

# De l'analyse des données de LIGO et Virgo à l'astrophysique

**Eric Chassande-Mottin**  
CNRS AstroParticule et Cosmologie  
Paris, France

Coalescence of two black holes (credits: SXS)

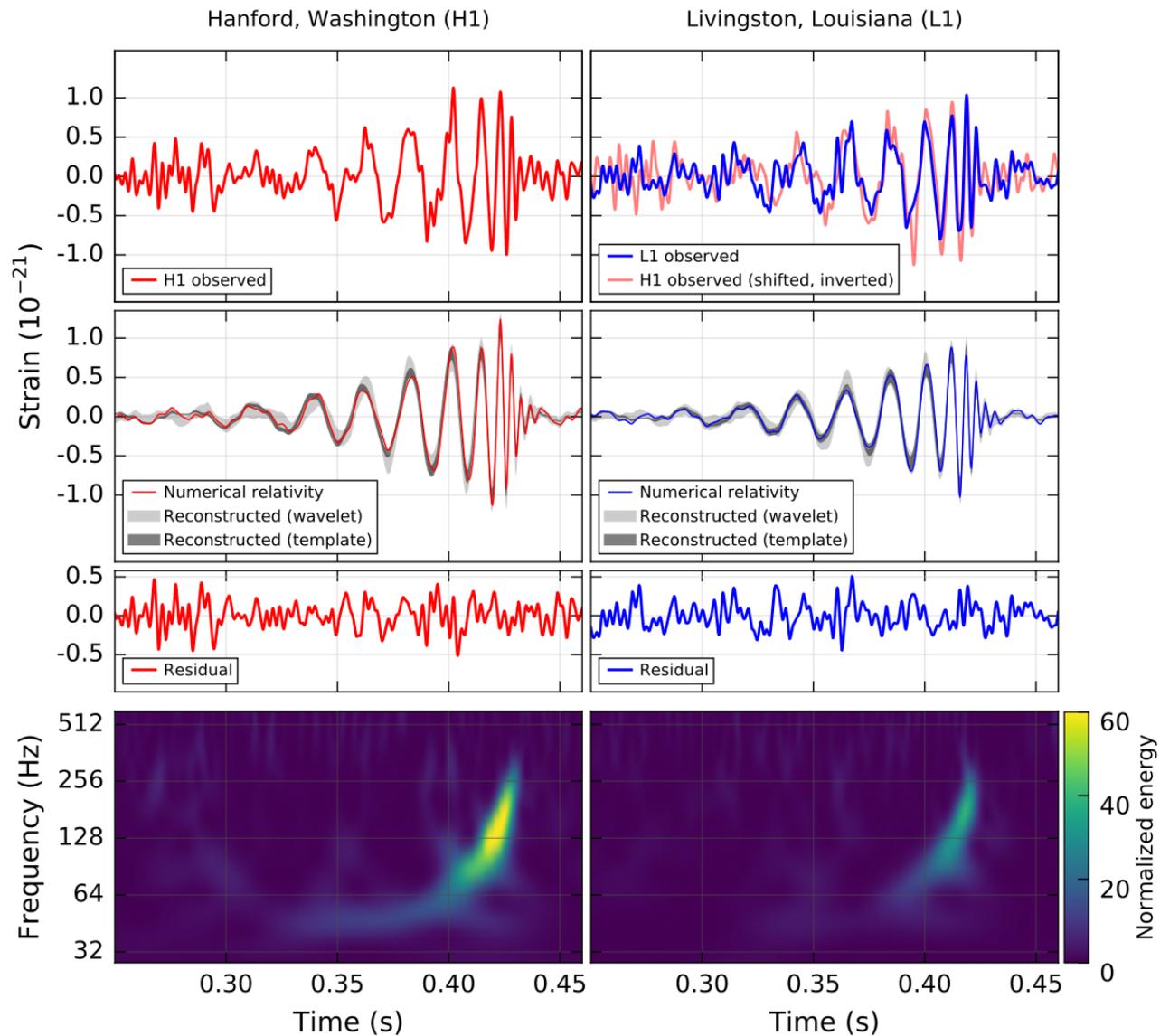


# Plan de la présentation

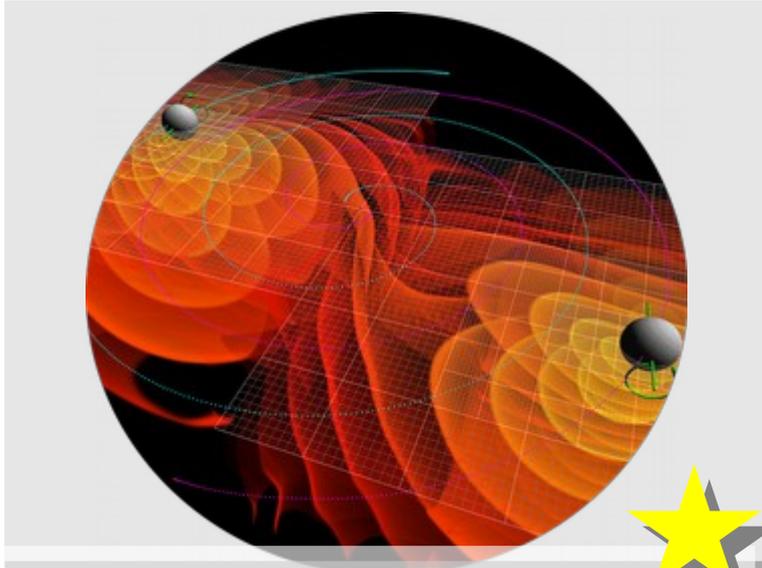
Tour d'horizon de l'analyse de données

Connection avec les observations  
astronomiques « conventionnelles »

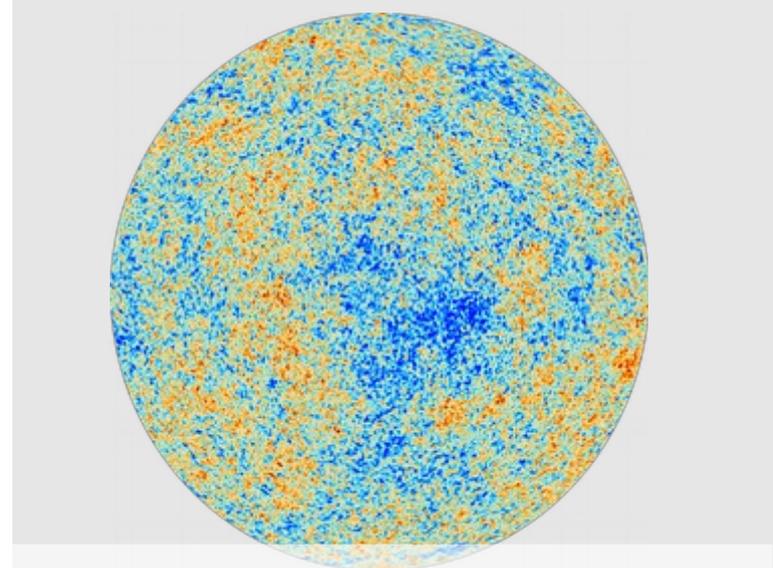
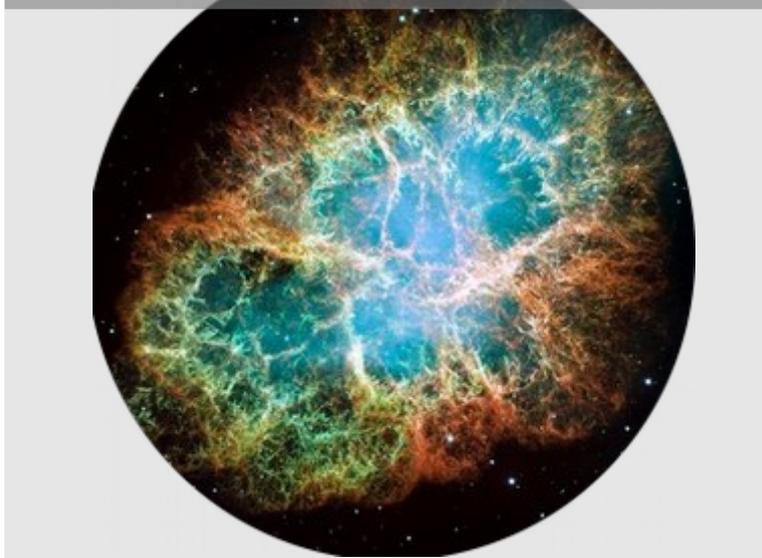
# Sep 14, 2015 09:50:45 UTC



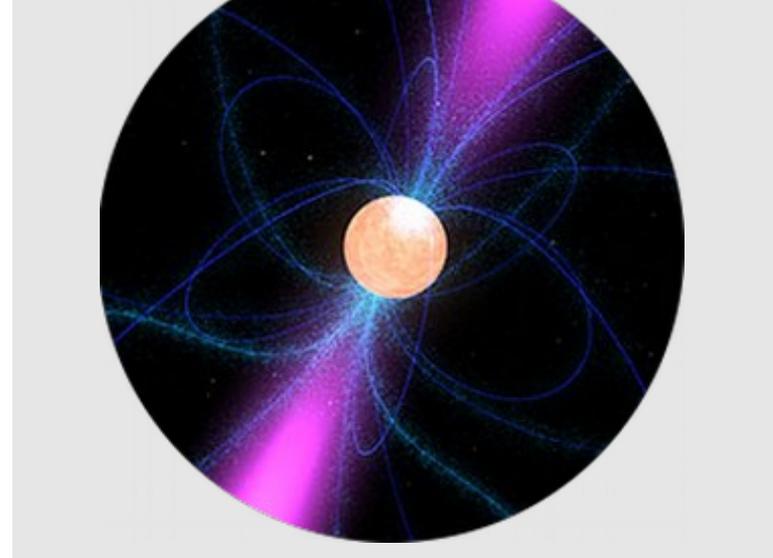
# Tour d'horizon de l'analyse de données



transitoire



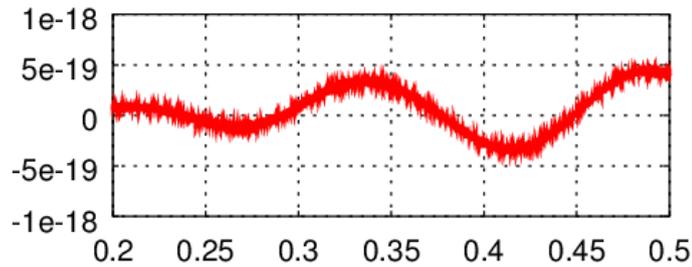
continue



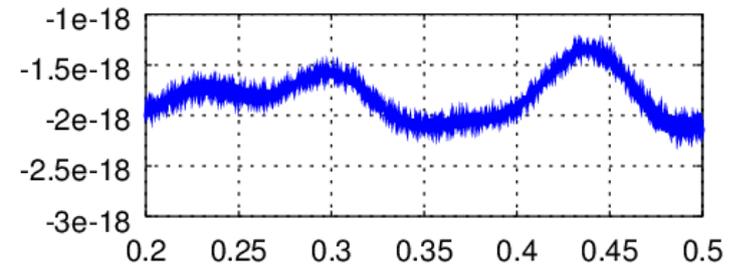
# En partant des données brutes (1)

$h(t)$

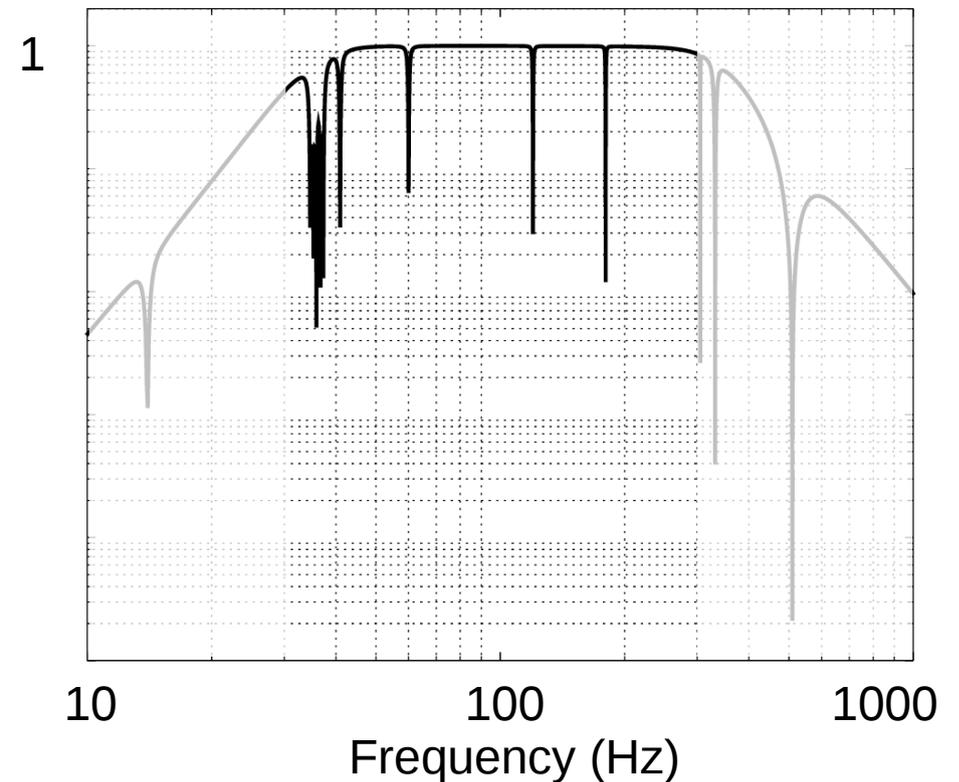
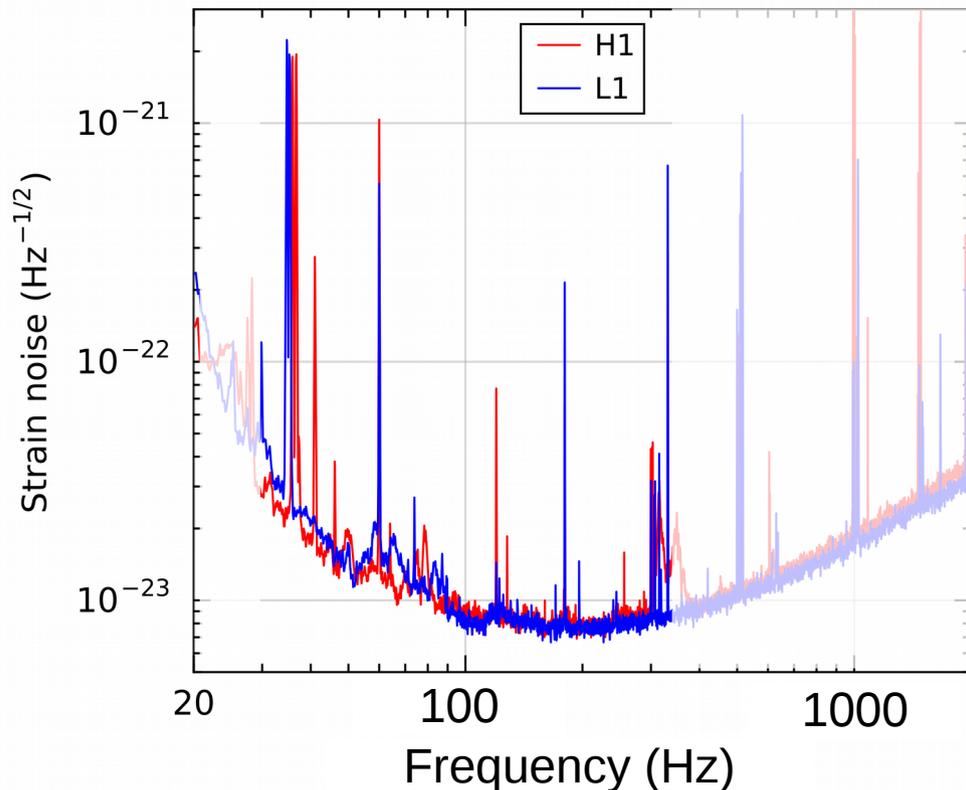
Hanford H1: raw data



Livingston L1: raw data



Bandpass filter + frequency notch



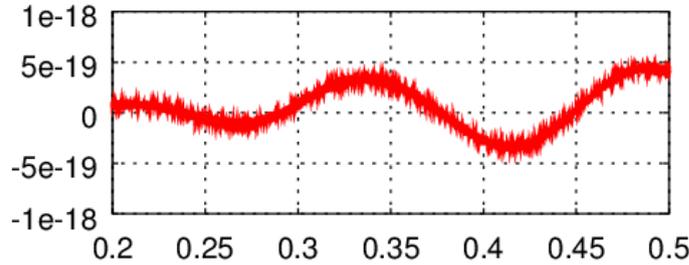
# En partant des données brutes (2)

$h(t)$

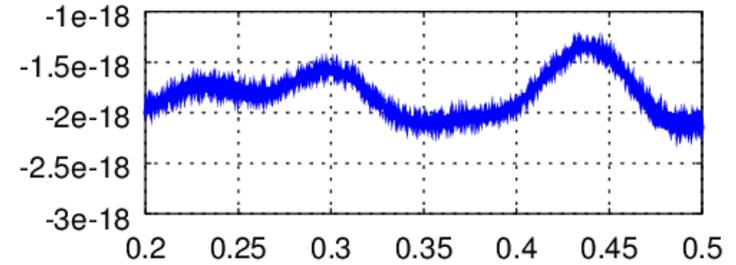


÷ 500

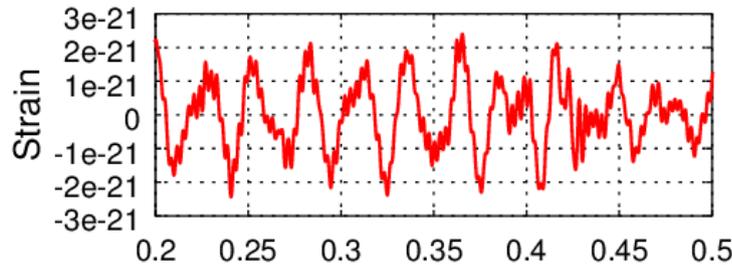
Hanford H1: raw data



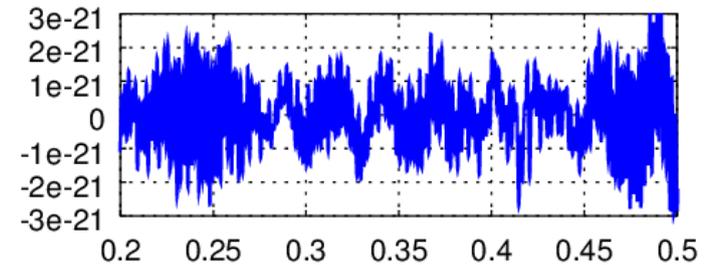
Livingston L1: raw data



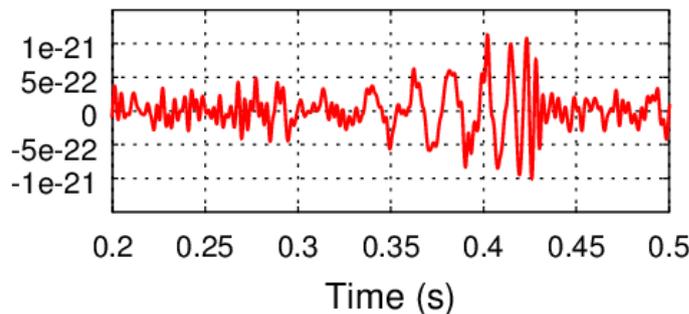
Bandpass filtered



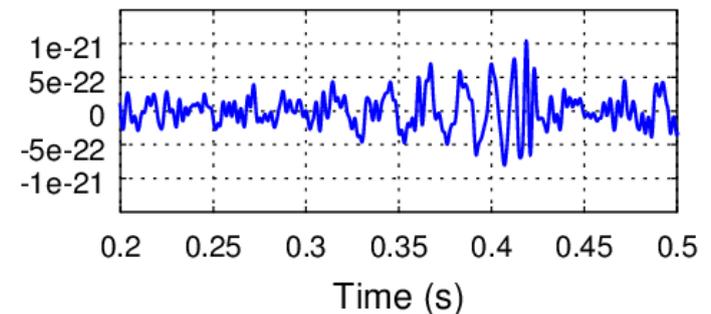
Bandpass filtered



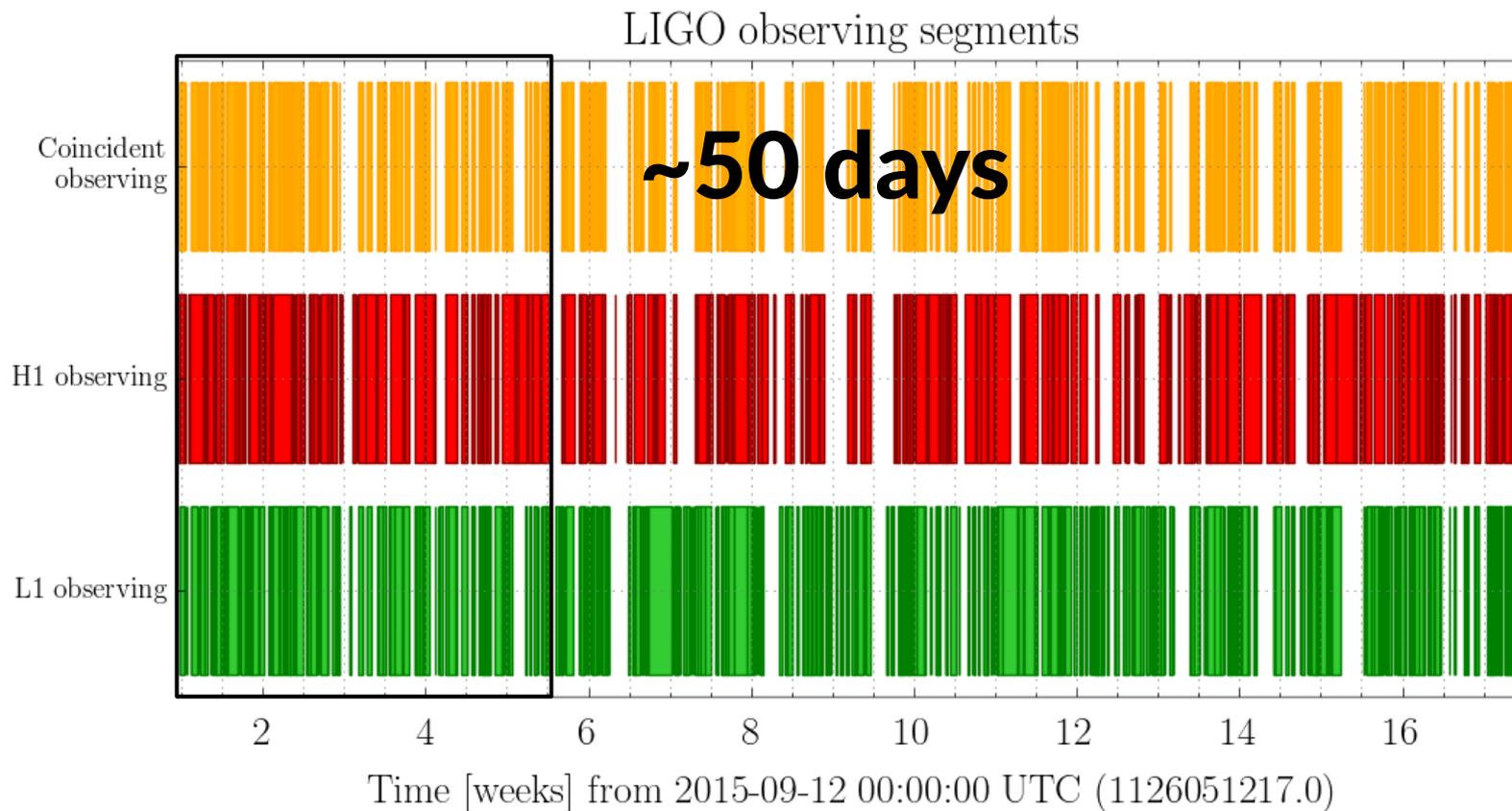
Bandpass filtered & notch



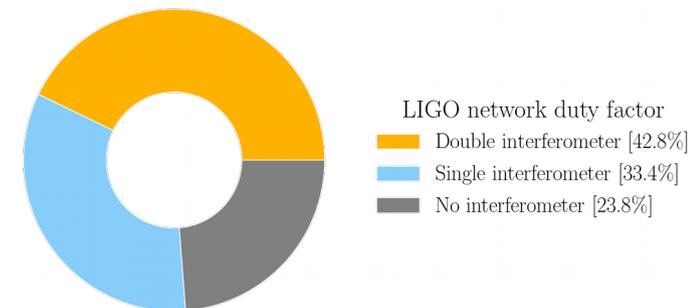
Bandpass filtered & notch



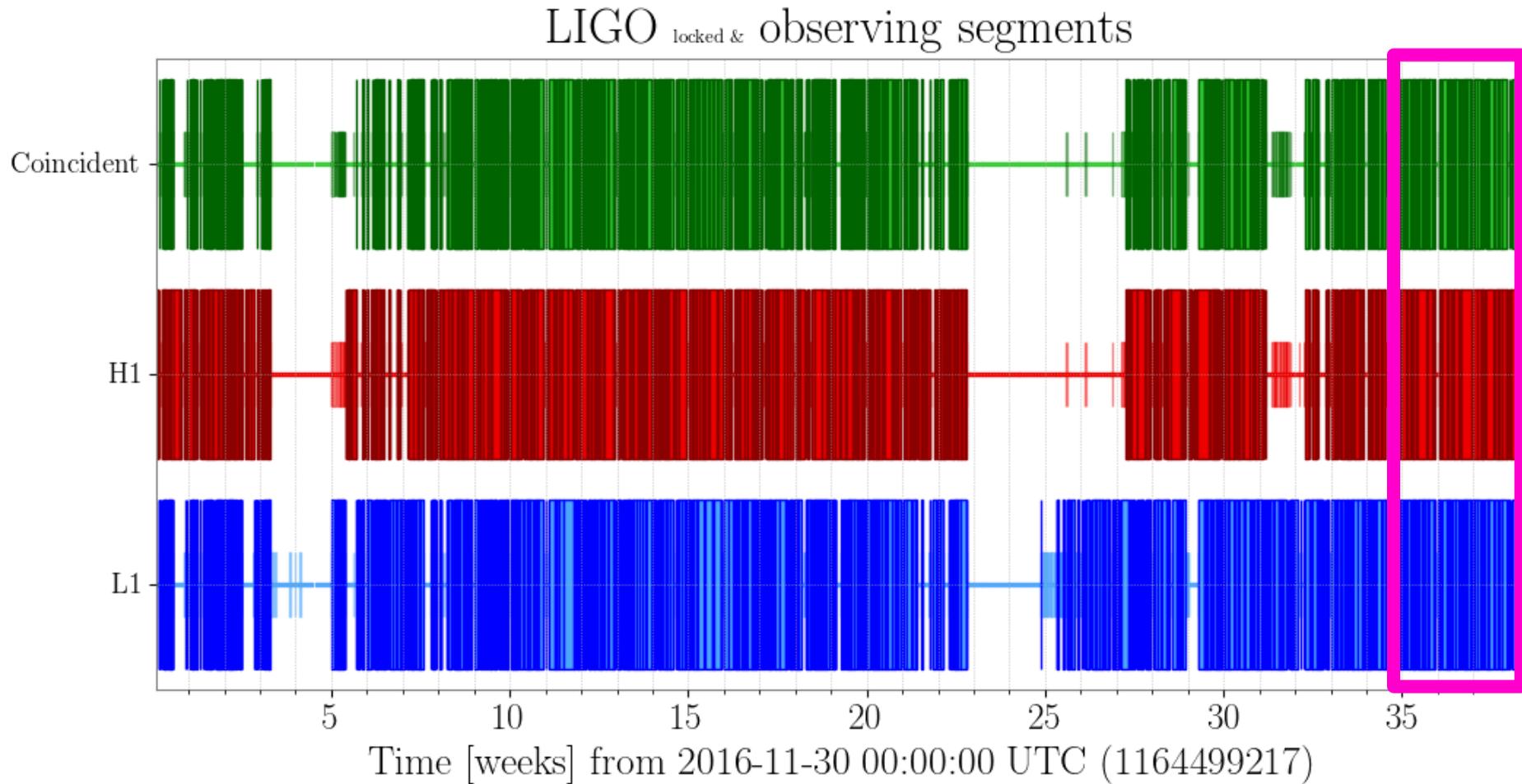
# O1 : sep 2015 à jan 2016 - 4 mois



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

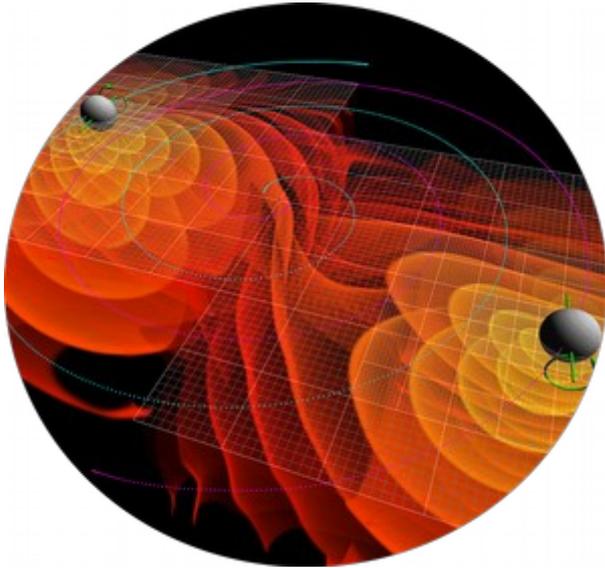


# O2 : nov 2016 à aout 2017 - 9 mois



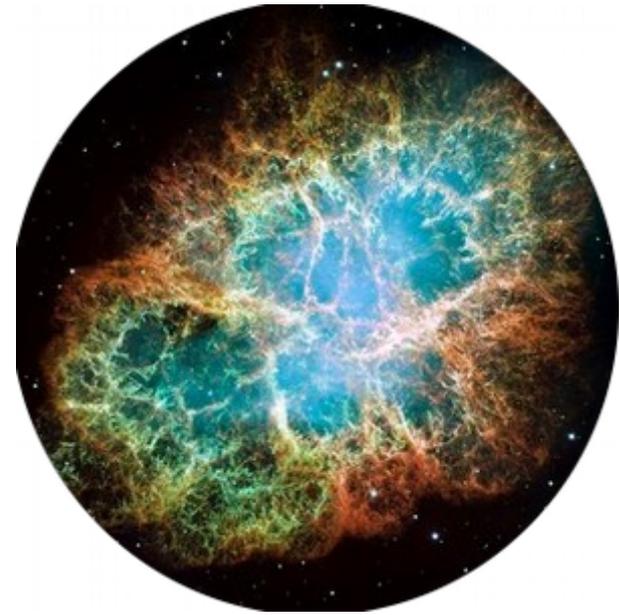
Virgo rejoint O2

# Comment cherche-t-on les signaux transitoires ?



Avec un modèle

Filtrage adapté



Sans modèle

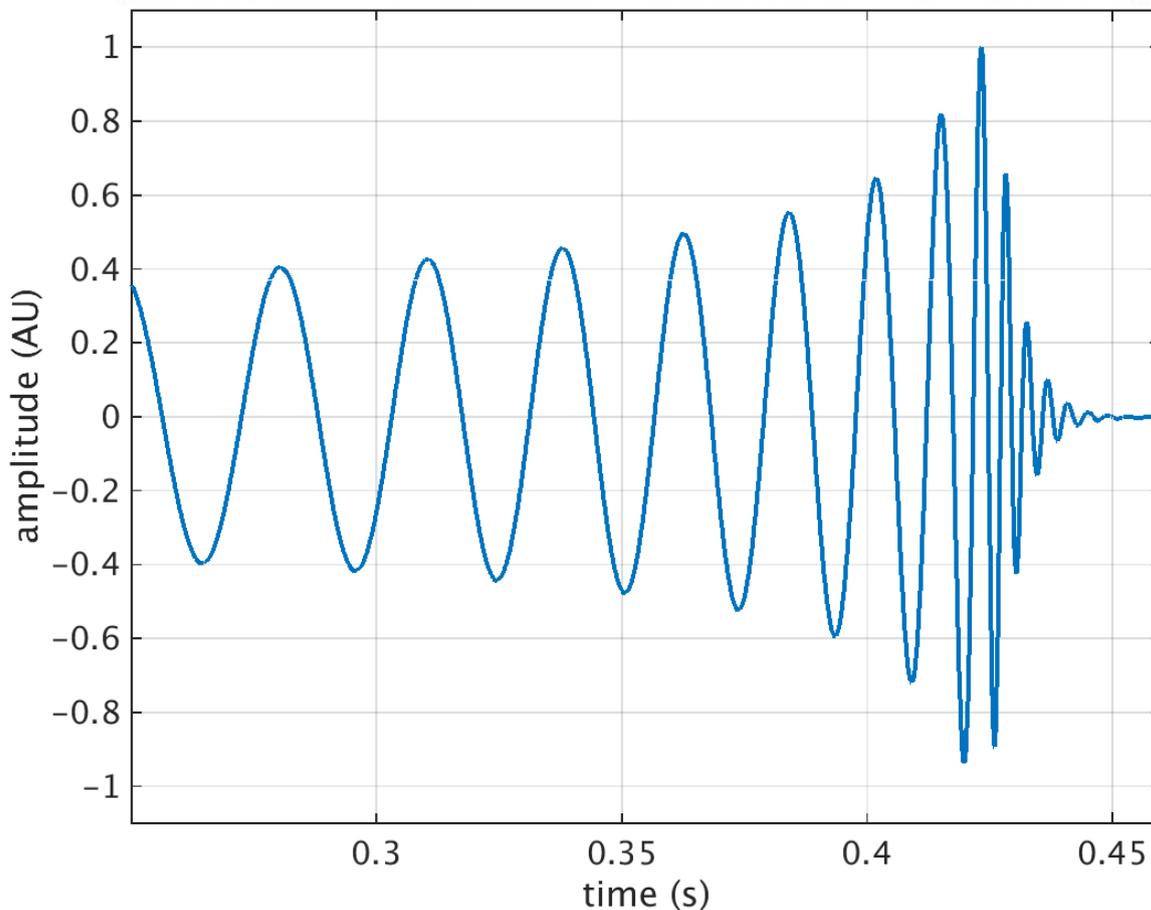
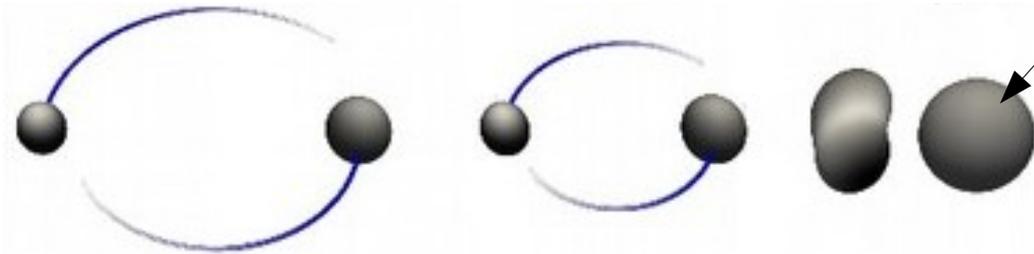
Temps-fréquence  
Ondelettes

# Fusion de trous noirs

spirale

fusion

désexcitation



Signature gravitationnelle caractéristique “chirp”

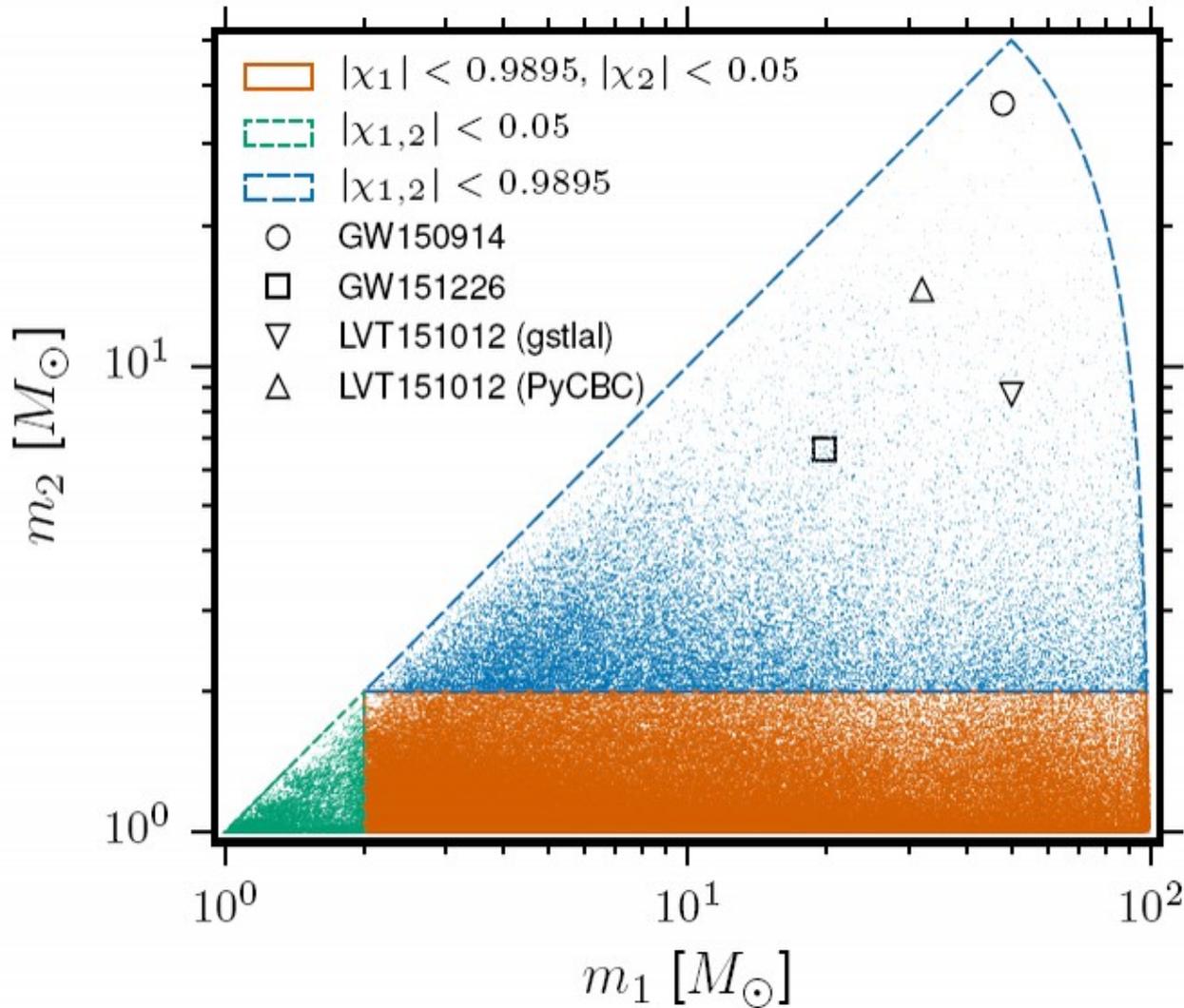
$$f_{\text{OG}} \approx 2f_{\text{orb}}$$

$m_1, m_2$  et spins

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



# Filtre adapté



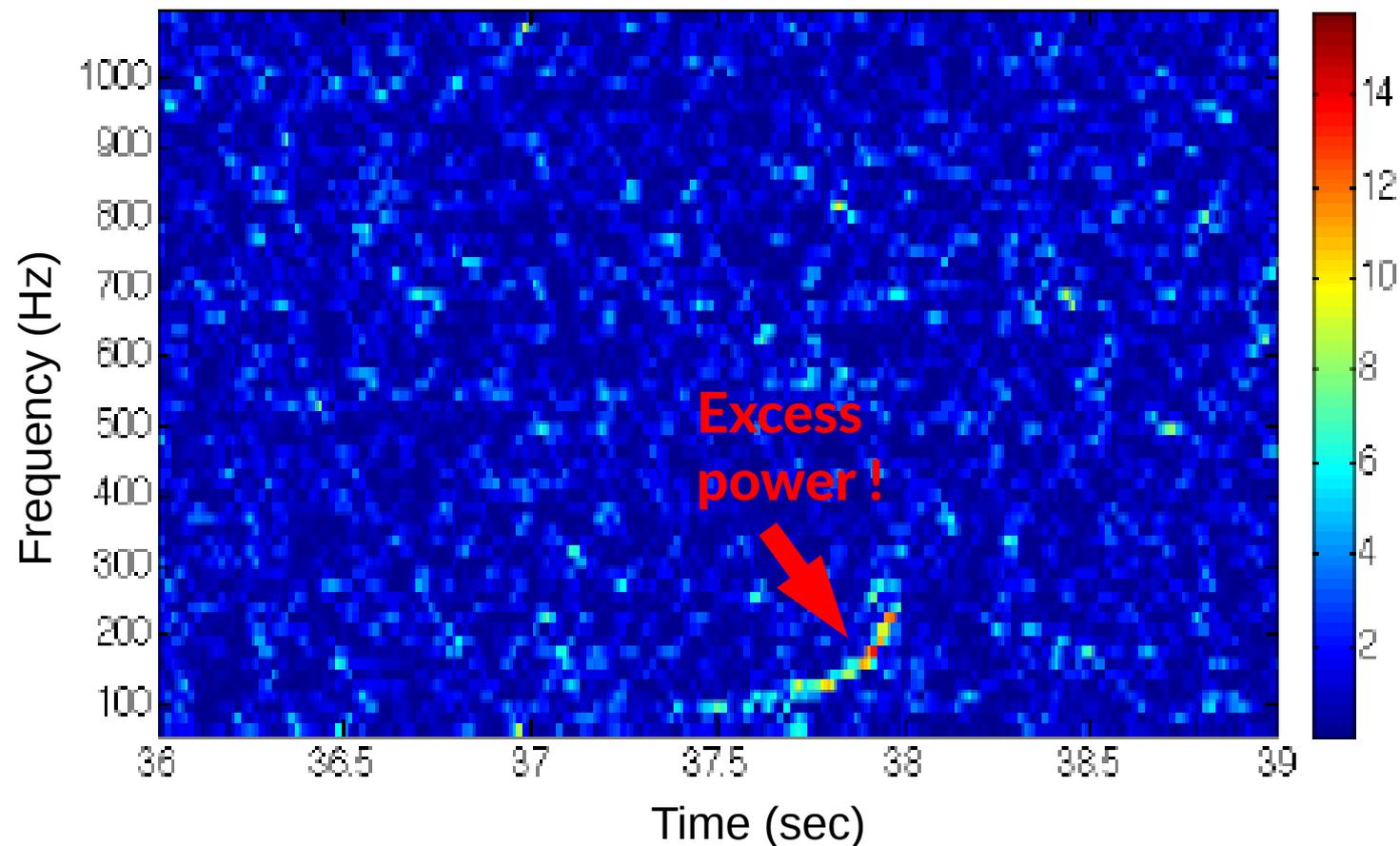
**1 point**  
**= 1 forme d'onde**  
**= 1 filtre**  
**250 000 filtres !**

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

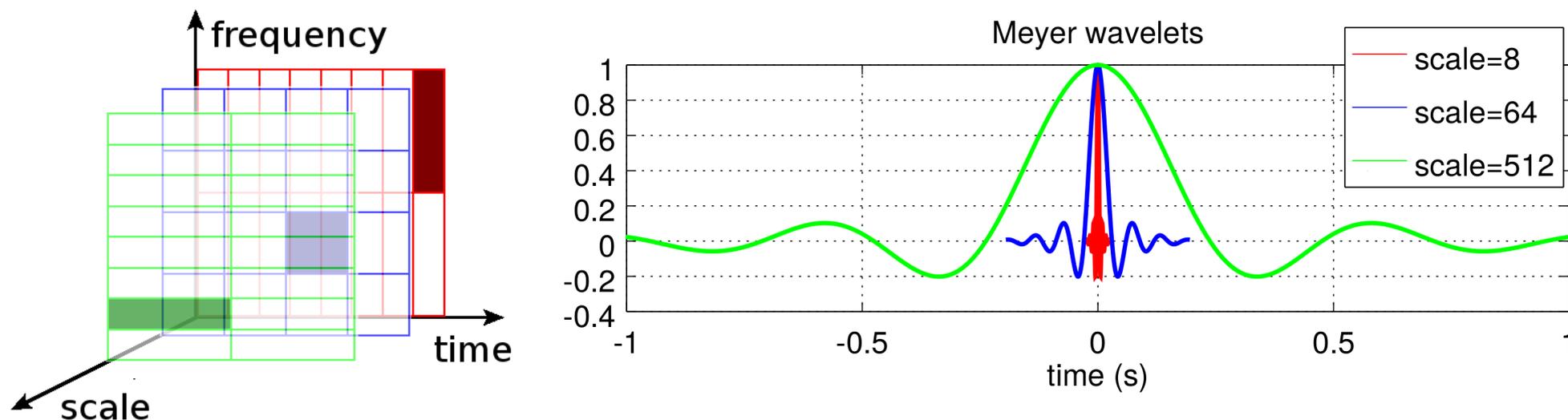
# Recherche temps-fréquence

Signaux transitoires = valeurs extrêmes dans une distribution temps-fréquence

Time-frequency representation



# Coherent WaveBurst



Transformées de Wilson à plusieurs échelles

- Union de bases temps-fréquence (à la Gabor) orthonormales

Aggrégats de pixels temps-fréquence cohérents en phase

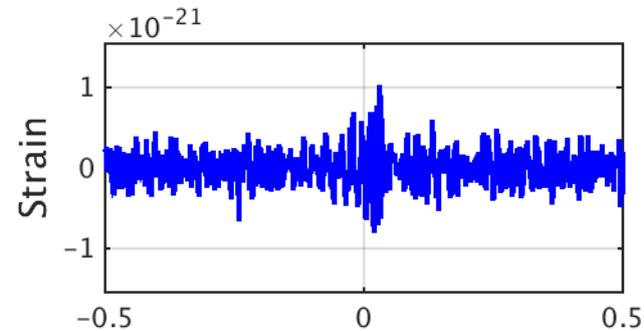
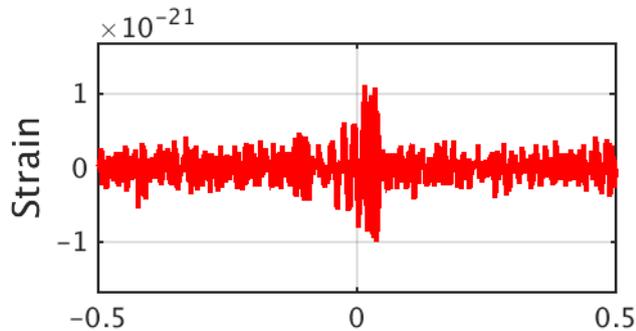
- Formation de voie : addition après compensation du délai de propagation et décalage de phase entre détecteurs

Méthode rapide et robuste

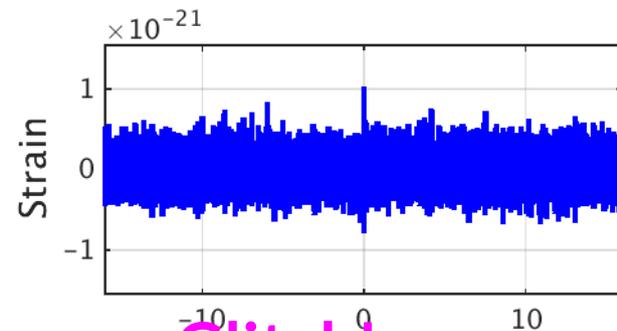
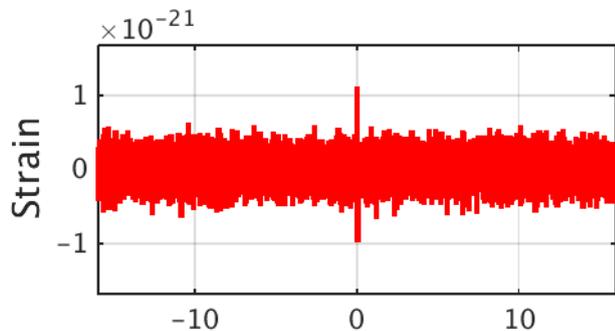
- A réalisé la première détection de GW150914, 3 mins après obs.
- **La relativité générale n'est pas requise**  
Peut détecter des signaux inattendus

# Bruit “impulsionnel” – *Glitch!*

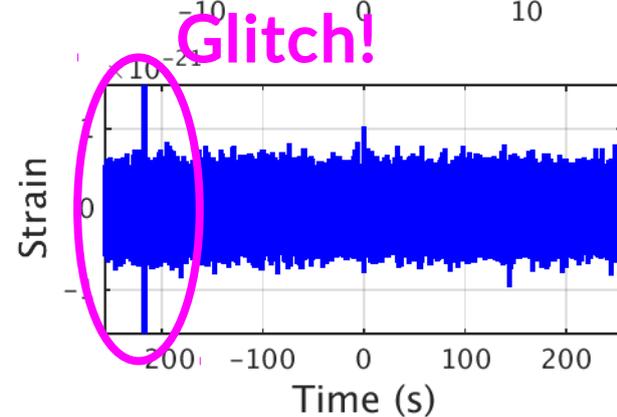
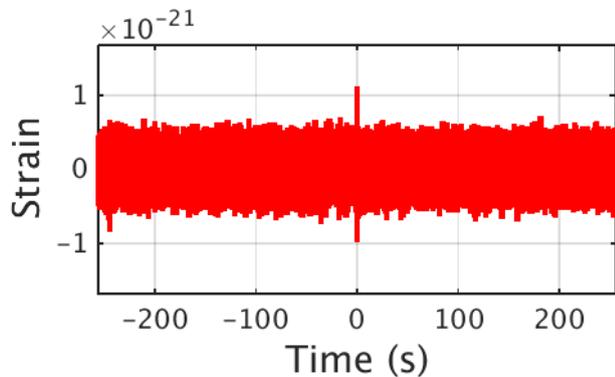
second



~minutes

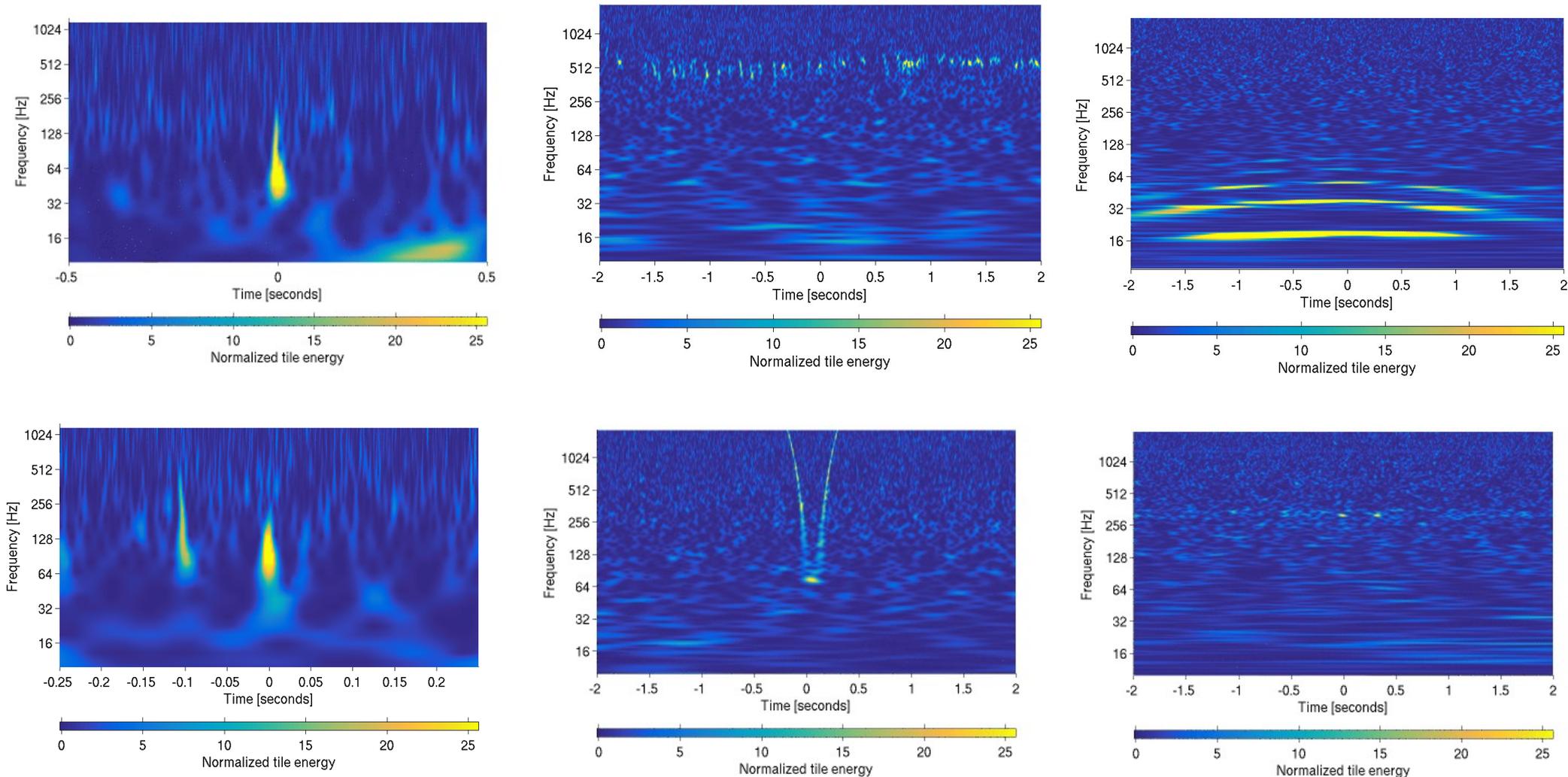


~ 10 minutes



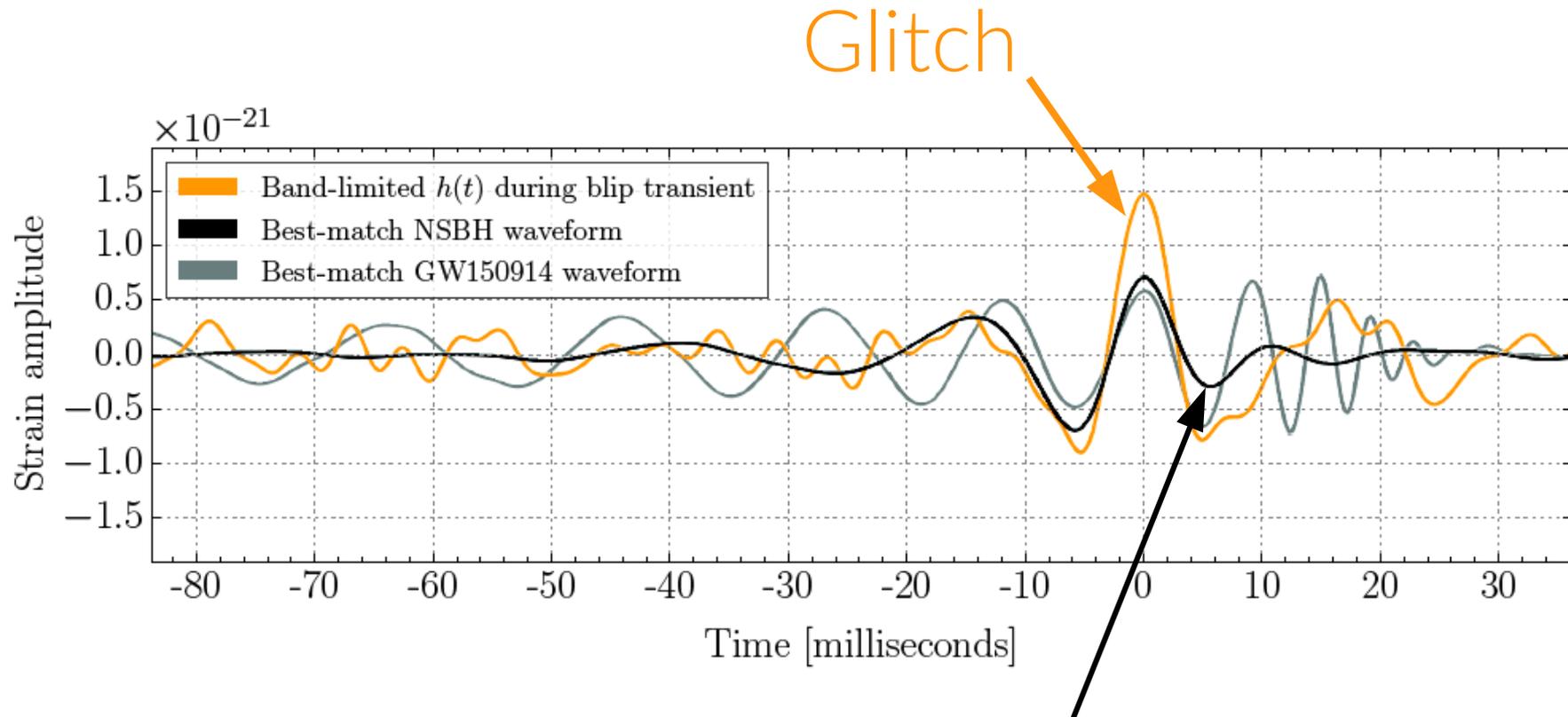
1 toutes les quelques secondes à 1 toutes les 20 mins

# 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  
(en masquant les vrais signaux)

# Qualité des données et statistique

## Réduire l'impact des glitches

- Statistique “robuste”
- 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

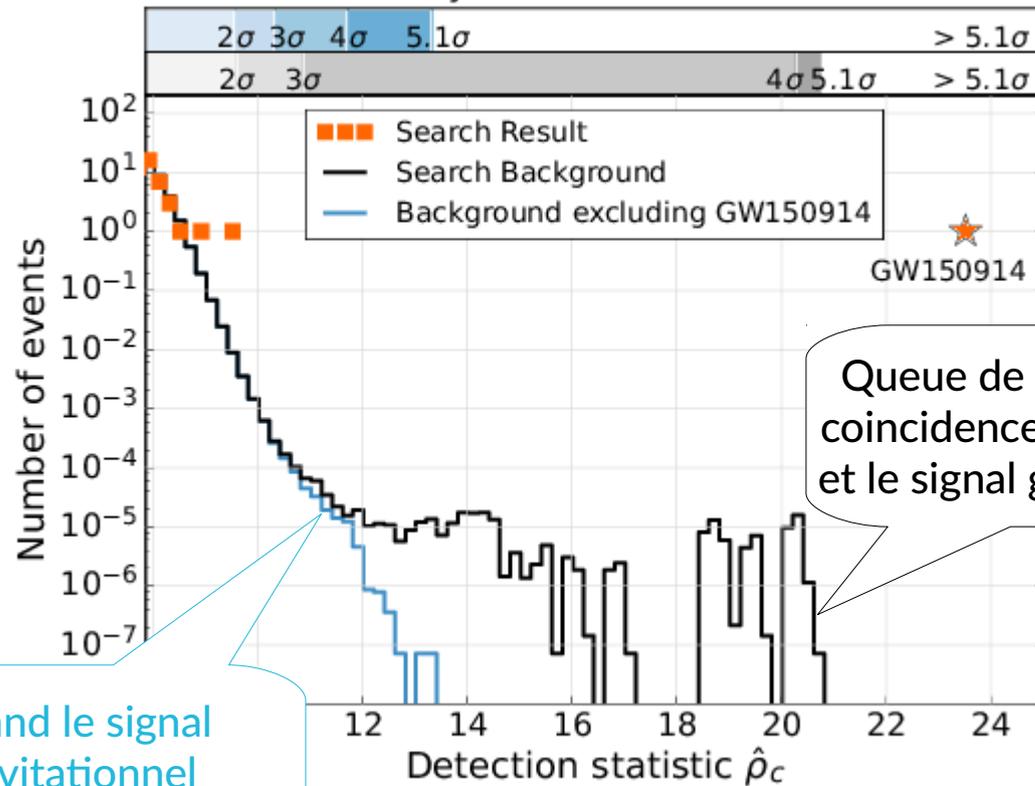
## Glitches inexplicés

- 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

Binary coalescence search

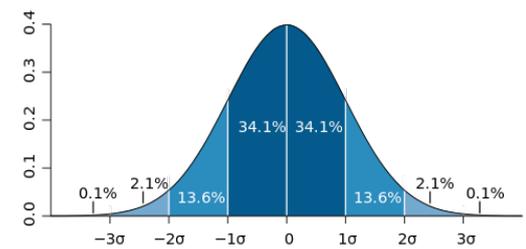


< 1 / 200 000 ans

> 5.1  $\sigma$

Queue de distribution:  
coincidence entre glitches  
et le signal gravitationnel

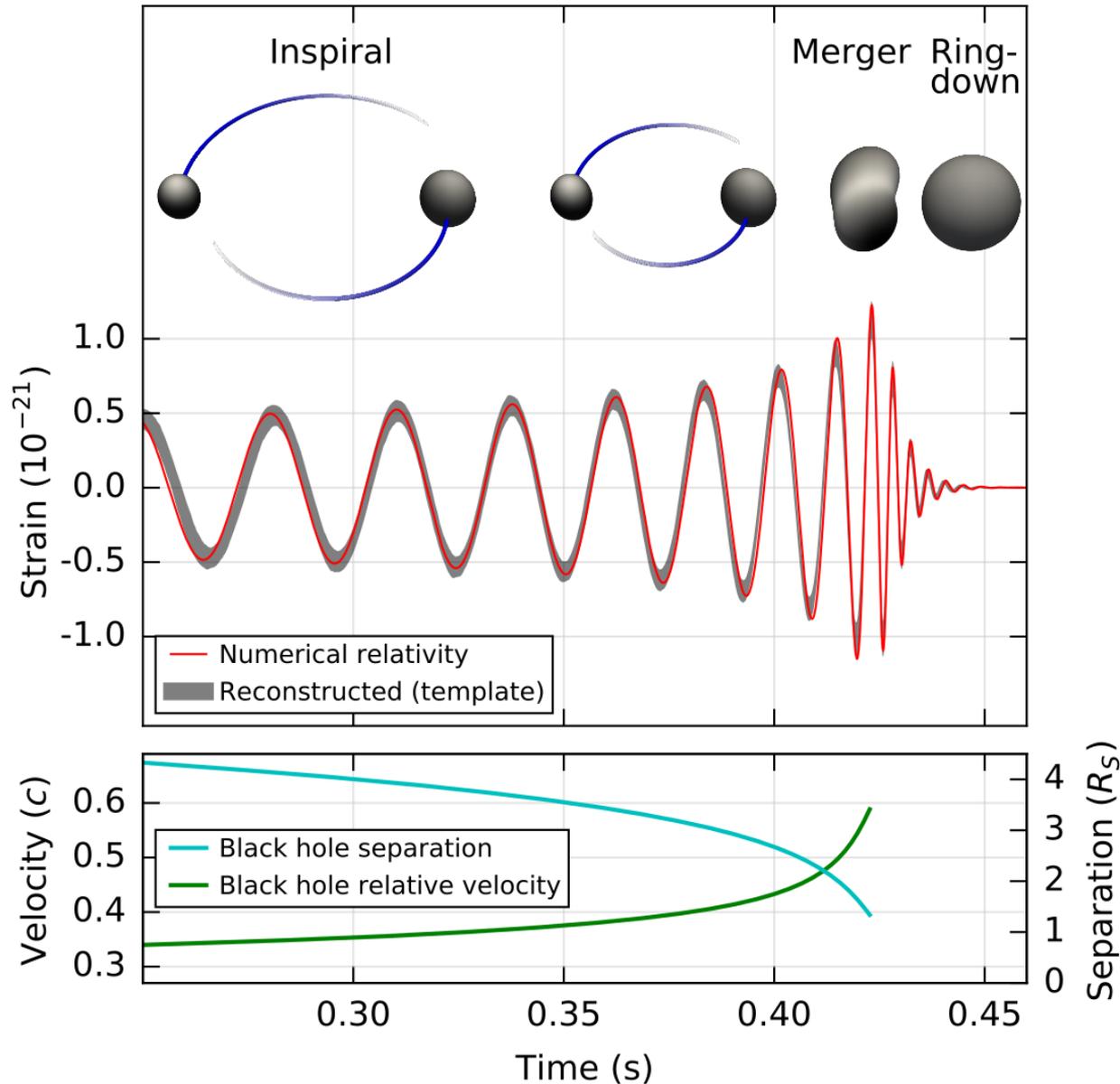
Quand le signal  
gravitationnel  
est exclu du fond



5 $\sigma$



# “Décrypter” le signal gravitationnel



# Estimation des paramètres astrophysiques (1)

Binaire compacte (spin « alignés ») : 11 params = masses et spins + géométrie

$$h_+(t) = \frac{1 + \cos^2 \iota}{2} \frac{A(t - t_c)}{D_L} \cos \varphi(t - t_c)$$

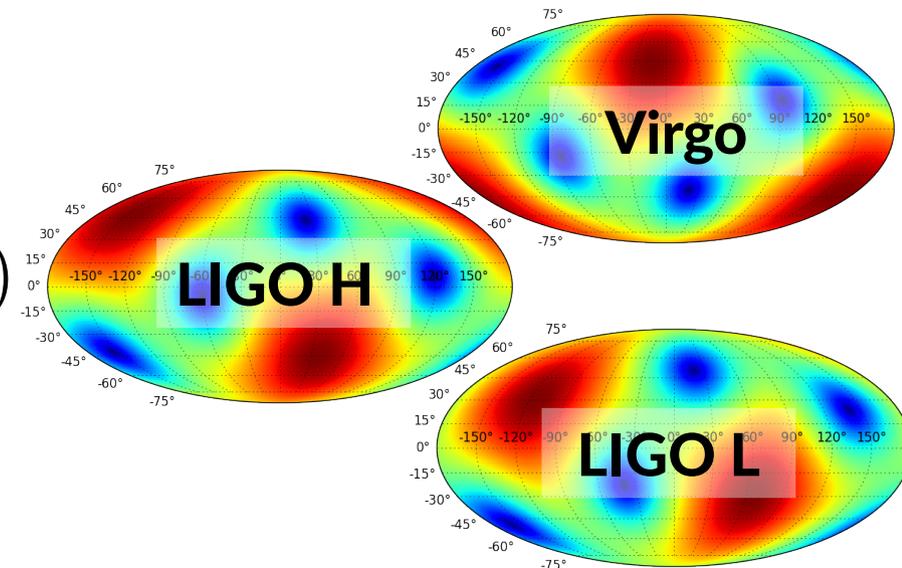
$$h_\times(t) = \cos \iota \frac{A(t - t_c)}{D_L} \sin \varphi(t - t_c)$$

$A(t)$  et  $\varphi(t)$  sont des fct des masses  $(1+z)$  et spins

Observable pour chaque détecteur

$$h(t) = F_+ h_+(t - \tau) + F_\times h_\times(t - \tau)$$

$F$  et  $\tau$  sont des fct de la position de la source

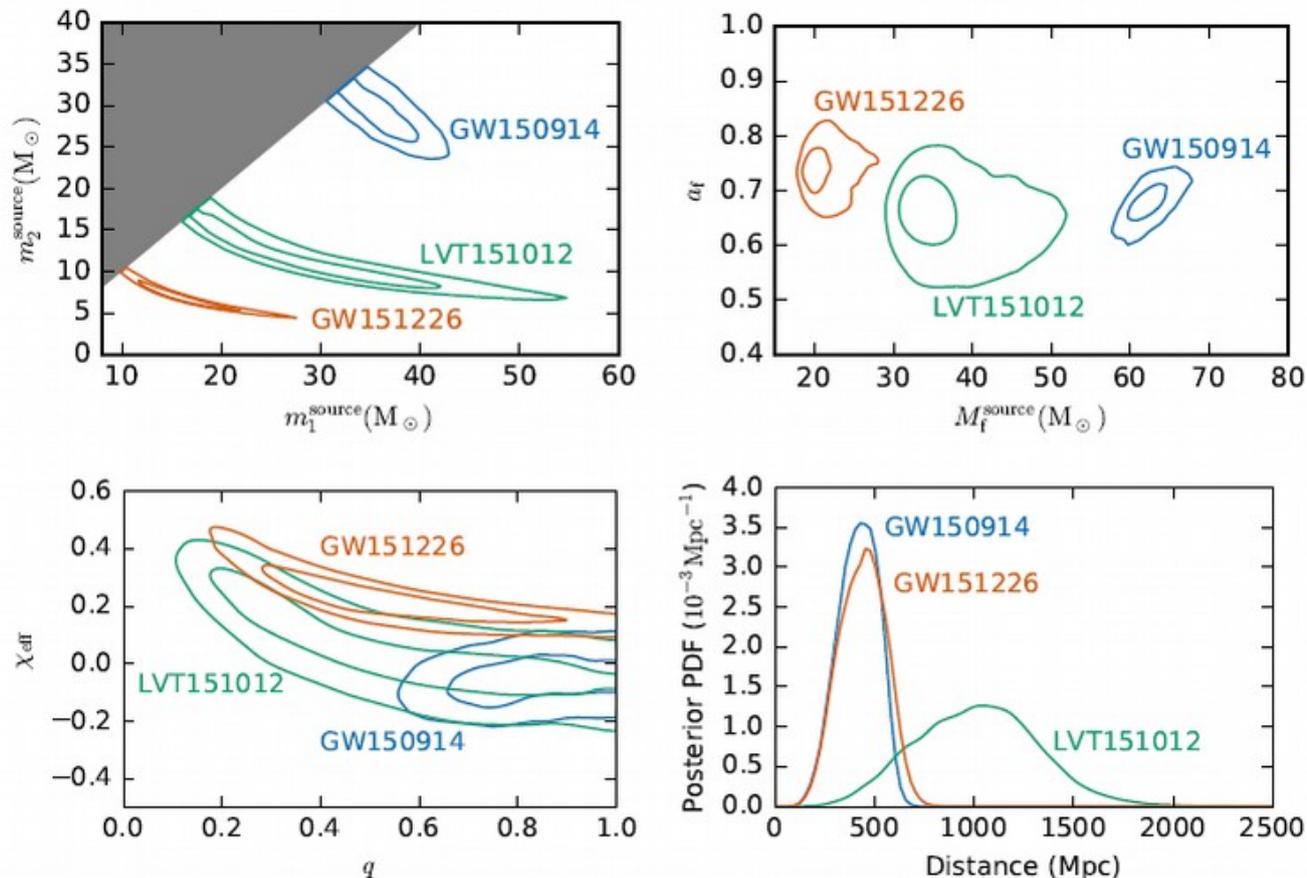


Problème inverse - **Couplage et dégénérescence** (par ex, inclinaison/distance)

# Estimation des paramètres astrophysiques (2)

Calque de meilleur accord fournit une estimation peu précise des masses, spins et distance (densité insuffisante, erreur d'estimation manquante)

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



## 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

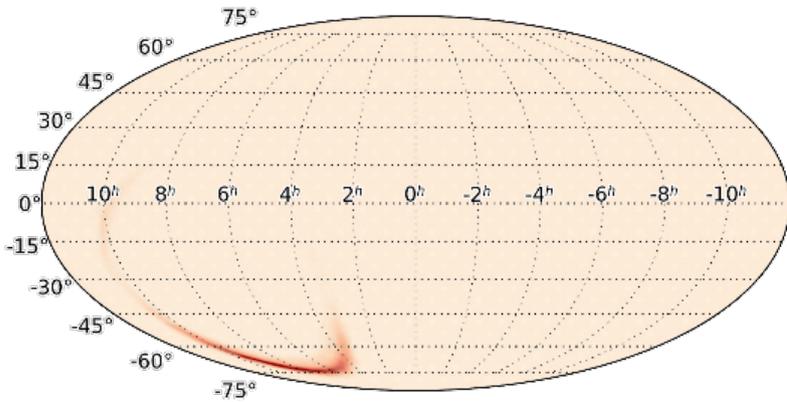
(plus que toutes les étoiles de l'Univers !)

Si une (infime) partie de cette  
énergie avait été transformée en  
rayonnement électromagnétique ?

(mais compacité → opacité)

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio	23.7	13.0	9.7
$\rho$			
False alarm rate FAR/yr <sup>-1</sup>	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	$7.5 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-8}$	0.045
Significance	$> 5.3\sigma$	$> 5.3\sigma$	$1.7\sigma$
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 $\chi_{\text{eff}}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
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 $D_L/\text{Mpc}$	$420^{+150}_{-180}$	$440^{+180}_{-190}$	$1000^{+500}_{-500}$
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

# Localisation de la source dans le ciel



- Localisation à partir de plusieurs observations

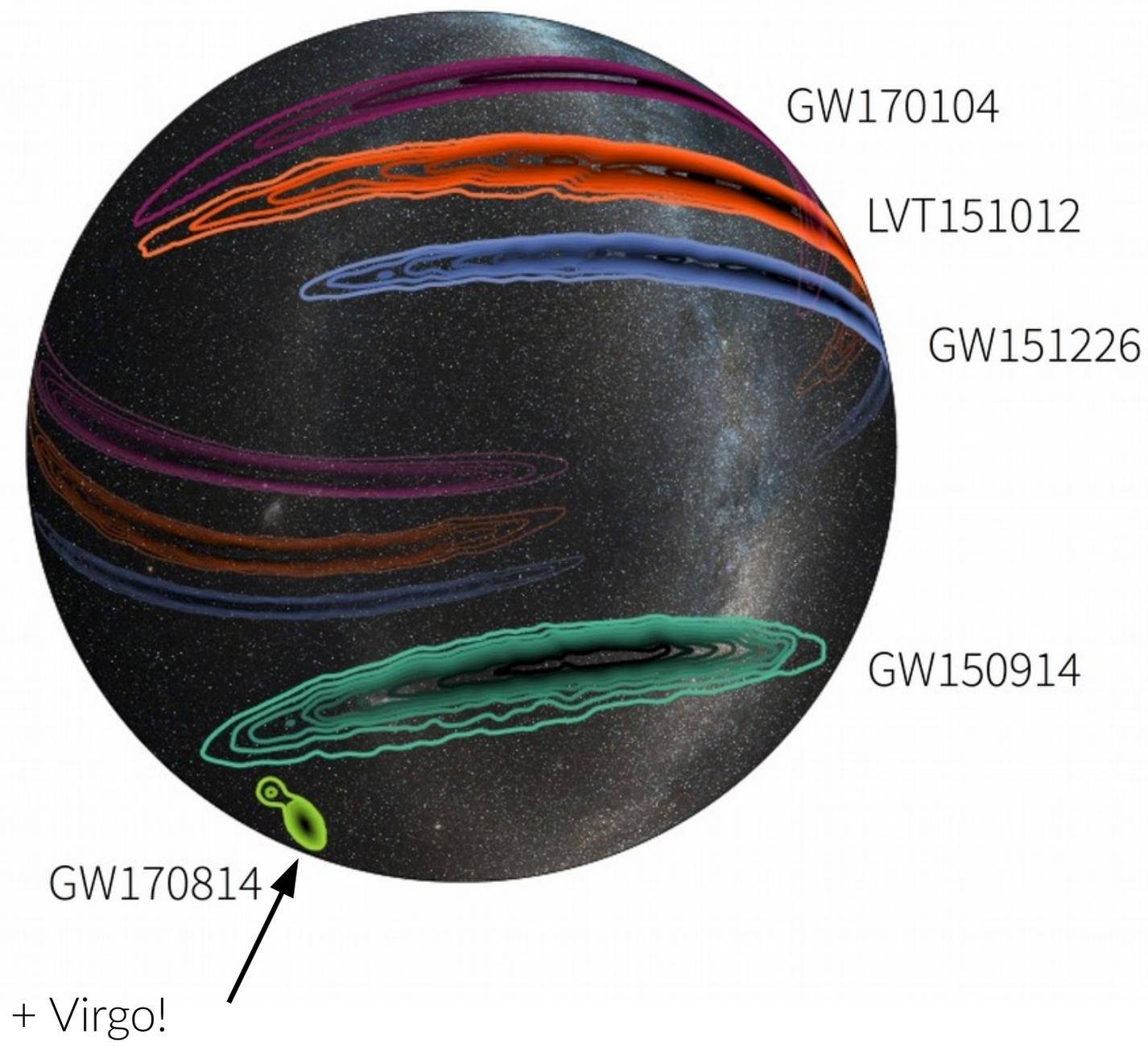
- « Triangulation » ou « synthèse d'ouverture »
- Incertitude caractérisée par une région irrégulière (« banane »)
- $Qq$  100 à 1000  $\text{deg}^2$  avec 2 détecteurs
- $Qq$  10 à 100  $\text{deg}^2$  avec 3 détecteurs

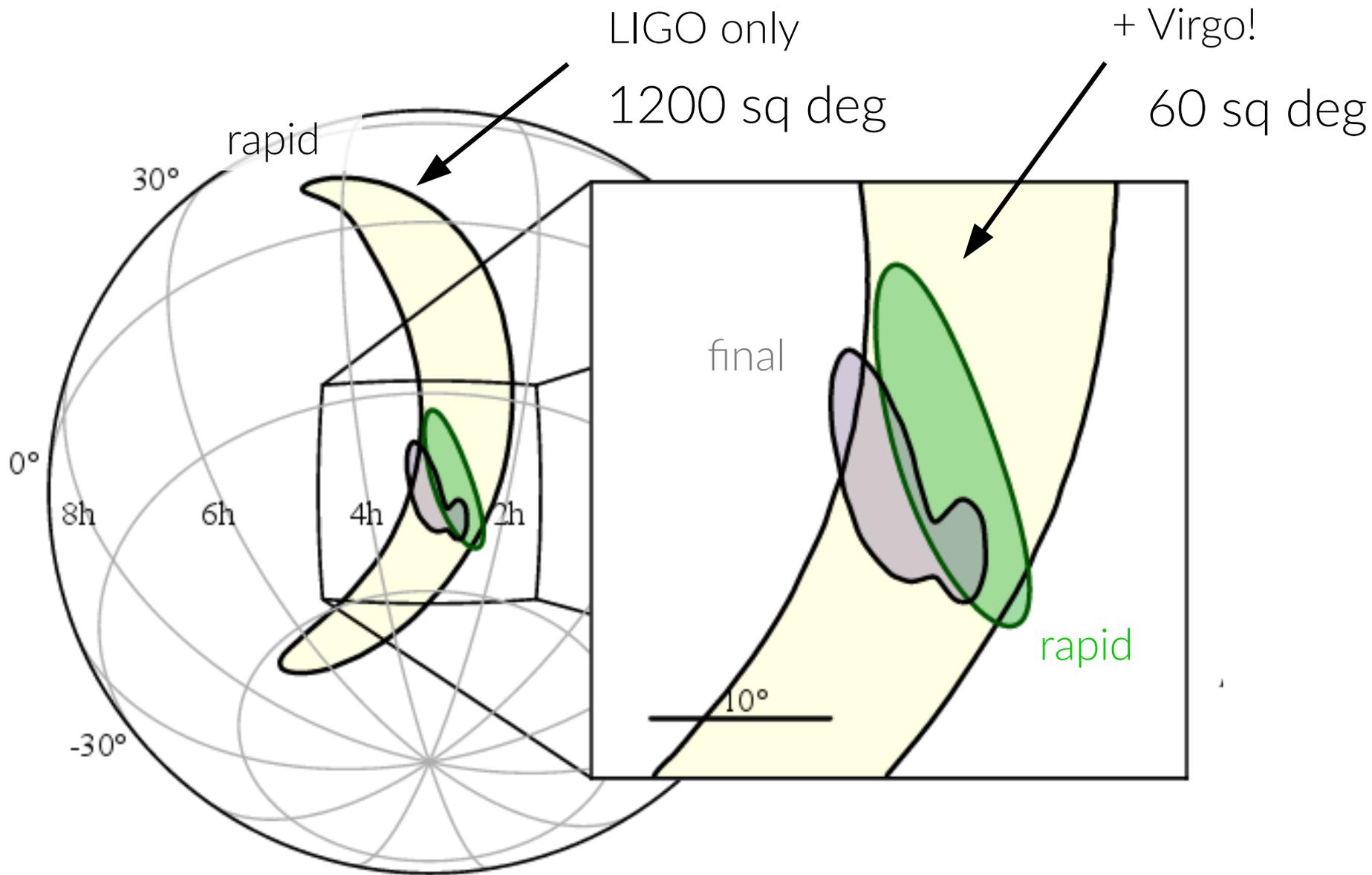
- Localisation rapide (mins)

- A partir des temps d'arrivée, phases et amplitudes à chaque détecteurs
- Position dependent distance estimate - 3D skymap  
arXiv:1508.03634

- Estimation bayésienne (hrs à jours)

- Marginalisation de l'estimation bayésienne à partir d'un modèle complet

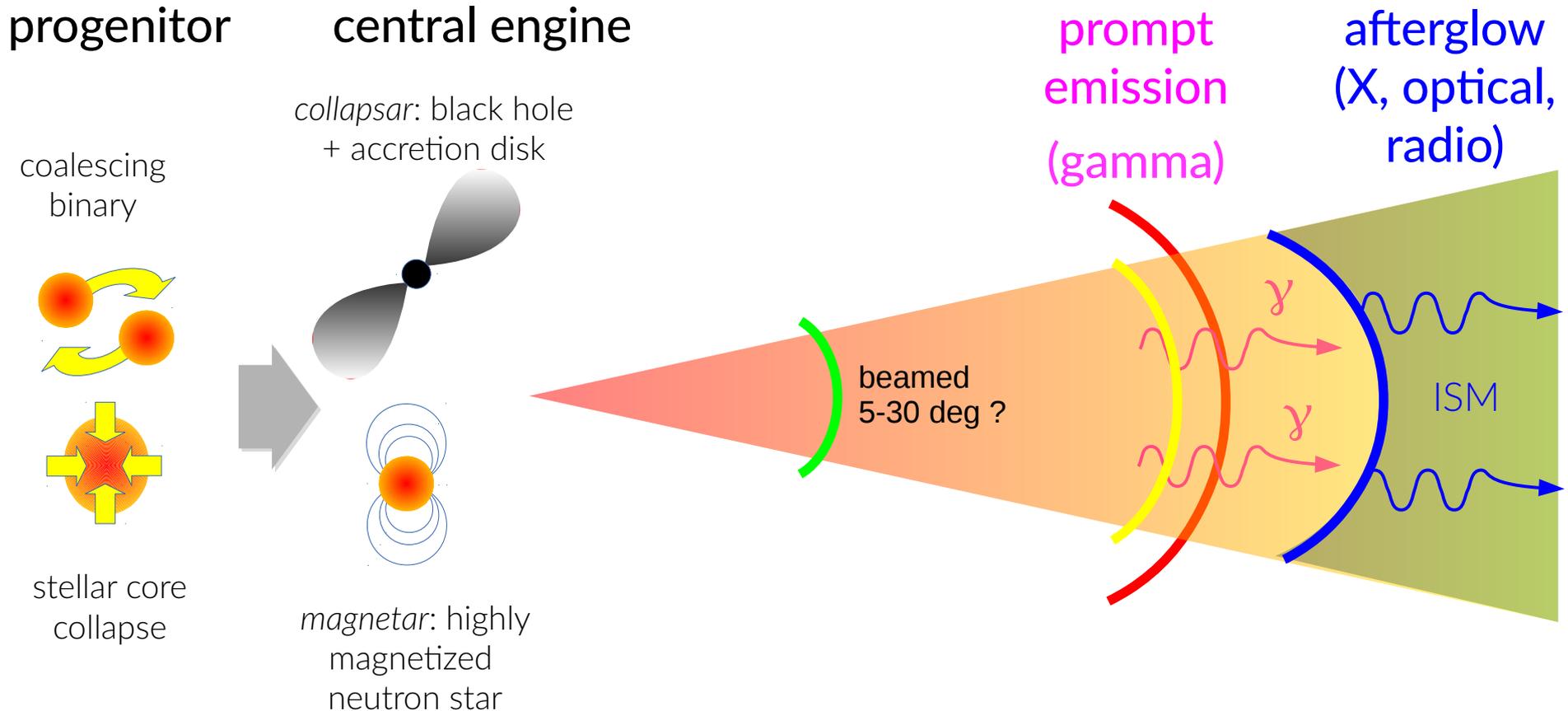


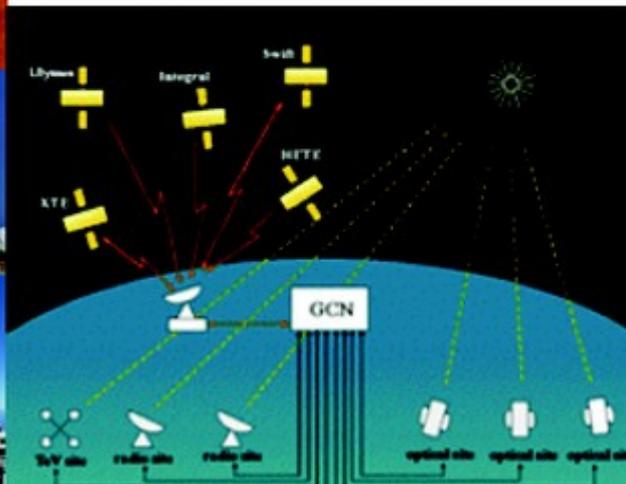


# Contreparties électromagnétiques

Les sursauts gamma courts ( $< 2$  s) sont-ils associés aux binaires compactes coalescentes ?

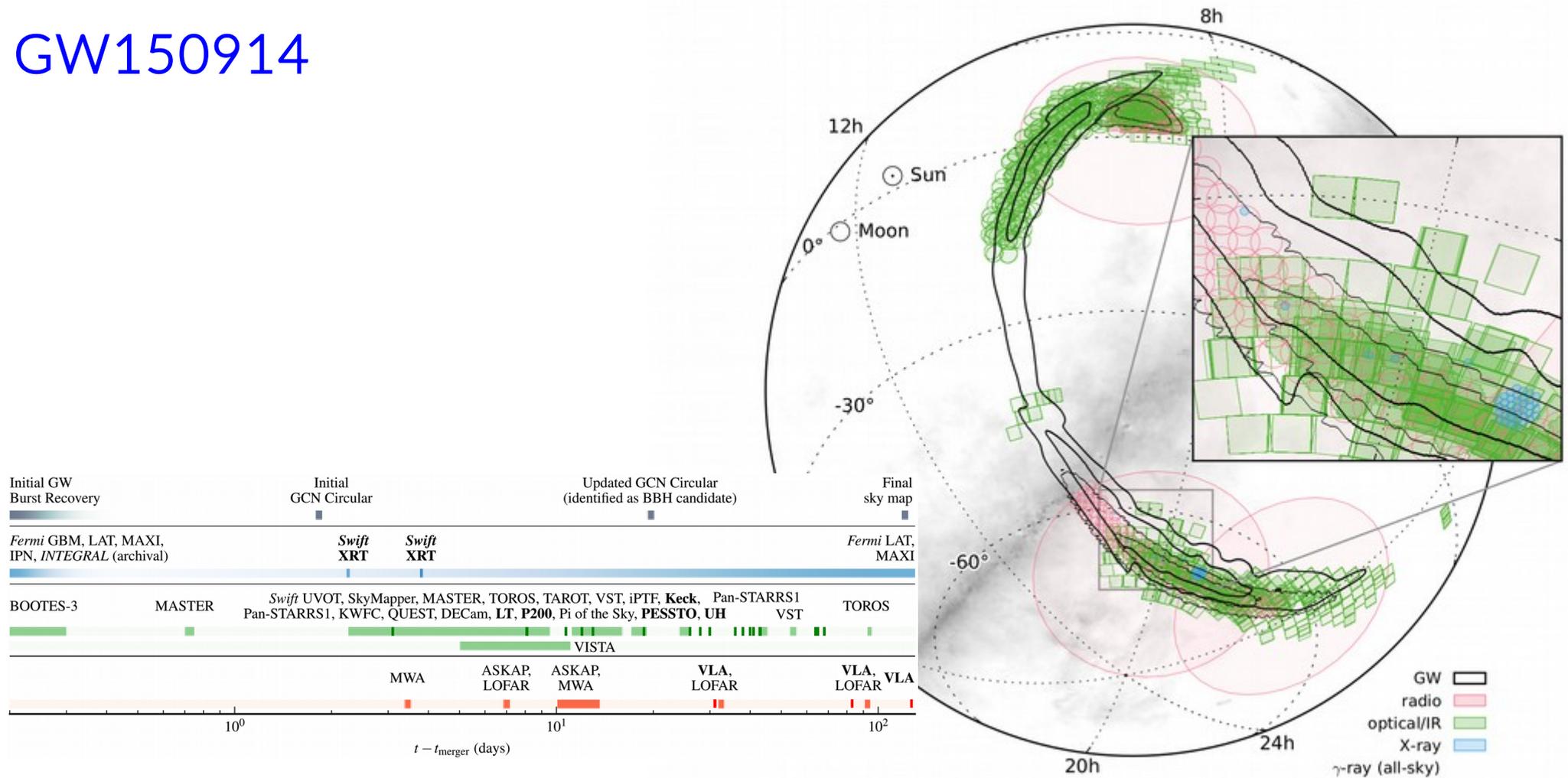
- **Emission prompt, rémanescence et kilonova** (désintégration de noyaux lourds formés par capture de neutrons rapides)





# Suivi électromagnétique

GW150914



Pas de contrepartie convaincante  
(idem pour les autres événements)

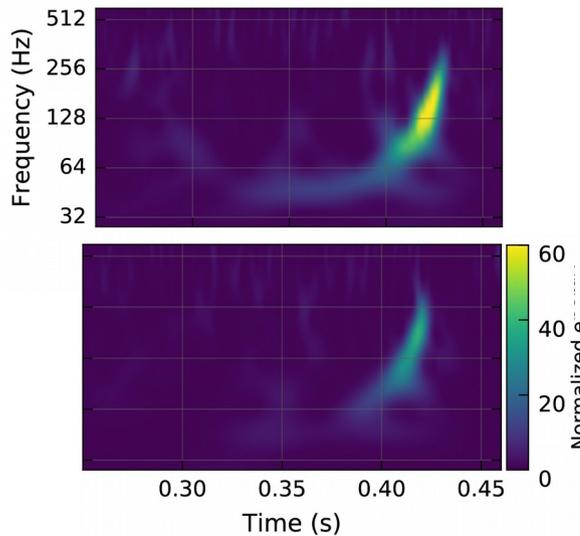
**Bilan**

# LIGO's first observation run O1

Sep 2015-Feb 2016

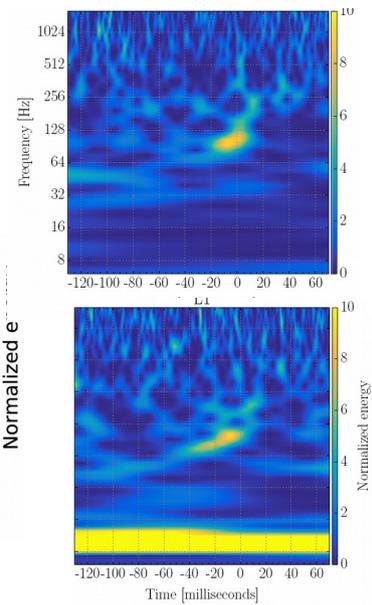
Phys. Rev. X 6, 041015

Sep 14 2015



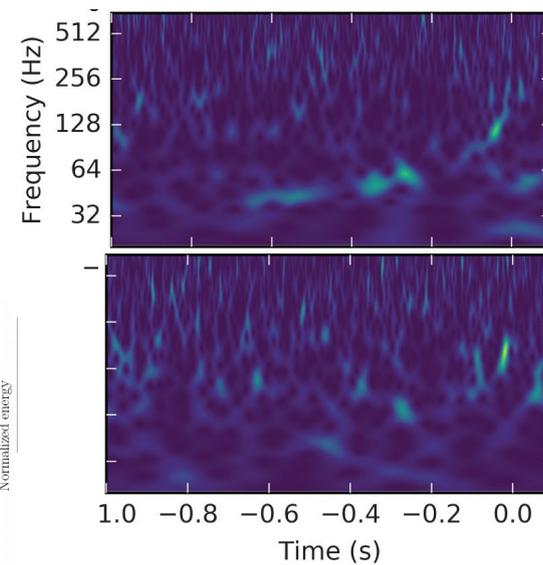
$36 M_{\odot} - 29 M_{\odot}$   
420 Mpc

Oct 12 2015



$23 M_{\odot} - 13 M_{\odot}$   
1000 Mpc

Dec 26 2015

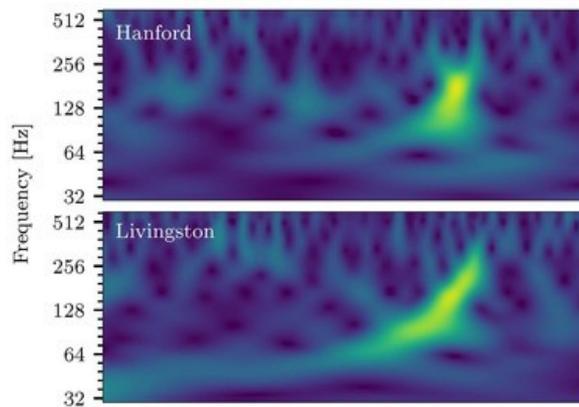


$14 M_{\odot} - 7 M_{\odot}$   
440 Mpc

# LIGO second and Virgo first observation run (O2)

Nov 2016-Aug 2017

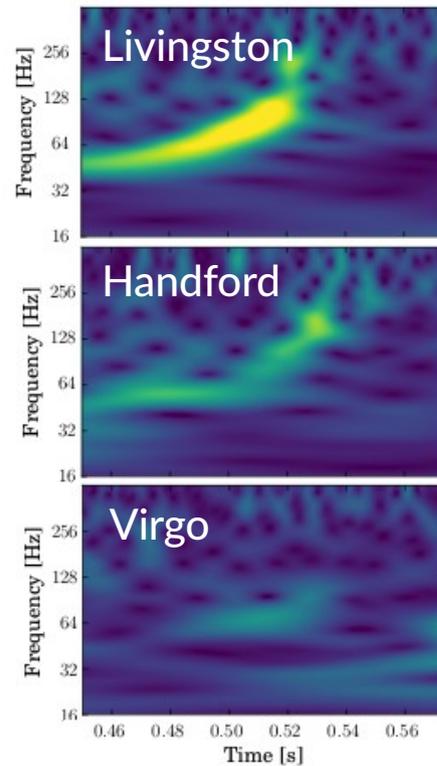
Jan 4 2017



Phys. Rev. Lett. 118, 221101

$31 M_{\odot} - 19 M_{\odot}$   
880 Mpc

Aug 14 2017



Phys. Rev. Lett. 119, 141101

$30 M_{\odot} - 25 M_{\odot}$   
540 Mpc

Analyse  
en  
cours...

# Science ouverte

<https://www.gw-openscience.org>

Data, demos, softwares,  
Jupyter notebooks for  
science, teaching and  
outreach

**LIGO** LIGO Open Science Center  
LIGO is operated by California Institute of Technology and Massachusetts Institute of Technology and supported by the U.S. National Science Foundation.

**Virgo**

**Getting Started**  
Data  
Events  
Bulk Data  
Tutorials  
Software  
Detector Status  
Timelines  
My Sources  
GPS ↔ UTC  
About the detectors  
Projects  
Acknowledge LOSC

LIGO Hanford Observatory, Washington  
(image: C. Gray)

LIGO Livingston Observatory, Louisiana  
(image: J. Giaime)

Virgo detector, Italy  
(image: Virgo Collaboration)

**The LIGO Open Science Center provides data from gravitational-wave observatories, along with access to tutorials and software tools.**

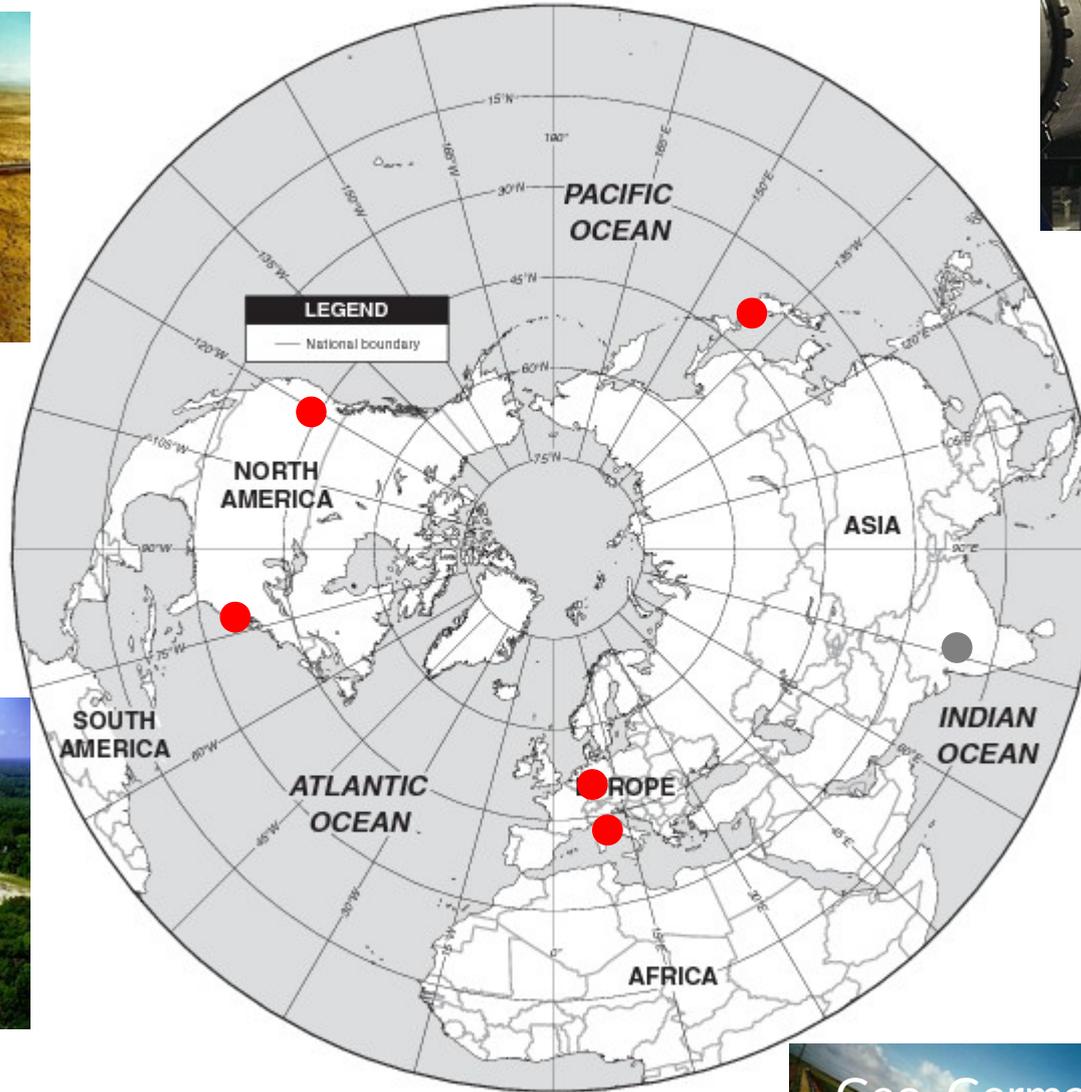
**Get started!**

**See LIGO and Virgo discoveries**

**See the LIGO and Virgo detector status** NEW

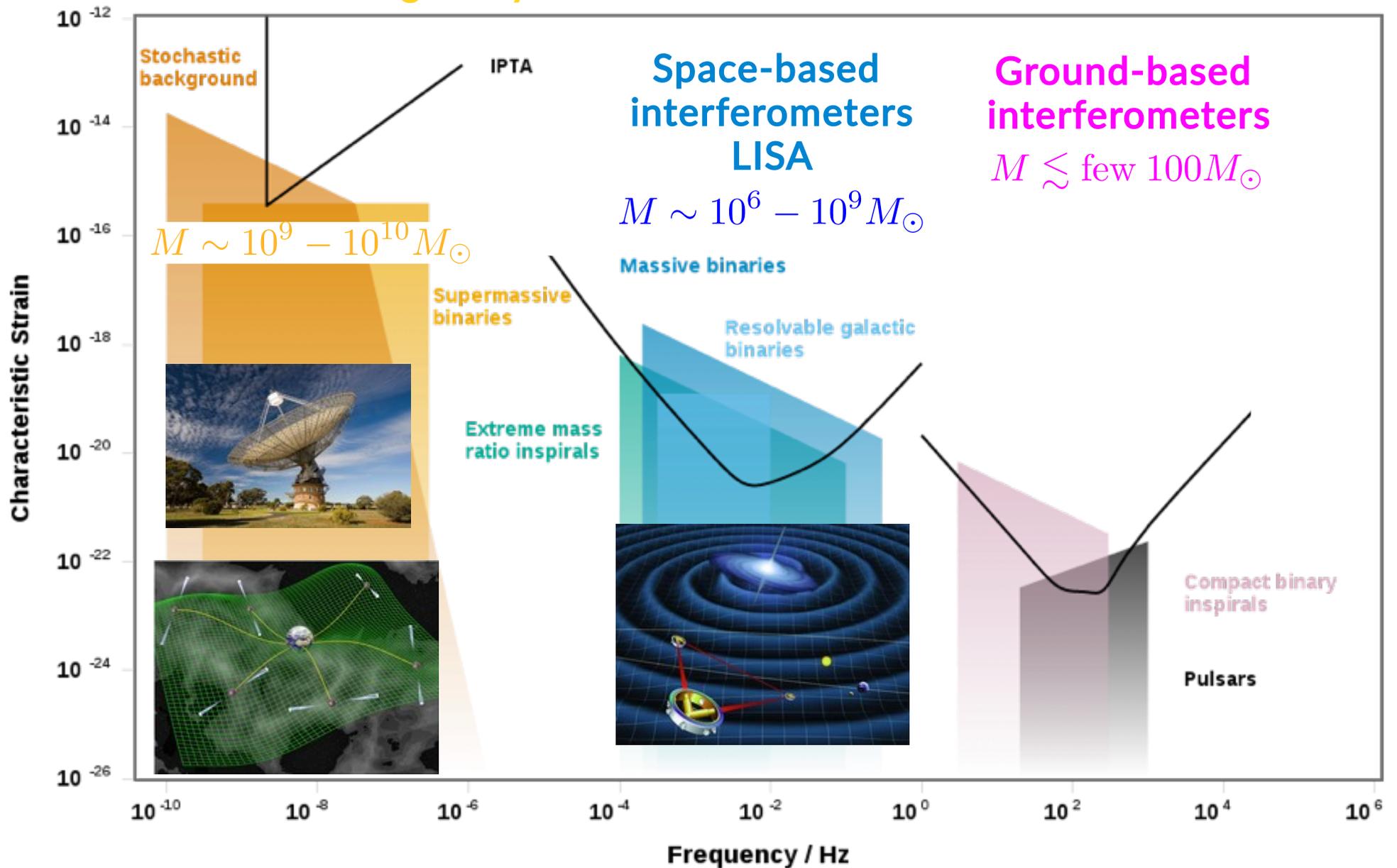
**Join the email list**

# What's next?



# L'astronomie gravitationnelle

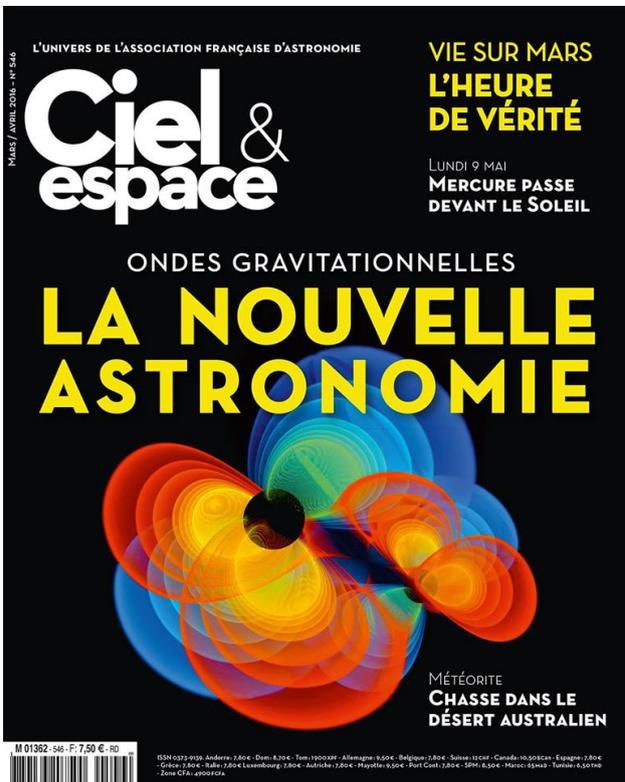
## Pulsar Timing Array



# Conclusions

- Ondes gravitationnelles

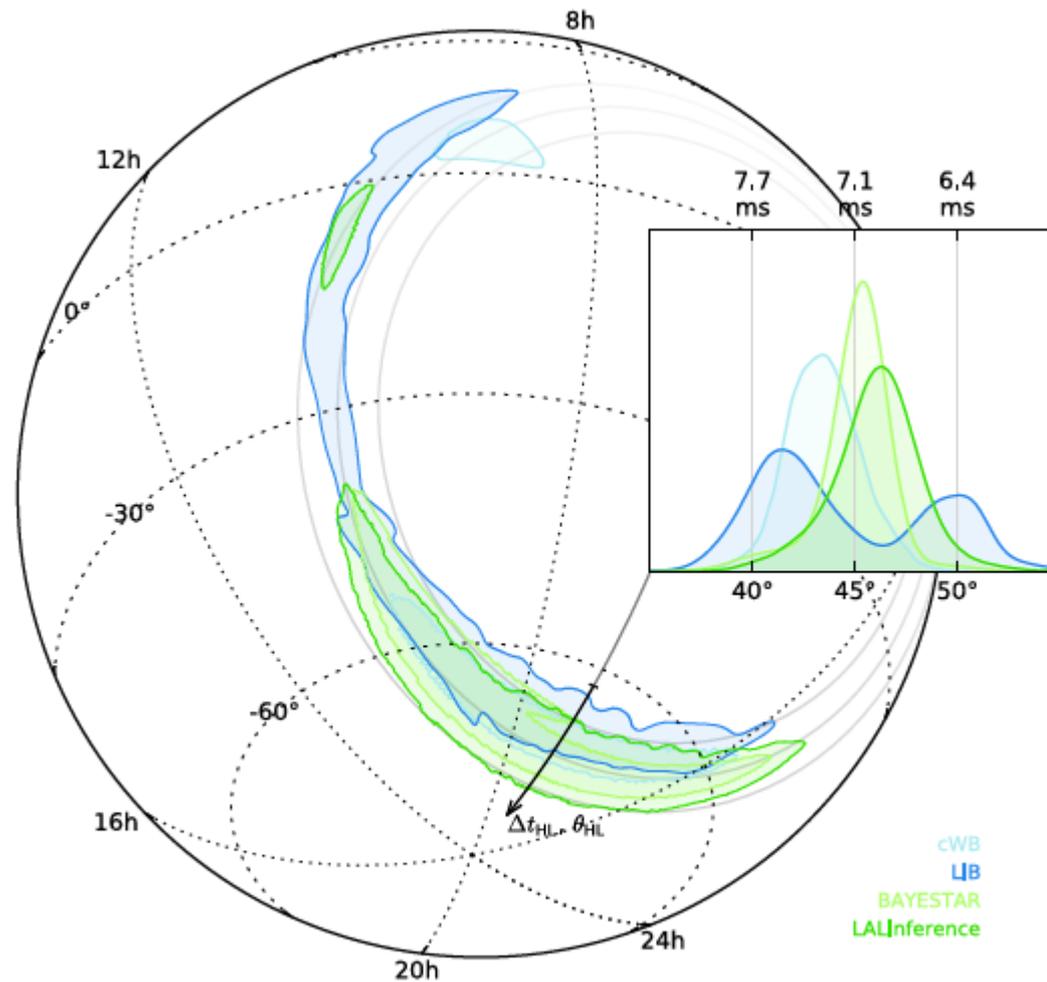
- Observation de binaires de trous noirs et de la formation d'un trou noir
- **Naissance d'une nouvelle astronomie !**
- Cela n'est qu'un début : autres types de sources ?





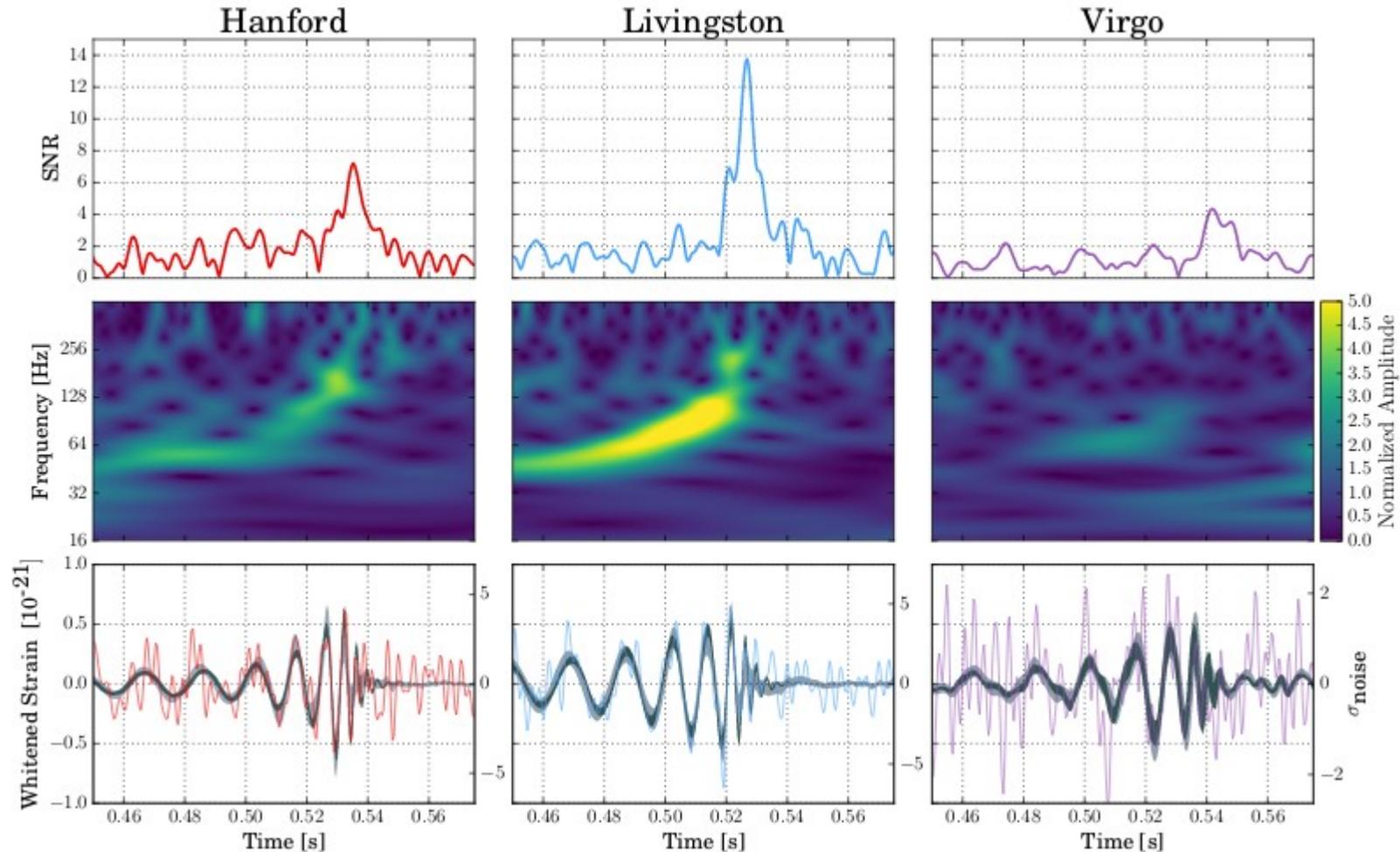
# Position de la source par « triangulation »

GW150914



600 degrés carrés

# GW170814: three-detector BBH event



30 Msun – 25 Msun,  $z \sim .11$

Much better sky localization (60 sq deg), non-GR polarization

<https://dcc.ligo.org/P170814> – Phys. Rev Letters accepted

# Filtre adapté (1)

Modèle du signal astrophysique  
(calque, "template")  
[Ici, un modèle-jouet]



Filtre  
Corrélation modèle-  
données

