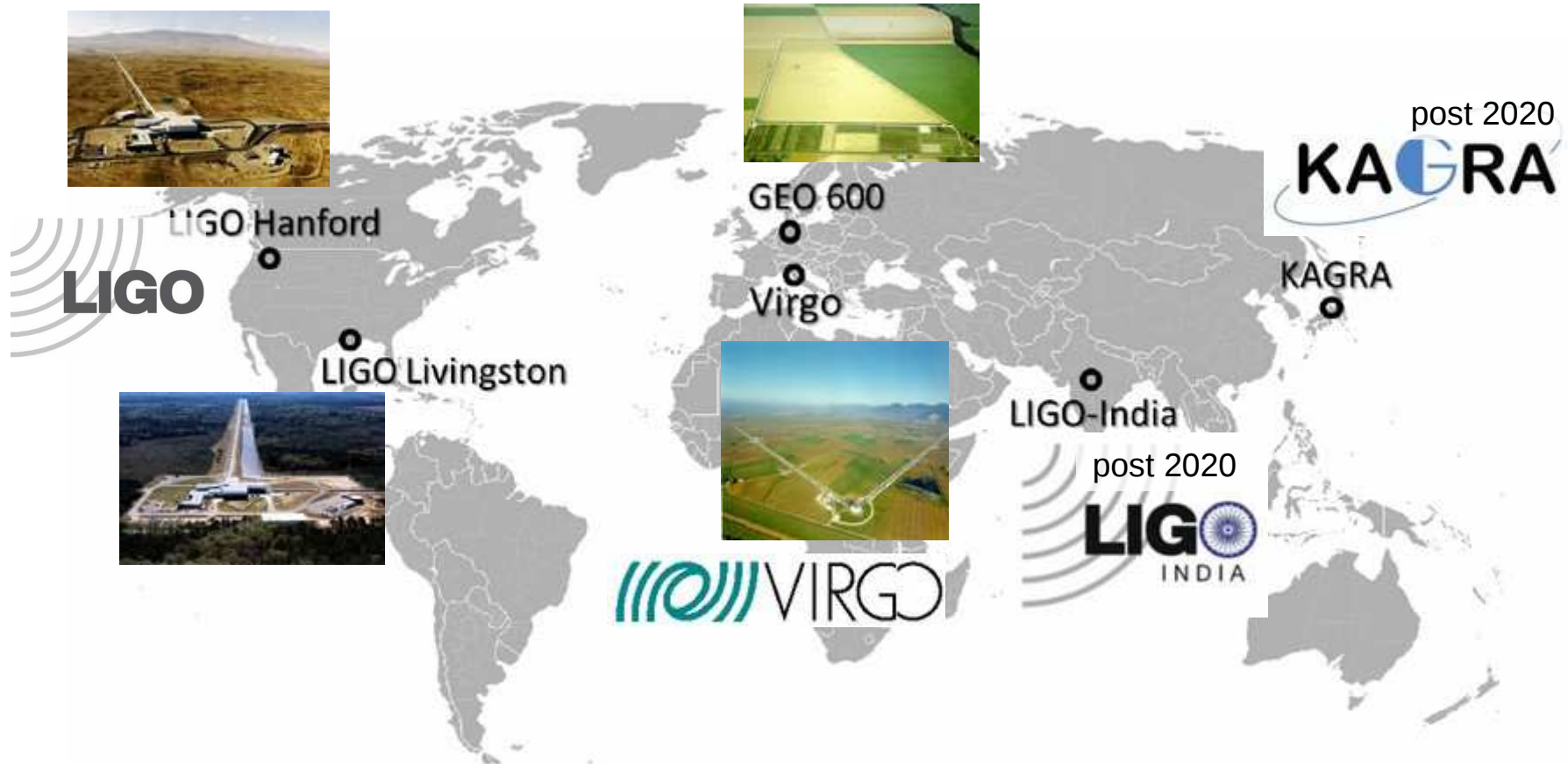


Likely merger of $23^{+18}_{-5} M_{\odot}$ and $13^{+4}_{-5} M_{\odot}$ black holes at 1100^{+500}_{-500} Mpc

Bilan – Science run O1



La suite ?



La suite ?

- Programme d'observation jusqu'en ~2022
 - ♦ Avec une amélioration progressive de la sensibilité
 - ♦ Prochaine prise de données imminente
 - ♦ Virgo en 2017 – Impact potentiel sur la localisation de la source
- 3^{ième} génération de détecteurs en projet
 - ♦ 10 fois plus sensible, volume observable 1000 fois plus grand !

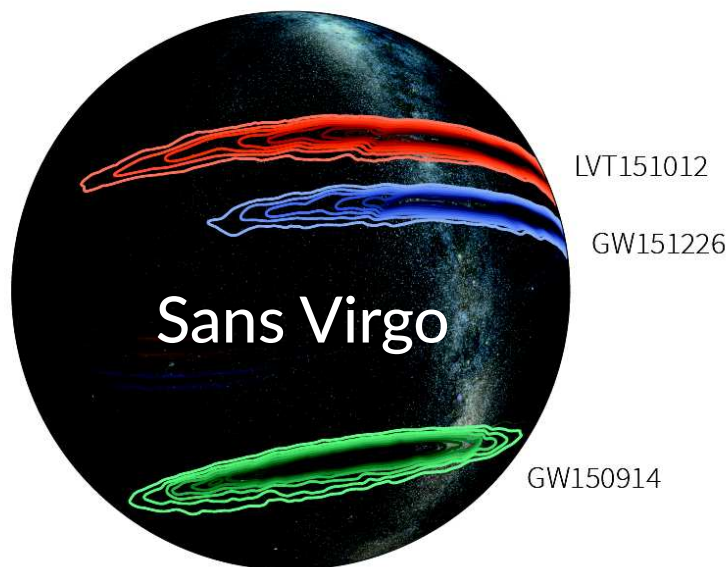


image credit: LIGO/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

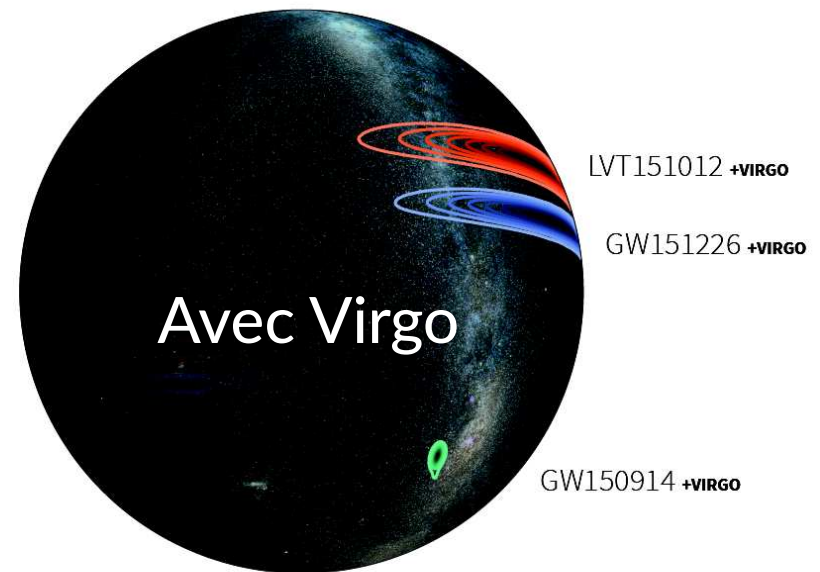
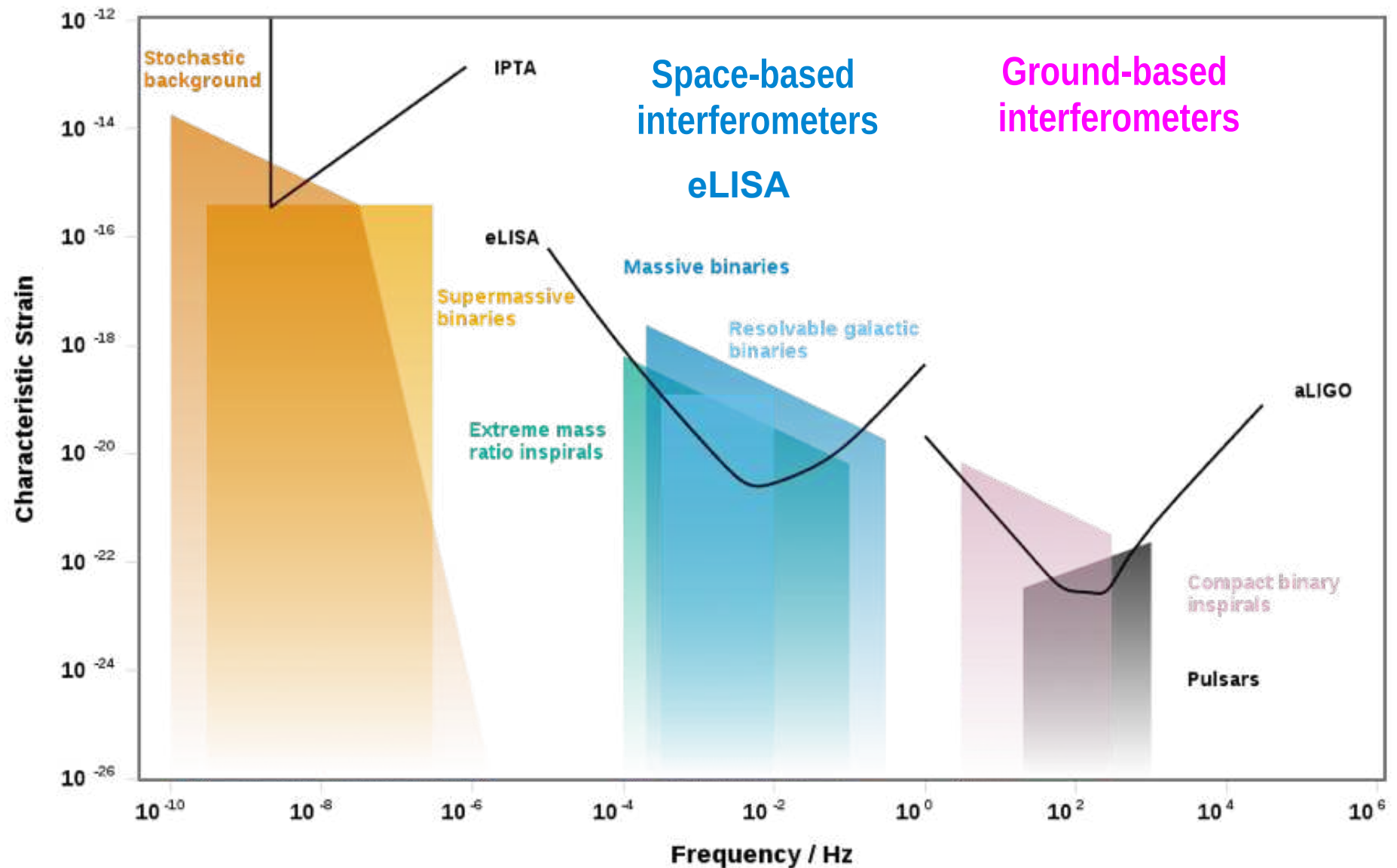


image credit: LIGO/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

L'astronomie gravitationnelle

Pulsar Timing Array



Conclusions

- **Détection directe des ondes gravitationnelles**
 - Observation d'une binaire de trous noirs et de la formation d'un trou noir
 - **Naissance d'une nouvelle astronomie !**
- **Analyse de données pour les ondes grav.**
 - Plus de 20 ans de recherche interdisciplinaire : physique (théorique – modélisation des source, expérimentale – détecteur) et maths, stats, info.
 - 50 millions CPU x hours
- **Prospectives**
 - Rejeter les glitches (facteur x 2): apprentissage ?
 - Accélérer l'estimation des paramètres
 - Combiner avec d'autres observations "multimessenger"



Ressources

Données, images et sons disponibles à

<http://losc.ligo.org> **et** <http://papers.ligo.org>