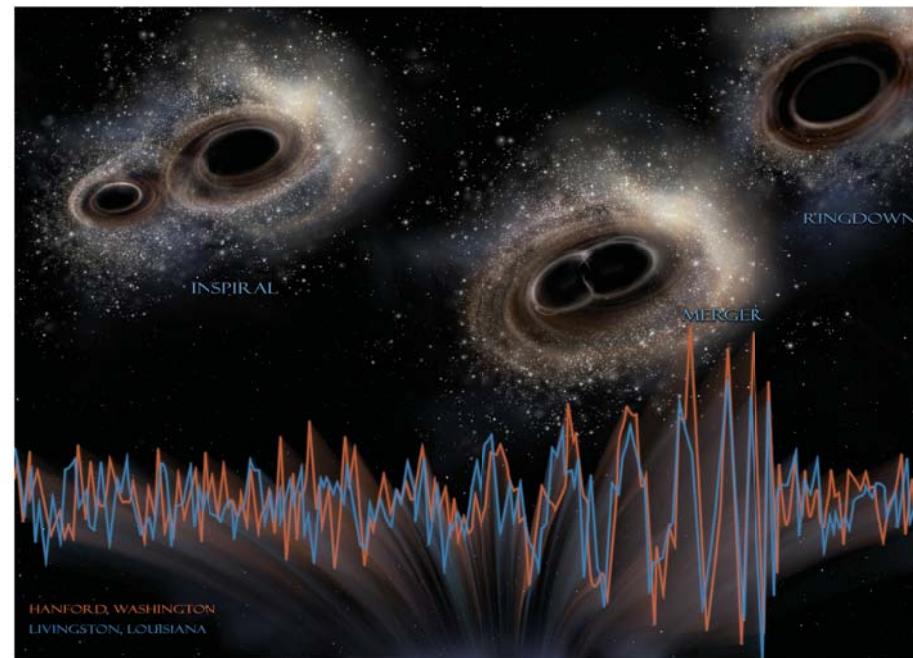
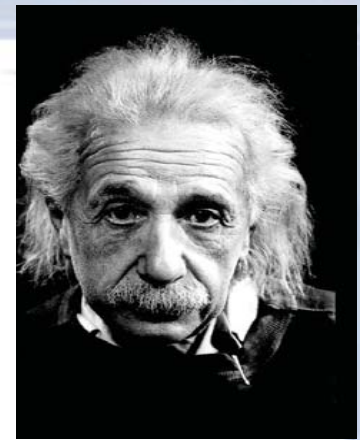


Observation de la coalescence de deux trous noirs par les détecteurs LIGO



Nicolas Leroy
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

Einstein (1915)

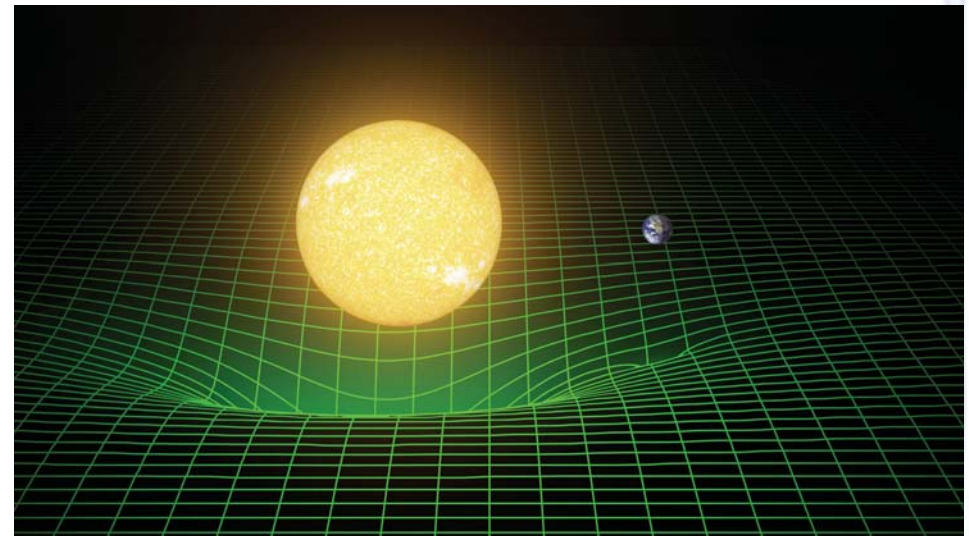


- La gravité ne résulte pas d'une force mais d'une déformation de l'espace temps
- Tout objet déforme l'espace-temps



$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

- Les objets en chute libre suivent la courbure de l'espace-temps
- Il n'existe plus de référentiel absolu



Quand les masses se déplacent ...

- Masses en mouvement :

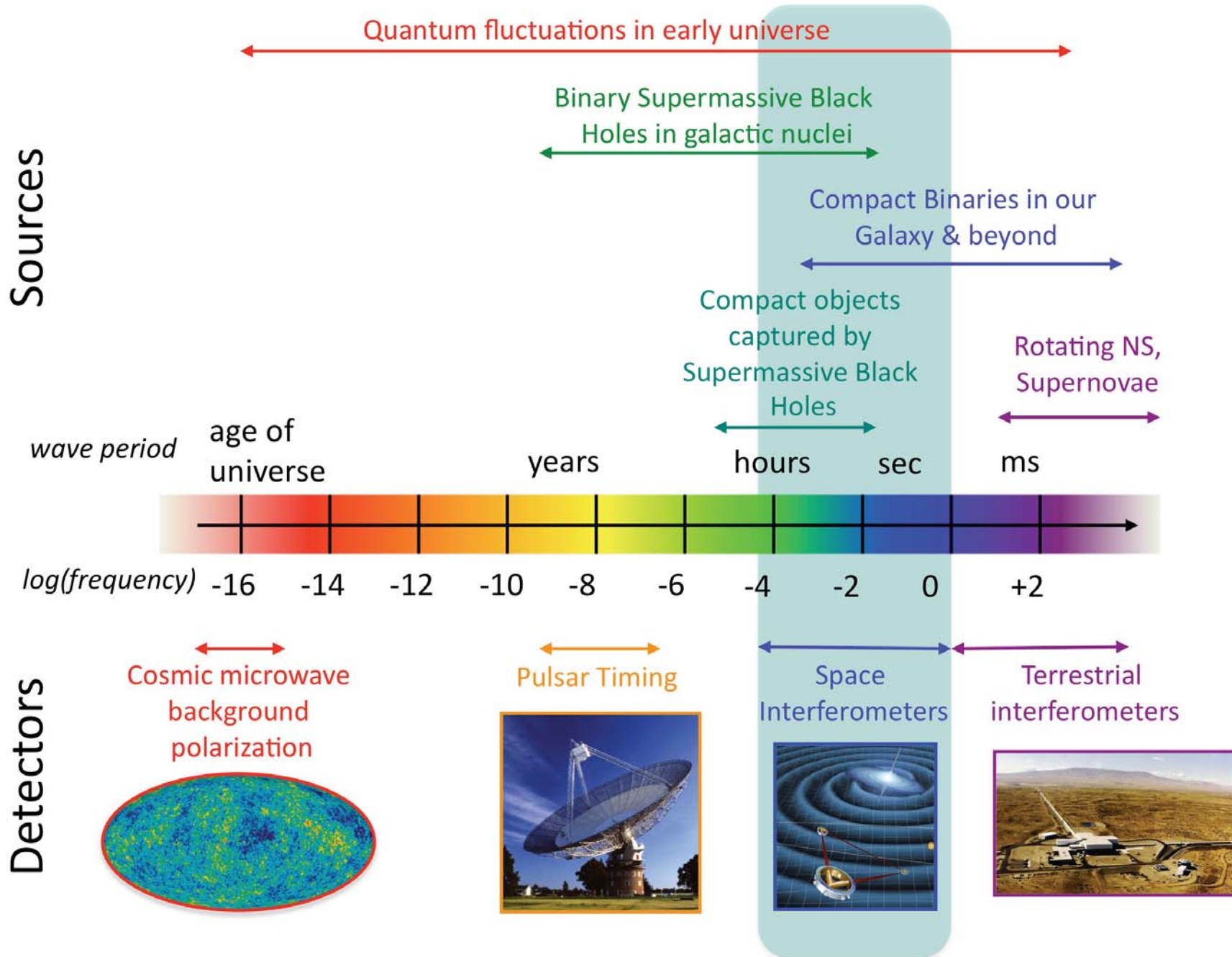
→ variation locale de la courbure

Animation déformation espace

→ propagation de la courbure
(comme une onde à la surface de l'eau)

Onde gravitationnelle propage une perturbation locale de l'espace-temps (à la vitesse c)

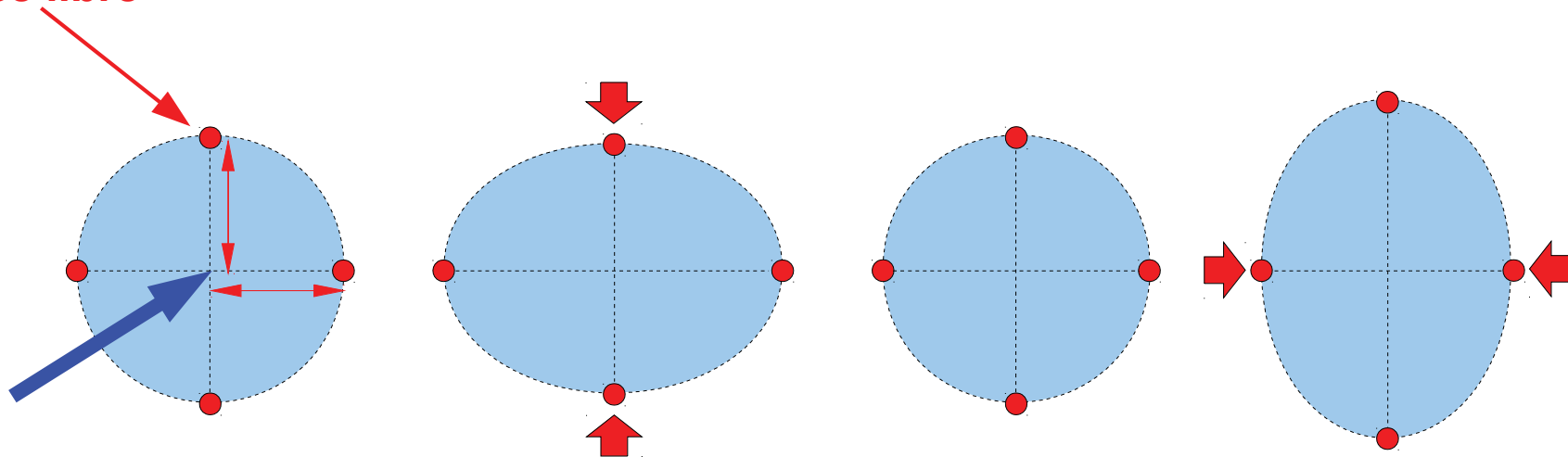
The Gravitational Wave Spectrum



Passage d'une onde

- Espace-temps légèrement modifié
→ les distances changent brièvement : $h = \delta L / L$
- h correspond au taux de déformation de l'espace-temps
- Très faible interaction avec la matière – accès aux grandes distances
- Détecter une onde gravitationnelle revient à détecter une variation relative de distance

Masse libre



Onde gravitationnelle

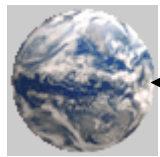
Interféromètre de Michelson

Animation Michelson

**L'état d'interférence dépend
de la différence de longueur
entre les deux chemins**

Pour détecter des OG ...

- Une OG va modifier la longueur des deux chemins optiques
- On obtient une figure d'interférence différente
- Réglons nous sur la frange noire
- Si OG, le détecteur va recevoir de la lumière
- La quantité de lumière sera proportionnelle à l'amplitude h de l'onde incidente
- Toutefois cela revient à :

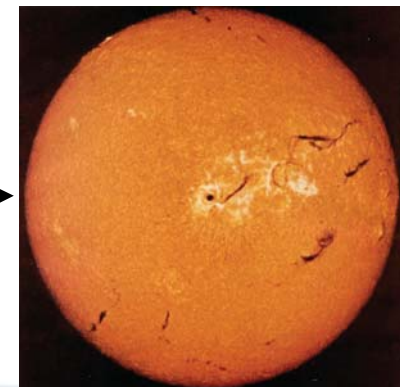


Terre

Mesurer une distance de l'ordre de
150 millions de kilomètres

à un atome près

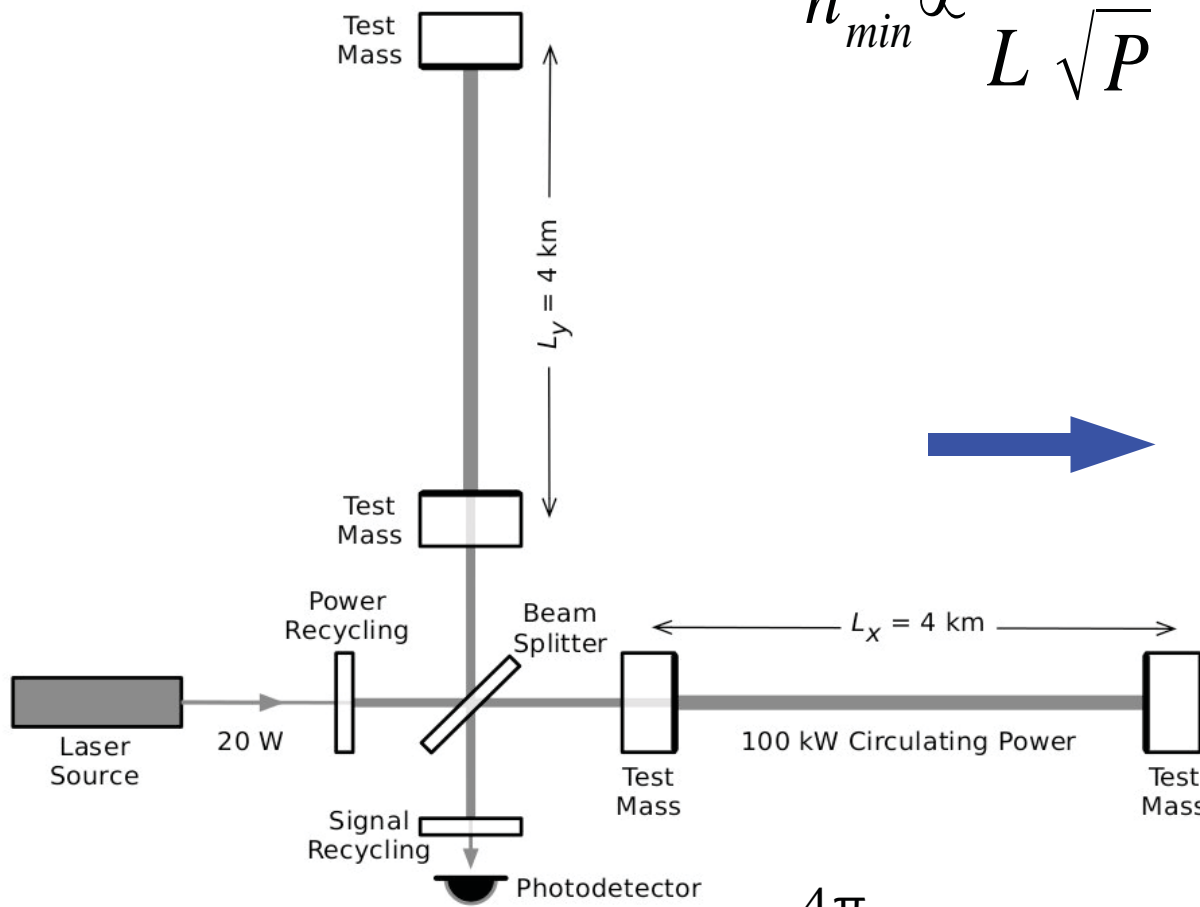
Soleil



Détecteurs interférométriques

$$h_{min} \propto \frac{1}{L} \frac{1}{\sqrt{P}}$$

Bras kilométriques
Cavités Fabry-Perot
Laser de haute puissance
Miroirs de recyclage



$$h_{min} \approx 10^{-23}$$

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} Lh$$

Ensemble maintenu en résonance
par un contrôle à 10 kHz

Un réseau mondial de détecteurs

LIGO -
Hanford 4 km



G1: 600 m



V1: 3 km



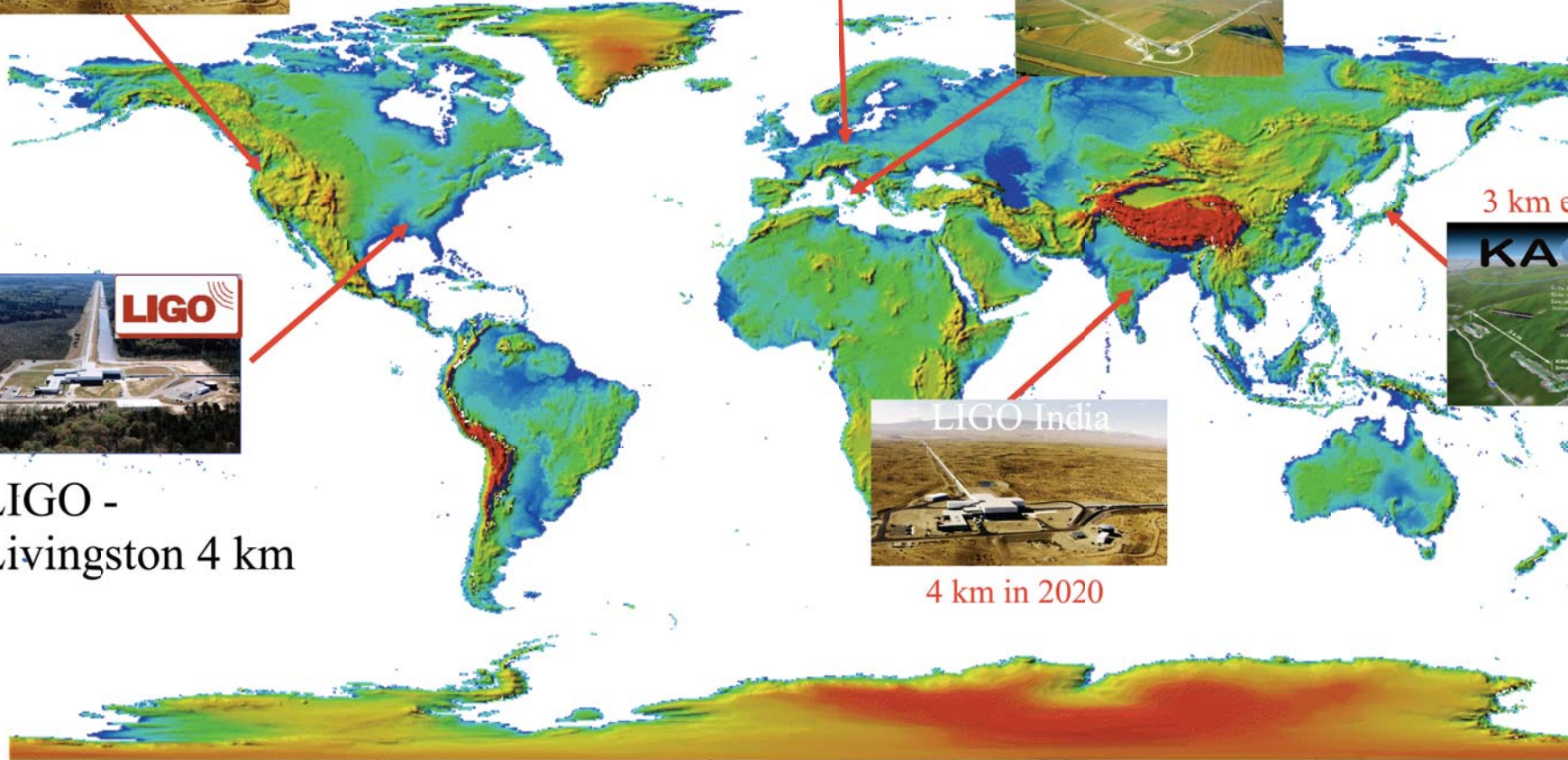
LIGO -
Livingston 4 km



4 km in 2020



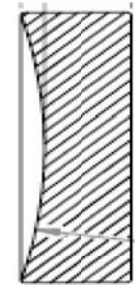
3 km en 2017





Détection sur notre bonne vieille Terre

- Avoir une masse de référence de la métrique en s'isolant du sol
 - Système d'isolation sismique (limite basse en fréquence)
- Avoir un laser de haute puissance (20/200 W) stable en puissance et en fréquence 24h/24
- Avoir des miroirs de qualité optique à la limite des techniques actuelles
 - Réflectivité de 99.9999 %
 - Courbure de plusieurs kms sur 30 cm (flèche de 1 μm)
 - Matériau pour avoir le moins de bruit thermique
- Mettre l'ensemble du système sous-vide ($\sim 7000 \text{ m}^3$ à 10^{-9} mbar)
- Contrôler en permanence le système (à 10 kHz) pour le garder à son point de fonctionnement optimal

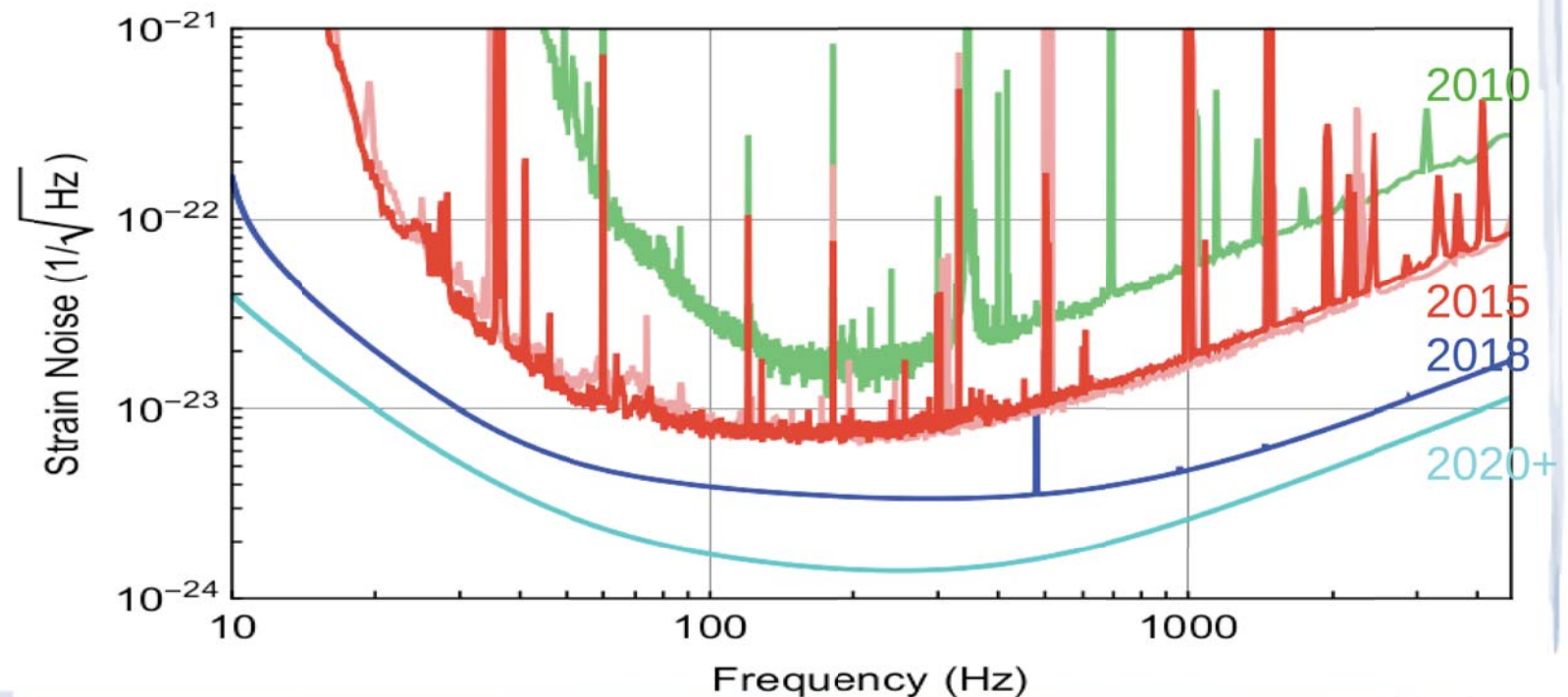


Analyse des données

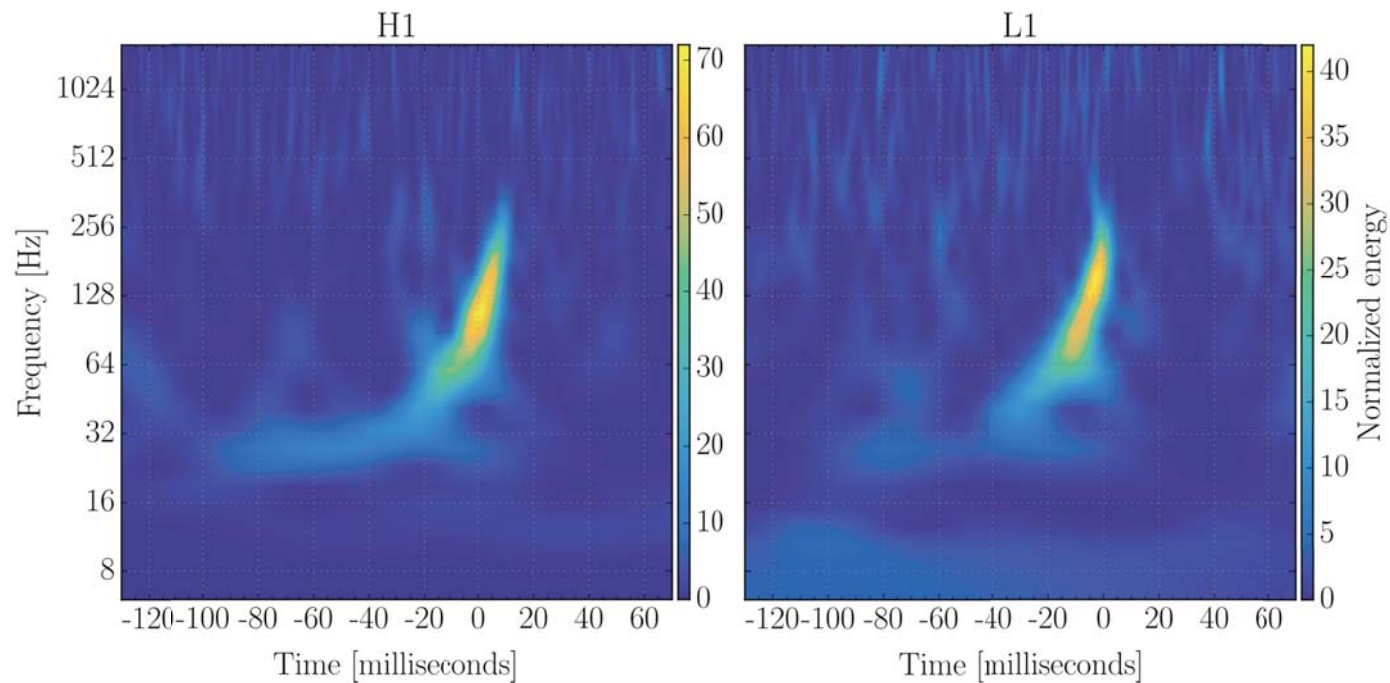
- Tenir compte de la nature des objets astrophysiques recherchés
- Différents types d'analyse selon le type de signal
- Savoir reconnaître un problème du/des détecteurs par rapport à un vrai événement
 - taux d'événements en sortie d'analyse ($\sim 1/s$)
 - taux attendu d'OG : au mieux 1 tous les quelques mois
 - Rapport 1 / 10 000 000
- Reconstruire les caractéristiques de cet événement

Le premier run scientifique d'Advanced LIGO

- Après une période de mise au point, les détecteurs sont stables au mois de septembre 2015
- Horizon (BNS) : 70-80 Mpc
- Soit 3-4 plus sensible que LIGO initial
- Cela correspond à pouvoir accéder à un volume 30 à 60 fois plus important



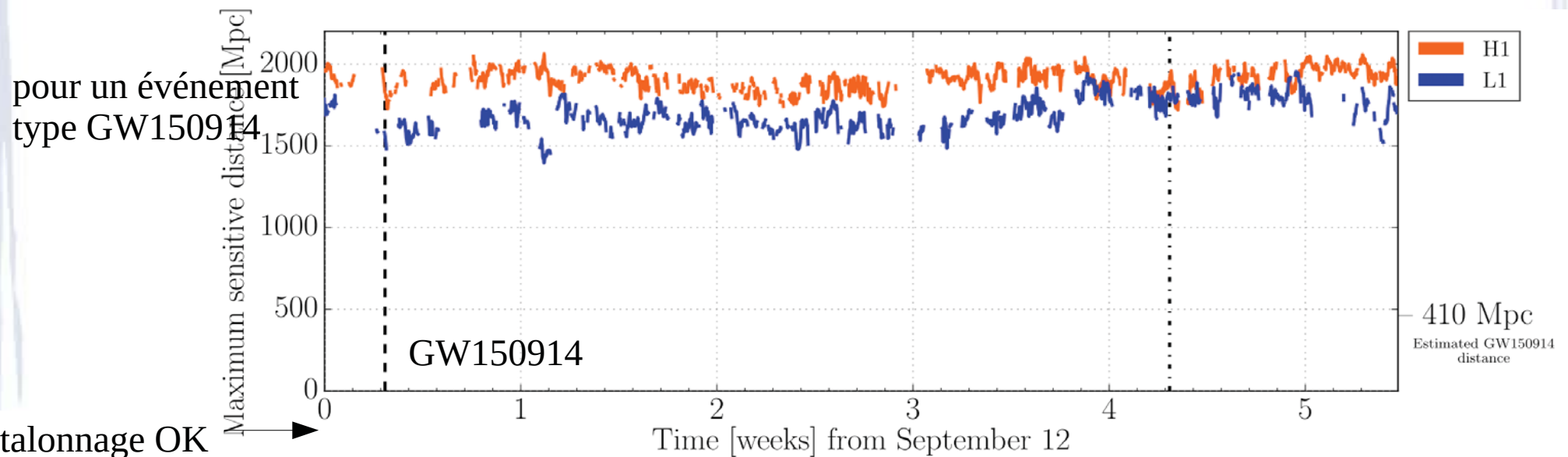
Le 14 septembre 2015 10:51 UTC



- Cet événement a été détecté en ligne en moins de 3 minutes
- Dans l'heure qui suit, envoi d'un message à l'ensemble des groupes de travail avec les premières études du bruit autour de l'événement
- Premières estimations des paramètres dans les deux heures
- Envoi d'une alerte aux astronomes partenaires au bout de 44 heures

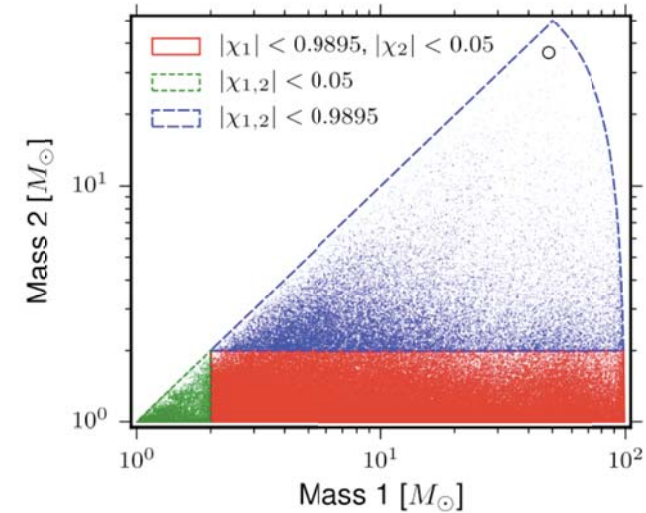
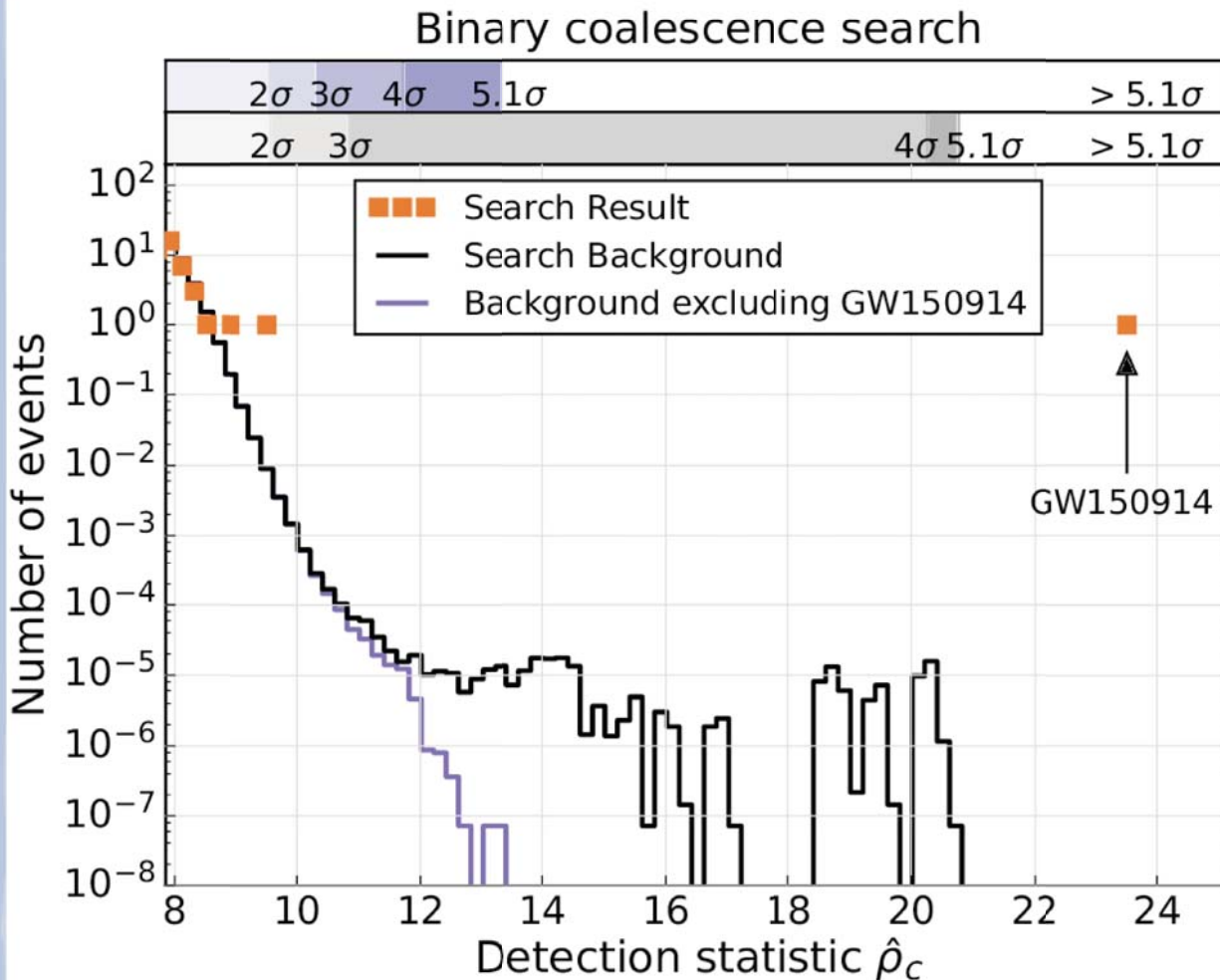
Actions pour vérifier l'événement

- Décision de ne pas modifier le détecteur pour estimer le bruit de fond sur une grande période
- Début des investigations sur l'ensemble du détecteur, 200 000 canaux donnant des informations sur l'instrument et l'environnement sont auscultés
- Vérifications effectuées pour vérifier que personne ne pouvait introduire ce signal « à la main »
- Qualité des données vérifiées sur plusieurs semaines : bonne et stable



Est-il si unique ou est-ce du bruit ?

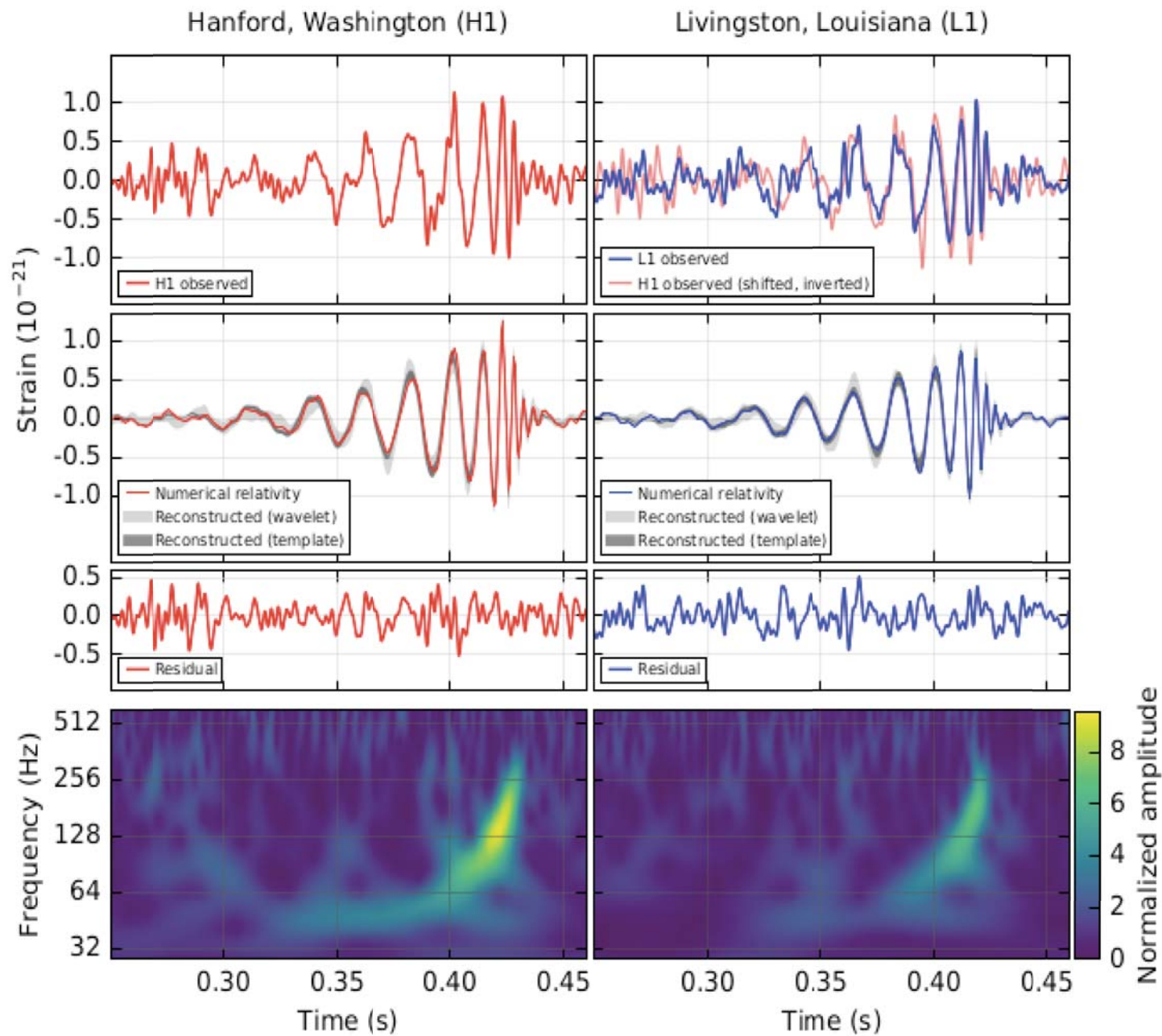
- Analyse basée sur forme d'onde
200 000 calques



Taux de fausse alarme :
< 1evt/200 000 ans

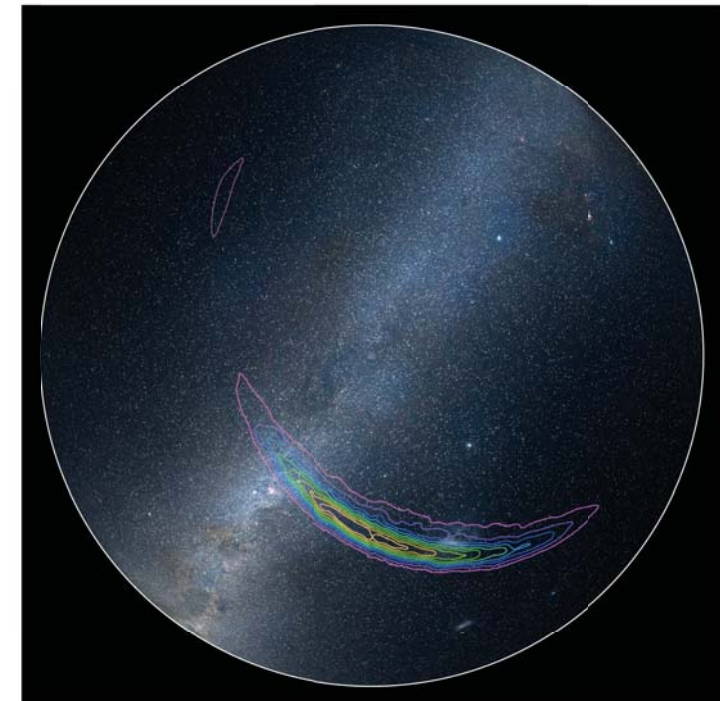
Probabilité fausse détection
< 2×10^{-7} soit $> 5.1 \sigma$

Signal reconstruction



Que peut-on en dire ?

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~ 10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 190 to 590 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	$< 1.2 \times 10^{-22}$ eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		



Principaux résultats

- Première détection d'un événement astrophysique via les ondes gravitationnelles
- Première détection directe d'un couple de trous noirs
- Les trous noirs de plus de $15 M_{\odot}$ et $< 1000 M_{\odot}$ existent
- Observation de la coalescence de deux trous noirs
- Nous sommes capables d'effectuer de nouveaux tests de la Relativité Générale (en champ fort)
- Formation des trous noirs massifs

En très bref

- Les collaborations LIGO et Virgo ont annoncé la découverte de la coalescence de deux trous noirs (29 et 36 masses solaires) formant au final un trou noir final de 62 masses solaires via l'émission émise sous forme d'onde gravitationnelle

Publication dans
Physical Review Letters
rassemblant 1009 auteurs des
collaborations LIGO et Virgo
(dont 75 auteurs français) dans
133 groupes (dont 6
laboratoires français)

