

# Autour de la découverte des ondes gravitationnelles

Loïc Rolland



*Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules*  
(<http://lapp.in2p3.fr/>)



Site web de Virgo : <http://public.virgo-gw.eu/>  
Site web de LIGO : <http://www.ligo.org/>



## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$  and  $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , with  $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.



~1500 auteurs  
(chercheurs et ingénieurs)



untitled - PhysRevLett.116.241103 - Mozilla Firefox


Search for ... x Traduction ... x Network L... x Virgo TDS x Virgo Logb... x 34551\_20... x eZuce ope... x Déchèteries x untitled - Phy... x

journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.241103

Les plus visités VIRGO Virgo LAPP DAQ SeeVogh CNRS LAPP Page Perso Collins Météo Tennis Divers

Page: 1 sur 14 140%

PRL 116, 241103 (2016) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 17 JUNE 2016



**GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence**

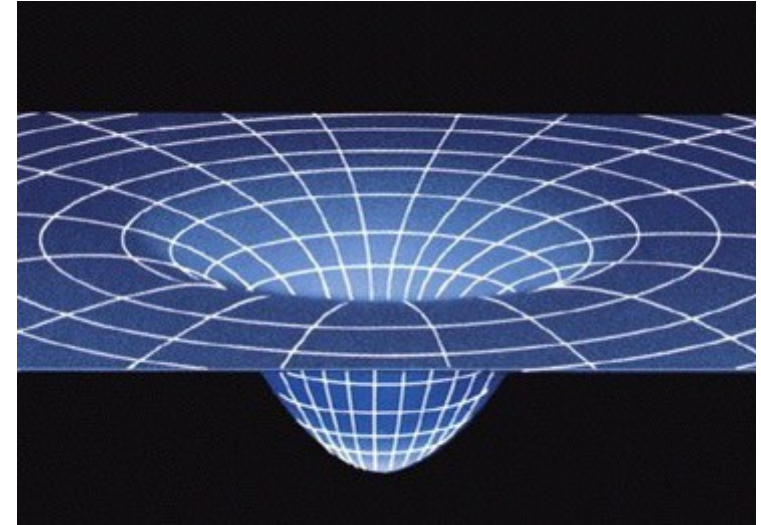
B. P. Abbott *et al.*<sup>\*</sup>  
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)  
(Received 31 May 2016; published 15 June 2016)

We report the observation of a gravitational-wave signal produced by the coalescence of two stellar-mass black holes. The signal, GW151226, was observed by the twin detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) on December 26, 2015 at 03:38:53 UTC. The signal was initially identified within 70 s by an online matched-filter search targeting binary coalescences. Subsequent off-line analyses recovered GW151226 with a network signal-to-noise ratio of 13 and a significance greater than  $5\sigma$ . The signal persisted in the LIGO frequency band for approximately 1 s, increasing in frequency and amplitude over about 55 cycles from 35 to 450 Hz, and reached a peak gravitational strain of  $3.4_{-0.9}^{+0.7} \times 10^{-22}$ . The inferred source-frame initial black hole masses are  $14.2_{-3.7}^{+8.3} M_{\odot}$  and  $7.5_{-2.3}^{+2.3} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $20.8_{-1.7}^{+6.1} M_{\odot}$ . We find that at least one of the component black holes has spin greater than 0.2. This source is located at a luminosity distance of  $440_{-190}^{+180}$  Mpc corresponding to a redshift of  $0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . All uncertainties define a 90% credible interval. This second gravitational-wave observation provides improved constraints on stellar populations and on deviations from general relativity.



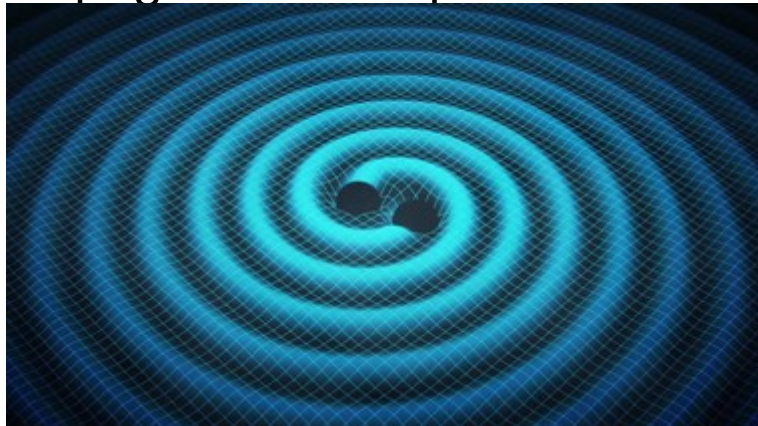
# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

**Théorie de la Relativité Générale :**  
Gravité = déformation de l'espace-temps



**Vue d'artiste d'une onde gravitationnelle**

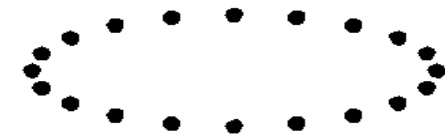
Propagation d'une perturbation de l'espace-temps



Onde transverse  
Deux polarisations  
Vitesse de propagation : c

**Effet « détectable »  
d'une onde gravitationnelle**

$$h = \frac{1}{2} \frac{\delta L}{L}$$



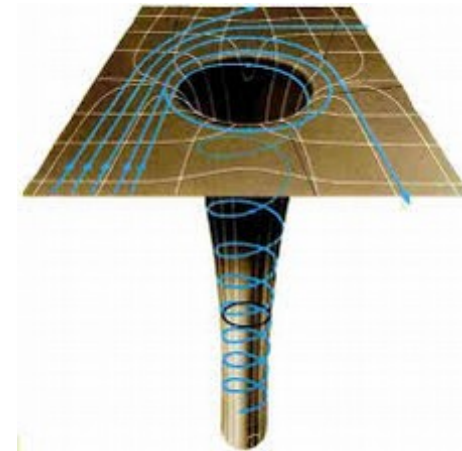
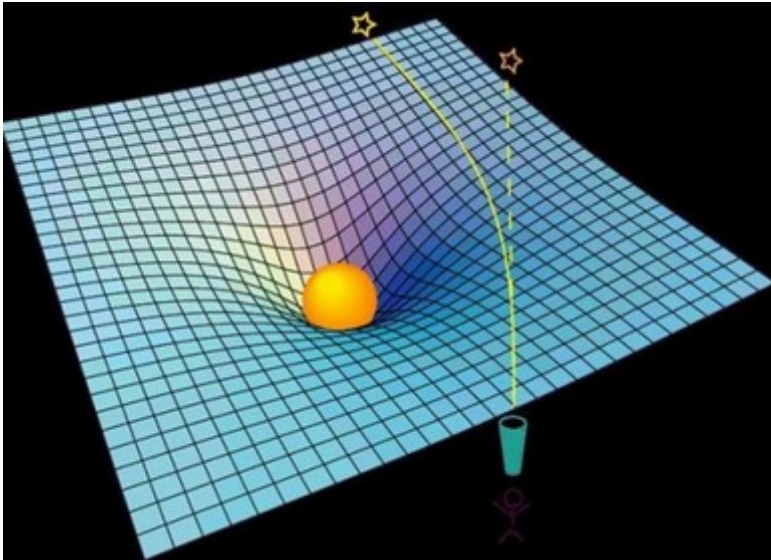
# Qu'est-ce qu'un trou noir ?

**Objet très très très « dense »**

Exemple : la masse du Soleil dans une boule de 3 km de rayon

**Puits gravitationnel**

→ la lumière ne peut s'en échapper



« singularité »



# Que verrait-t-on face à un trou noir ?

**Objet très très très « dense »**

Exemple : la masse du Soleil dans une boule de 3 km de rayon



Illustration : que verrait-on si on était proche d'un trou noir ?

# Première détection des ondes gravitationnelles (OG)

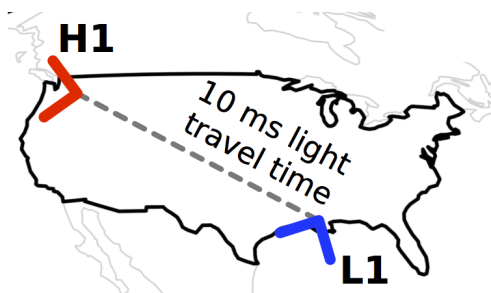
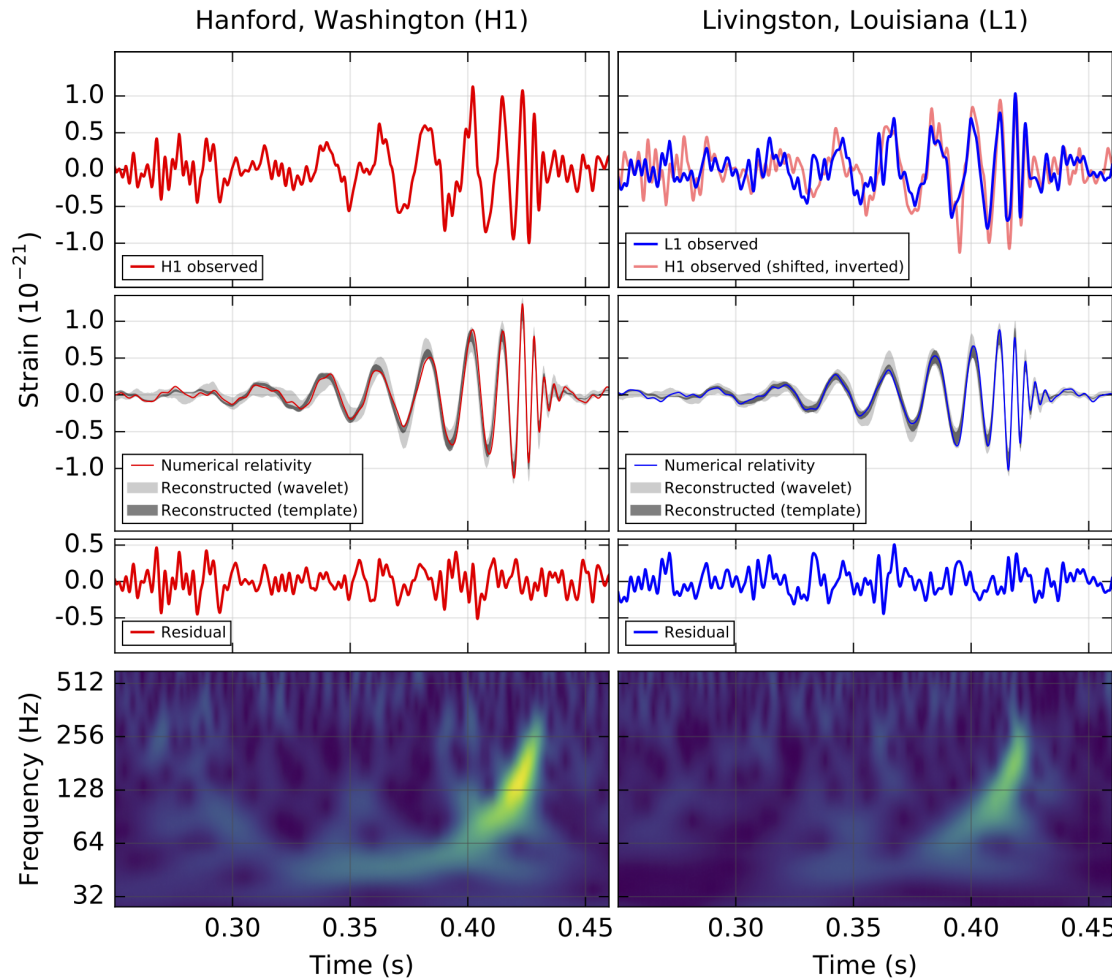
14 Sept 2015, 9h50m45s UTC

Vue dans les 2 détecteurs LIGO  
à 7 ms d'intervalle

Signal observable à partir de 30 Hz :  
durée **~200 ms**  
Nombre de cycles **~10**

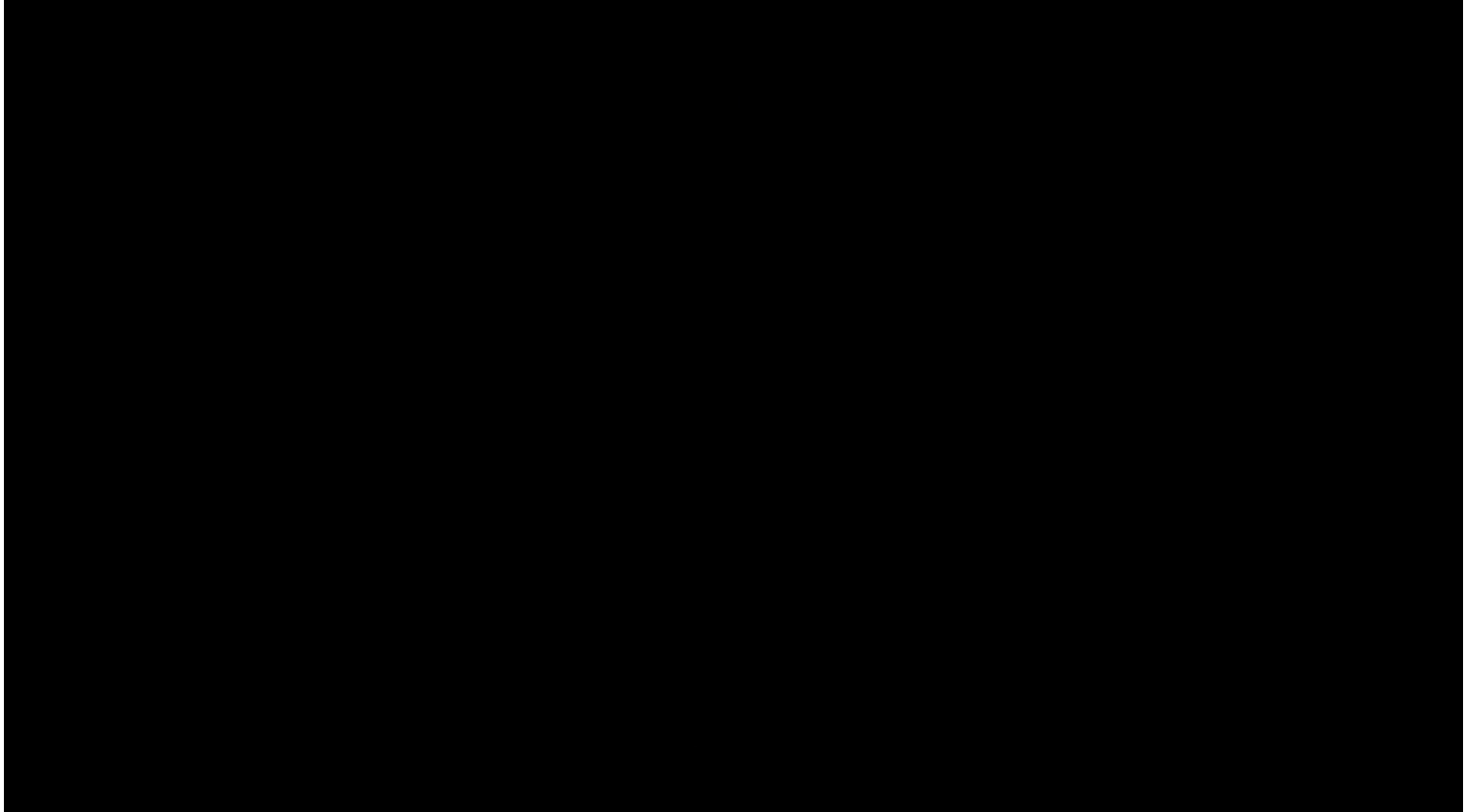
Amplitude au pic de l'onde :  **$1 \times 10^{-21}$**   
fréquence 150 Hz ( $\lambda \sim 2000$  km)

Rapport signal-sur-bruit : 24  
Taux de fausse alarme : <1 en 200000 ans

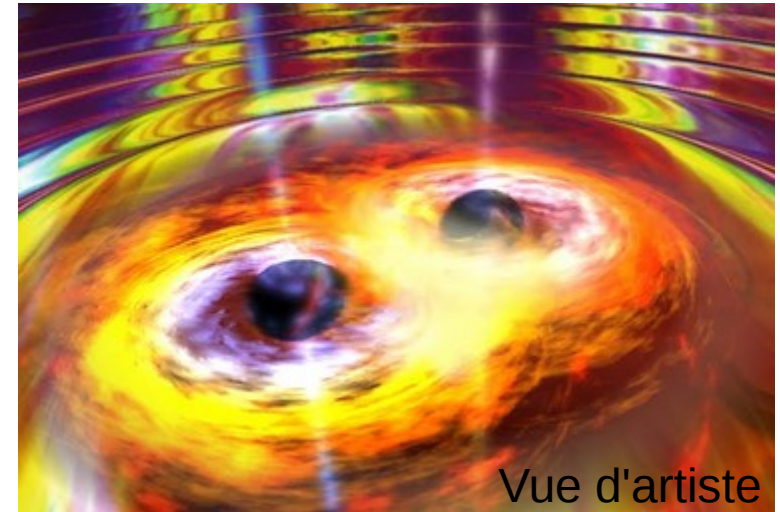
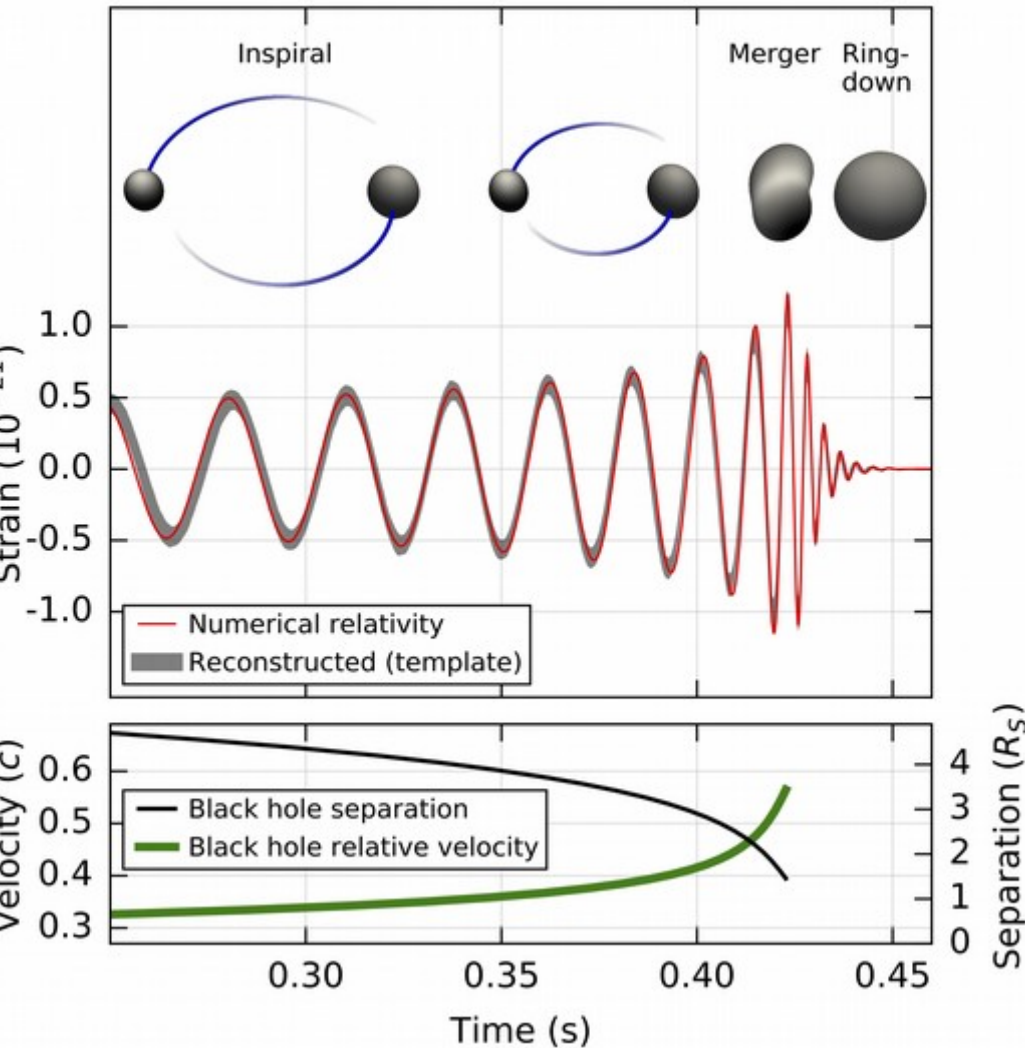


Les deux détecteurs LIGO  
aux États-Unis

# « Entendre » les ondes gravitationnelles !



# Première observation d'une fusion de deux trous noirs



## Trous noirs initiaux :

Masses :  $(36 \pm 5) M_{\odot}$  et  $(29 \pm 4) M_{\odot}$

Tournant jusqu'à 0,6 fois la vitesse de la lumière

## Trou noir final :

Masse :  $(62 \pm 4) M_{\odot}$

Spin  $\sim 70\%$  du maximum

Horizon  $\sim 180$  km

**Énergie rayonnée en OG :**  $(3.0 \pm 0.5) M_{\odot}$

**Distance :**  $(1,3 \pm 0,5) \times 10^9 \pm$  années-lumière



# Simulation d'une collision de trous noirs

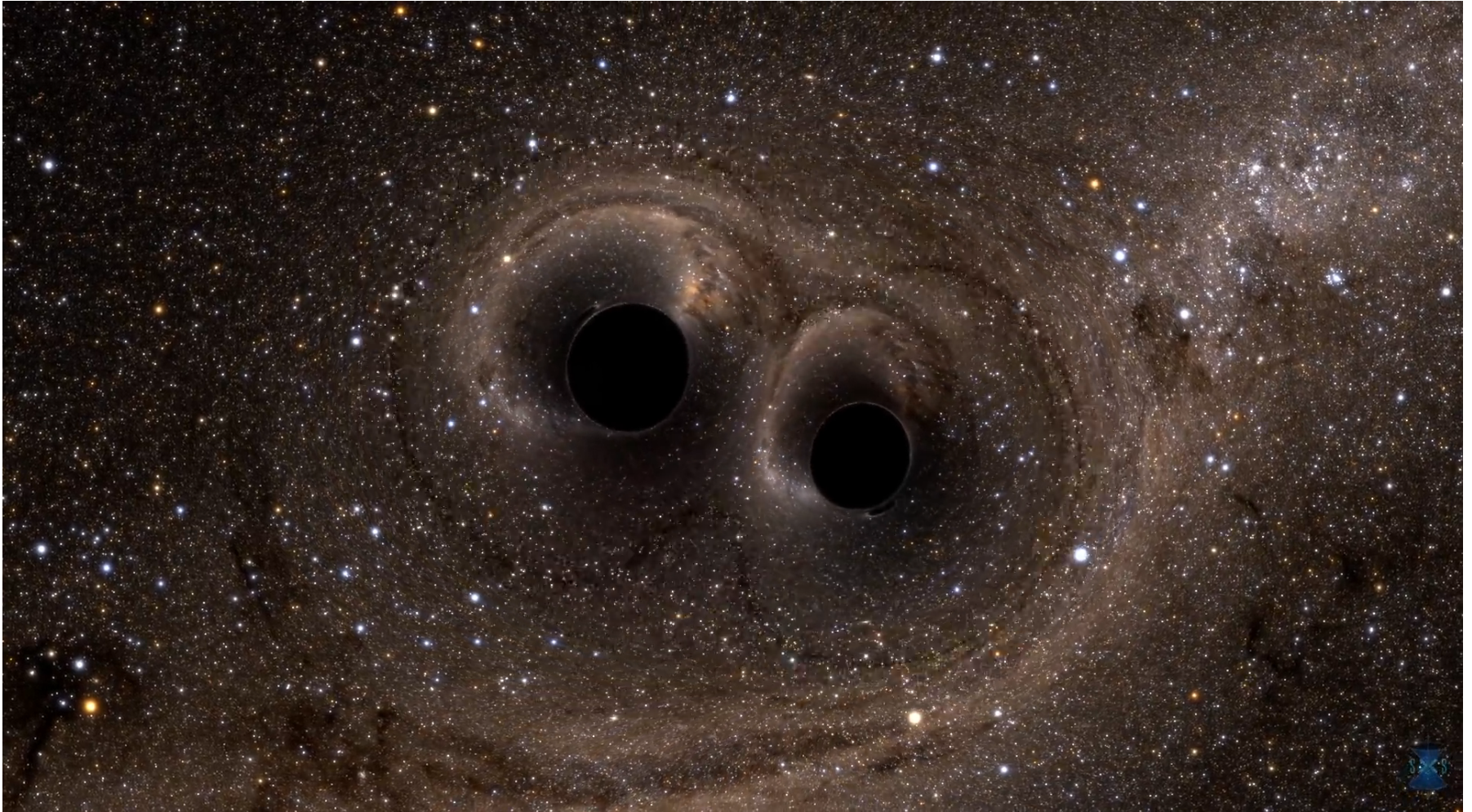


Illustration : que verrait-on si on était proche de trous noirs spiralant et fusionnant ?

LIGO Lab Caltech : MIT

(trous noirs de  $30 M_{\odot}$  → horizon de  $\sim 90$  km)



# Simulation d'une collision de trous noirs...

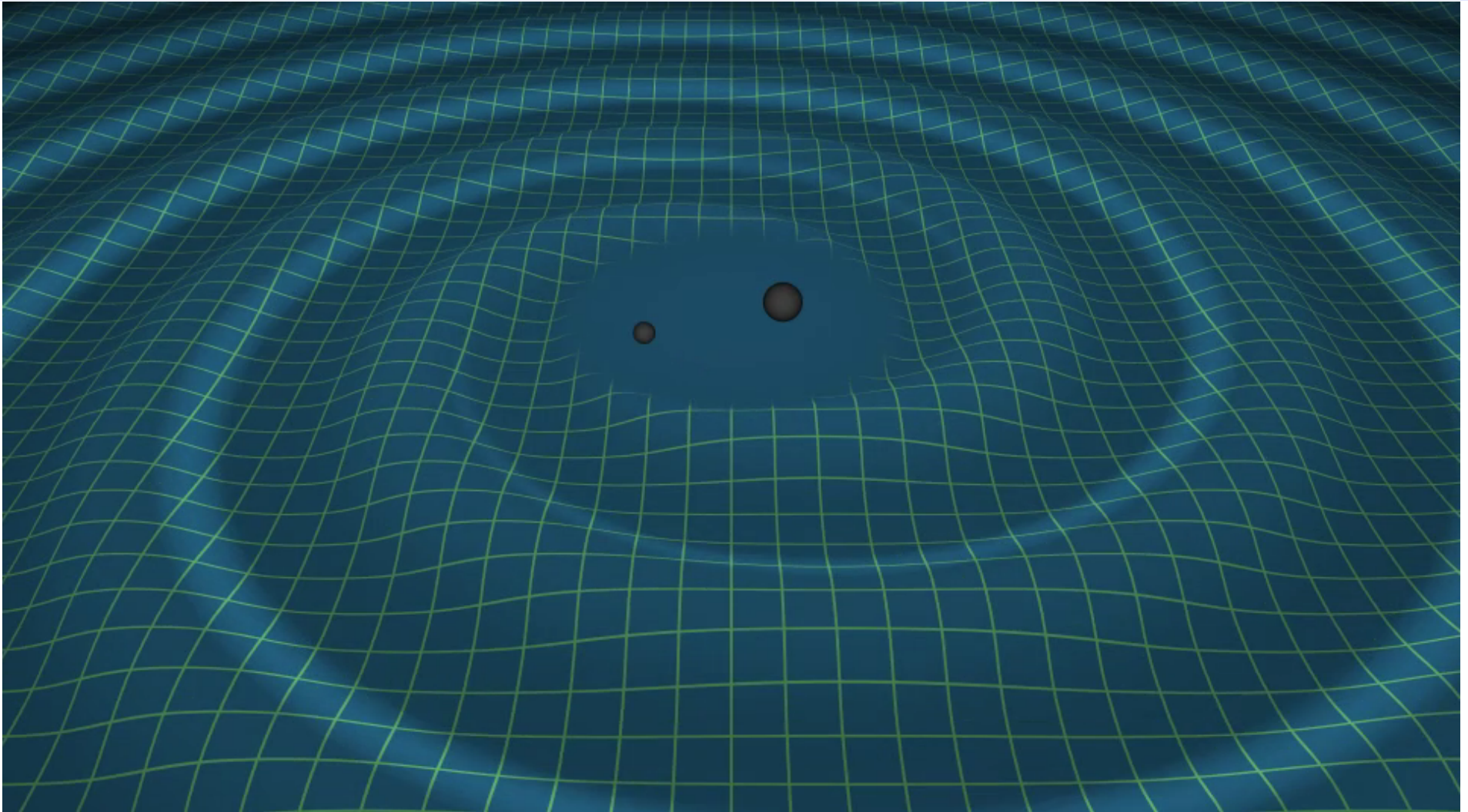
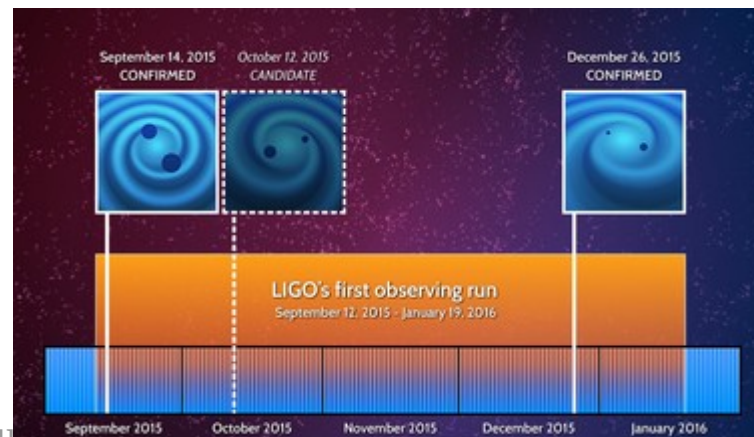
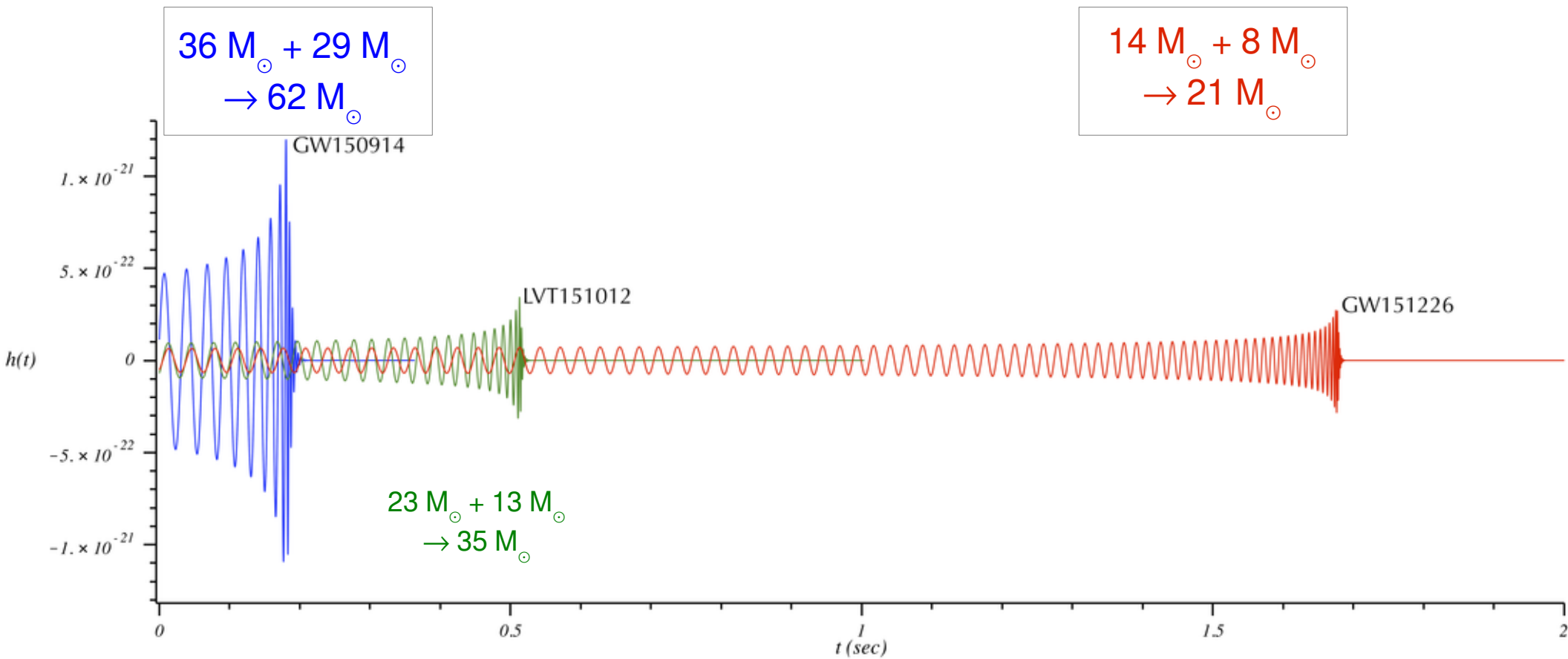


Illustration : émission d'ondes gravitationnelles par les deux trous noirs

LIGO Lab Caltech : MIT

# Comparaison des signaux détectés



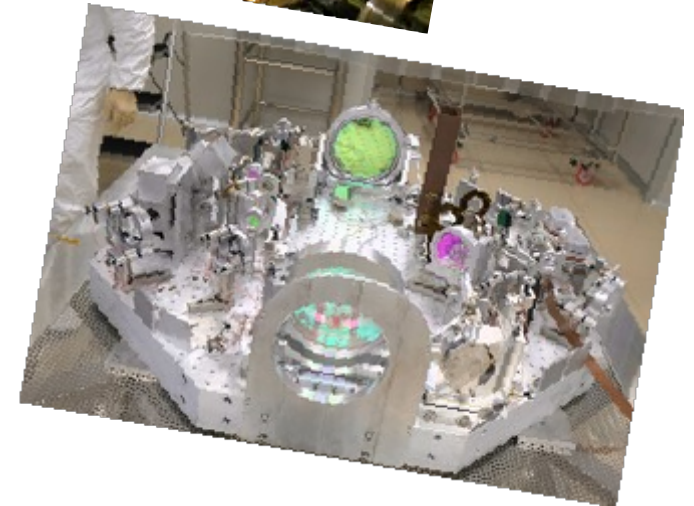


# Quels détecteurs pour ces ondes gravitationnelles ?



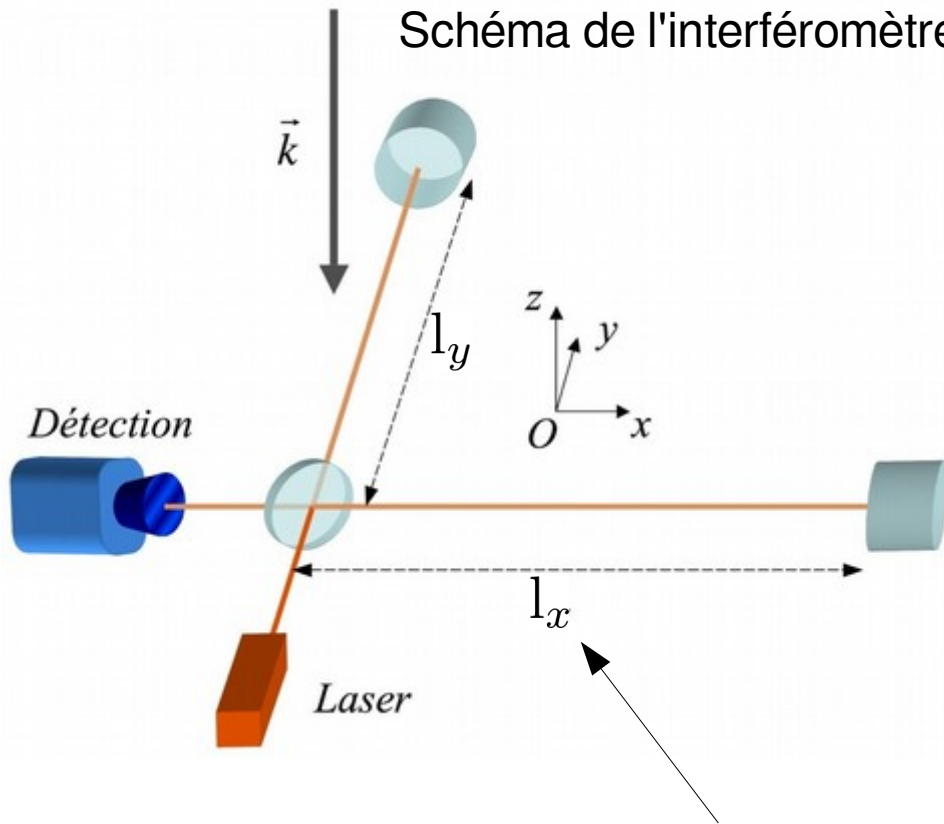


# Des interféromètres kilométriques

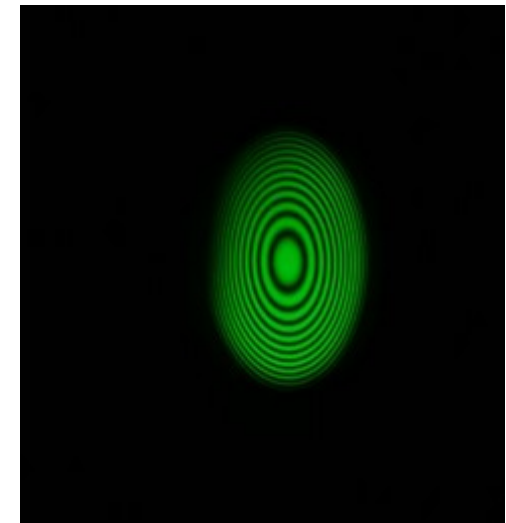


# Un interféromètre de Michelson

Schéma de l'interféromètre



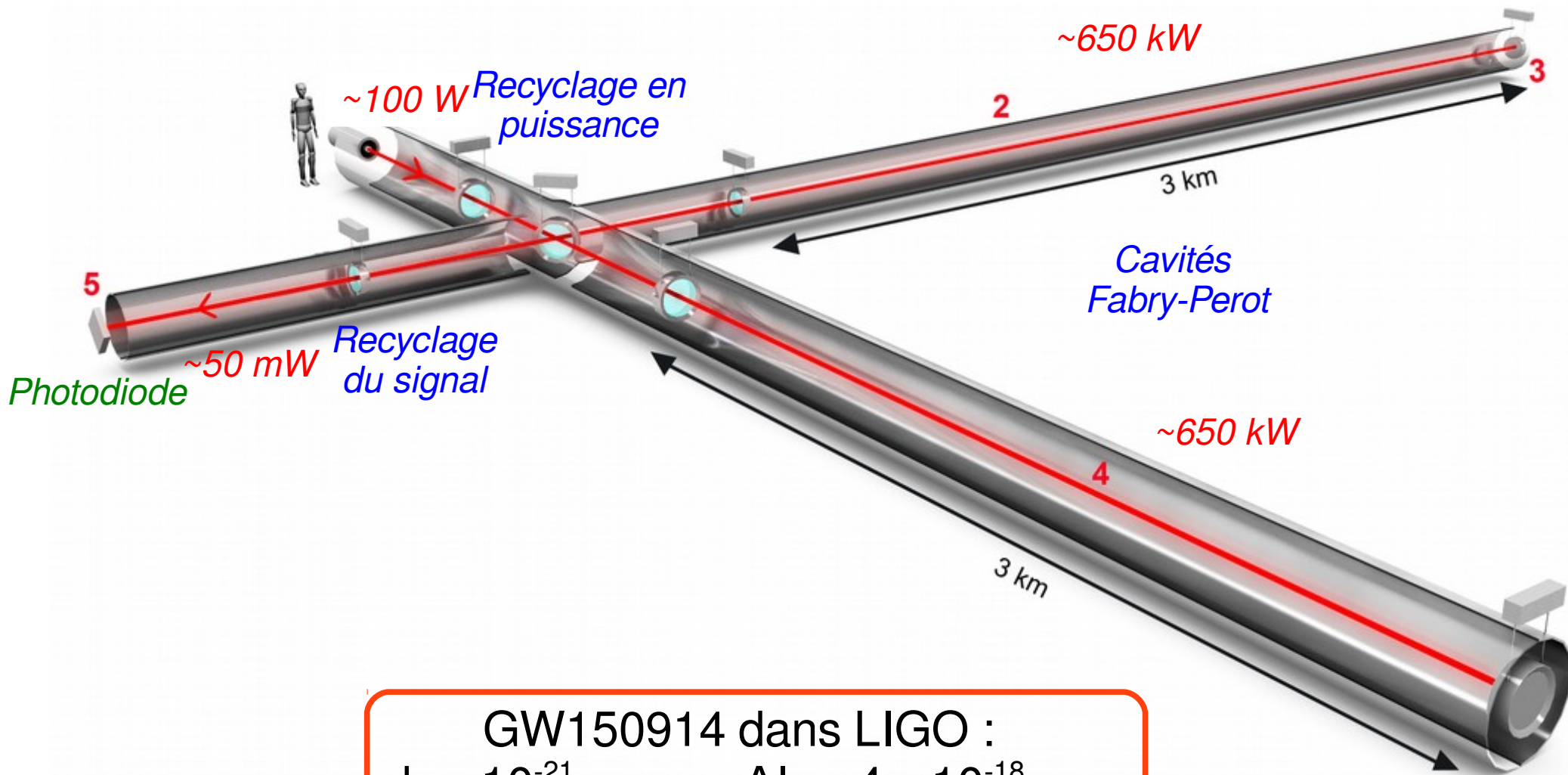
La figure d'interférence dépend de  $\Delta L$ :  
 $\Delta L(t) = l_x(t) - l_y(t)$



Longueur des bras:  $L_0 = 3 \text{ km}$

# Vue générale des interféromètres Advanced Virgo et Advanced LIGO

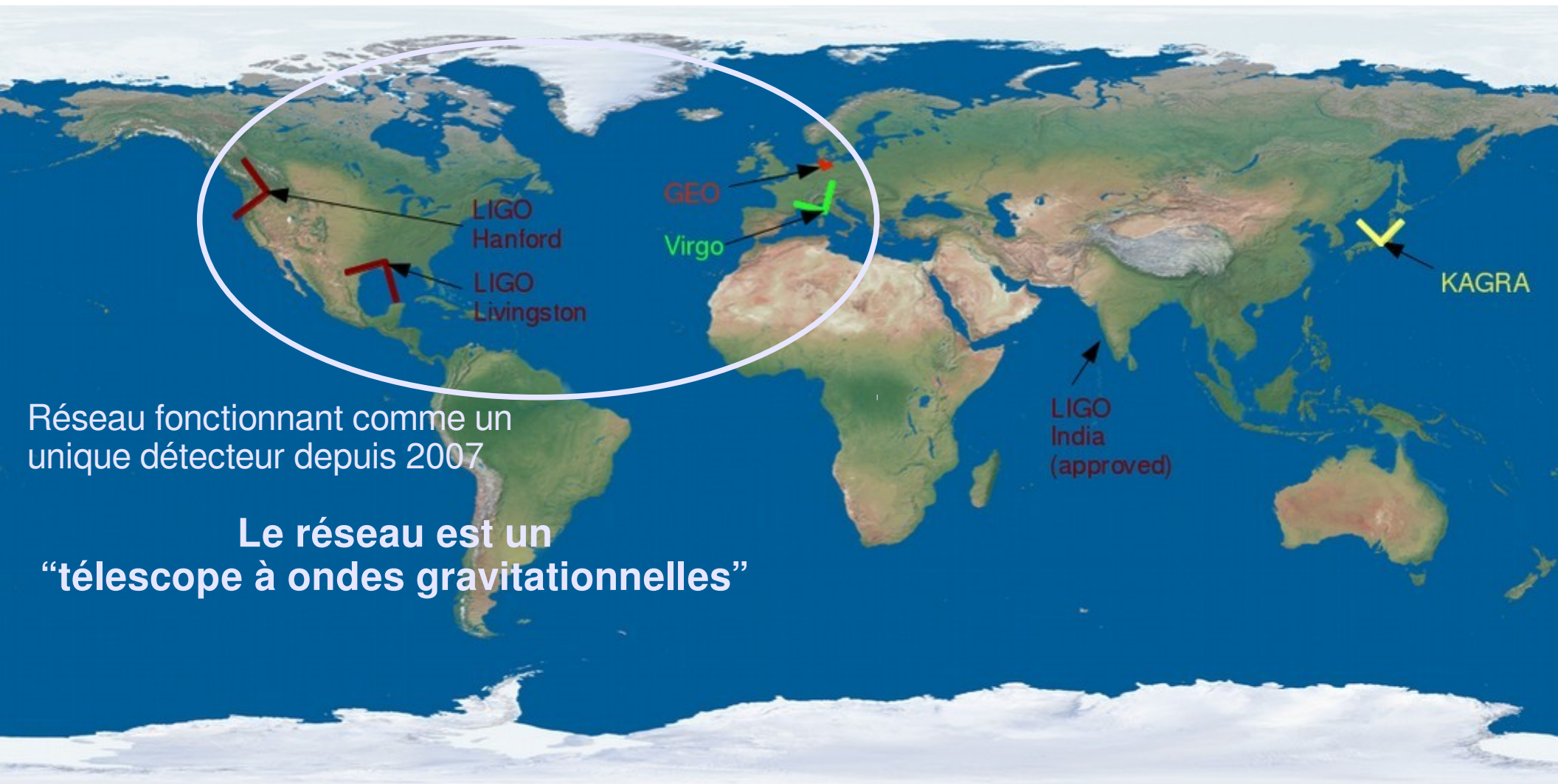
Vue d'artiste de l'interféromètre Virgo



GW150914 dans LIGO :  
 $h = 10^{-21} \rightarrow \Delta L = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$



# Un réseau international d'interféromètres

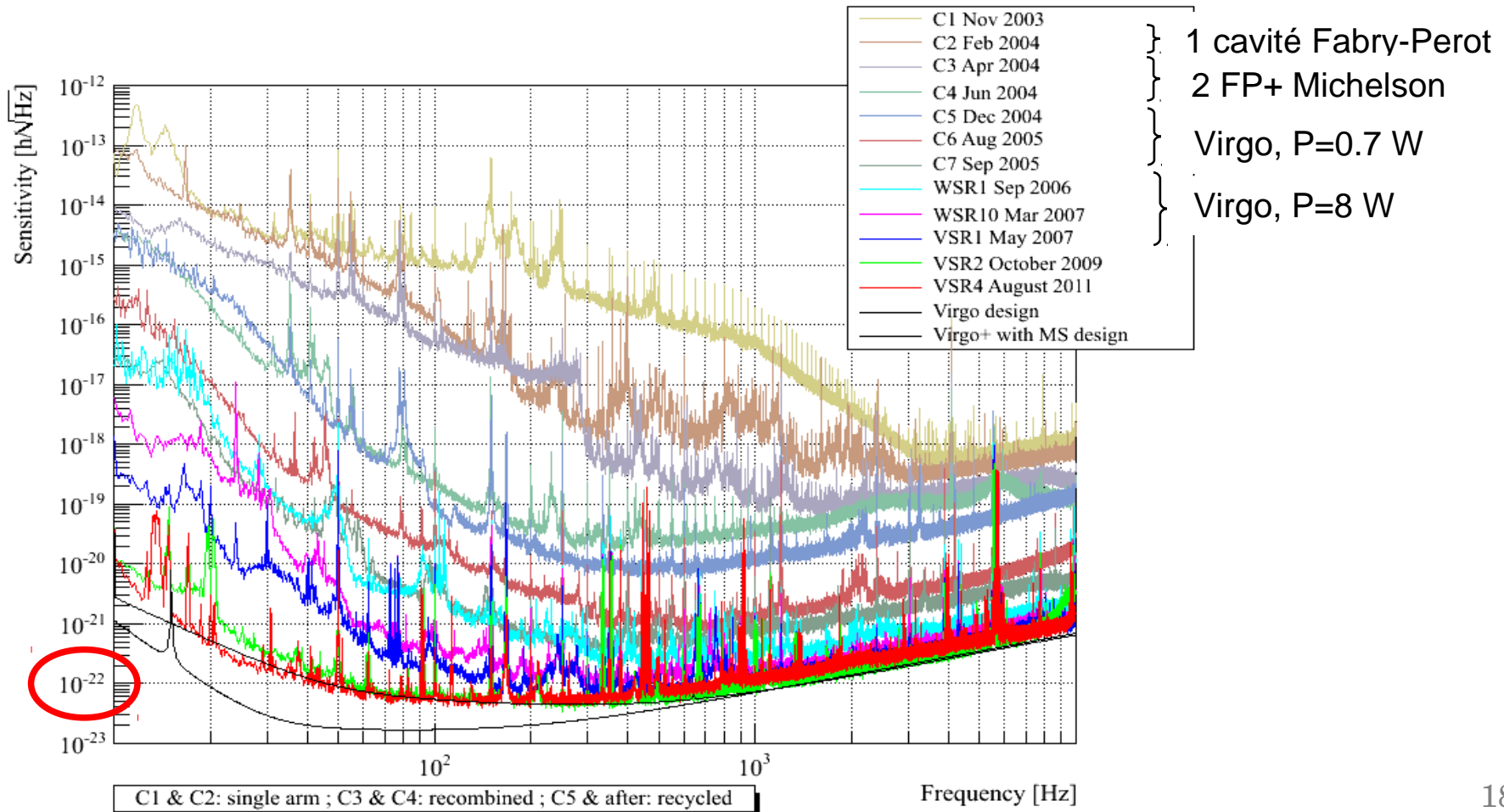
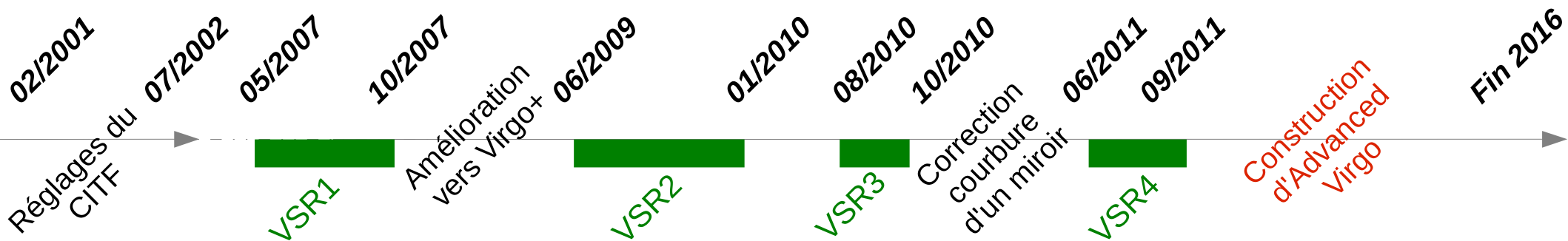


Réseau fonctionnant comme un unique détecteur depuis 2007

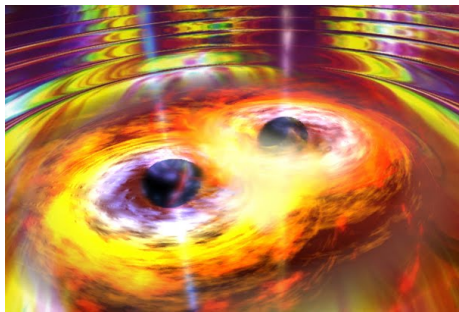
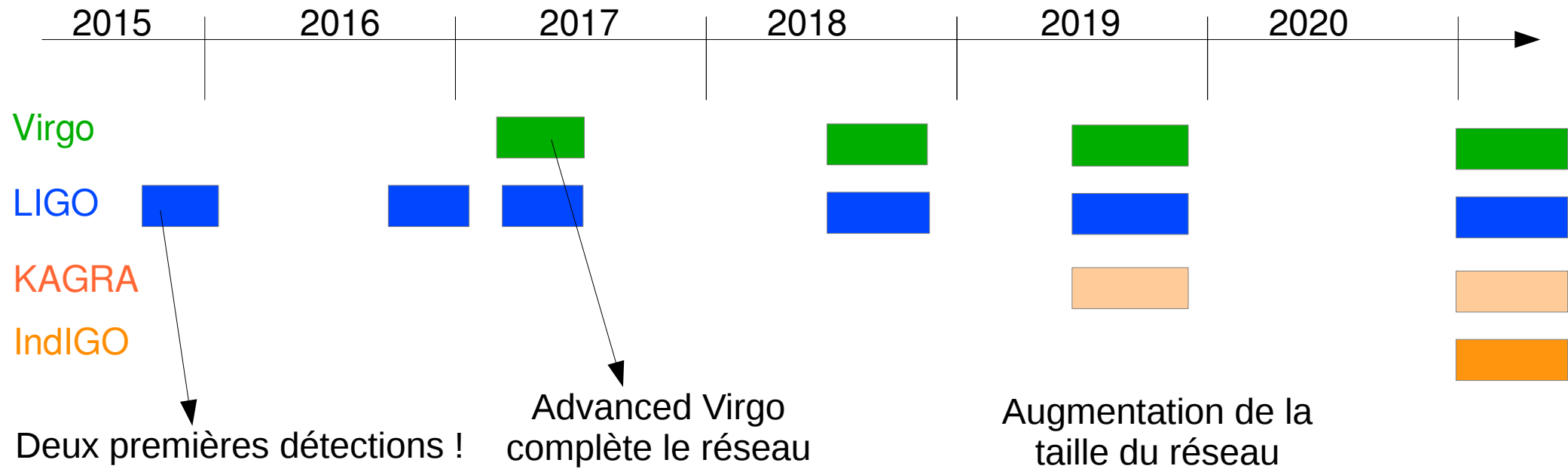
**Le réseau est un “téléscope à ondes gravitationnelles”**

- ✓ Réjection des bruits locaux (coïncidence) → meilleure sensibilité
- ✓ Localisation des sources (triangulation) → astronomie

# Un petit historique de Virgo (et LIGO)



# De plus en plus de détections à venir...



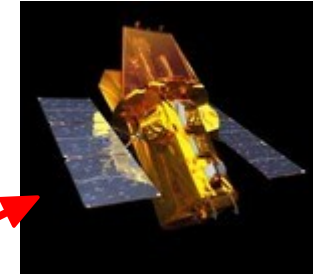
# Alertes pour des observations multi-messagers



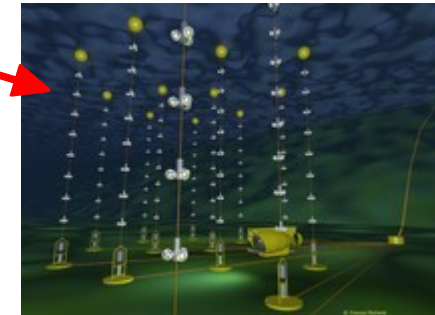
**Optique**



**Radio**



**Rayons X et  $\gamma$**



**Neutrinos**

- Augmenter la confiance dans les événements
- Mieux comprendre les phénomènes physiques des sources détectées



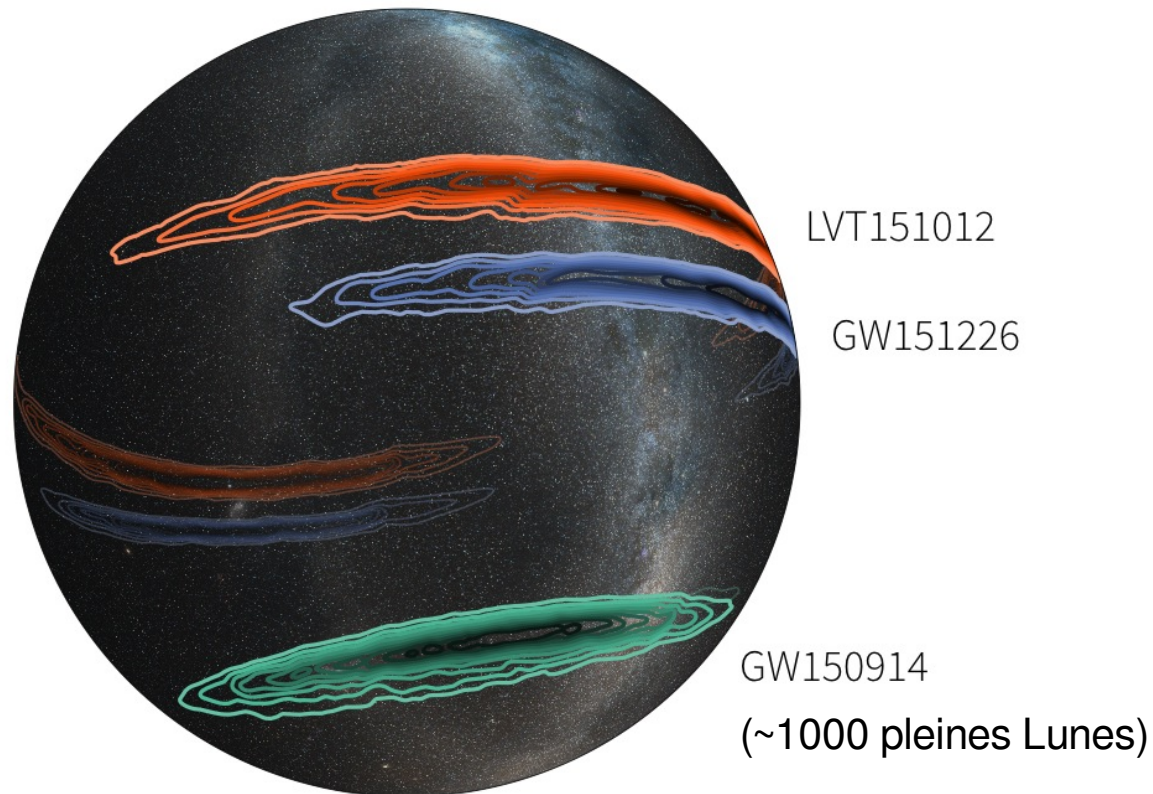
# Directions des événements détectés

Triangulation à partir des temps d'arrivée de l'OG sur les détecteurs

Différence des temps d'arrivée des ondes dans les deux détecteurs LIGO

GW150914 : ~7 ms

GW151226 : ~1 ms





# Quelques défis technologiques du détecteur Virgo





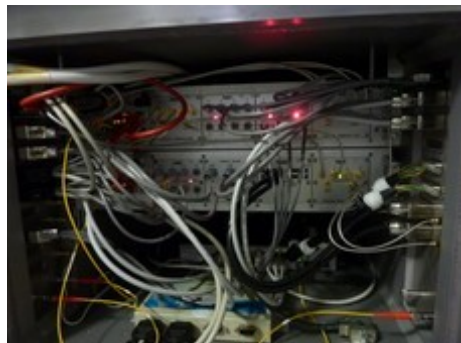
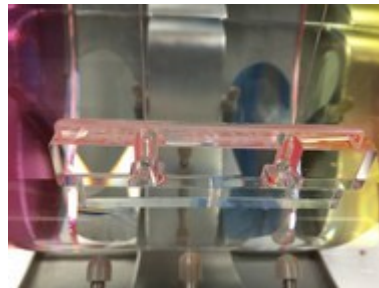
Bancs optiques suspendus sous vide



Suspensions monolithiques



Pièges froids



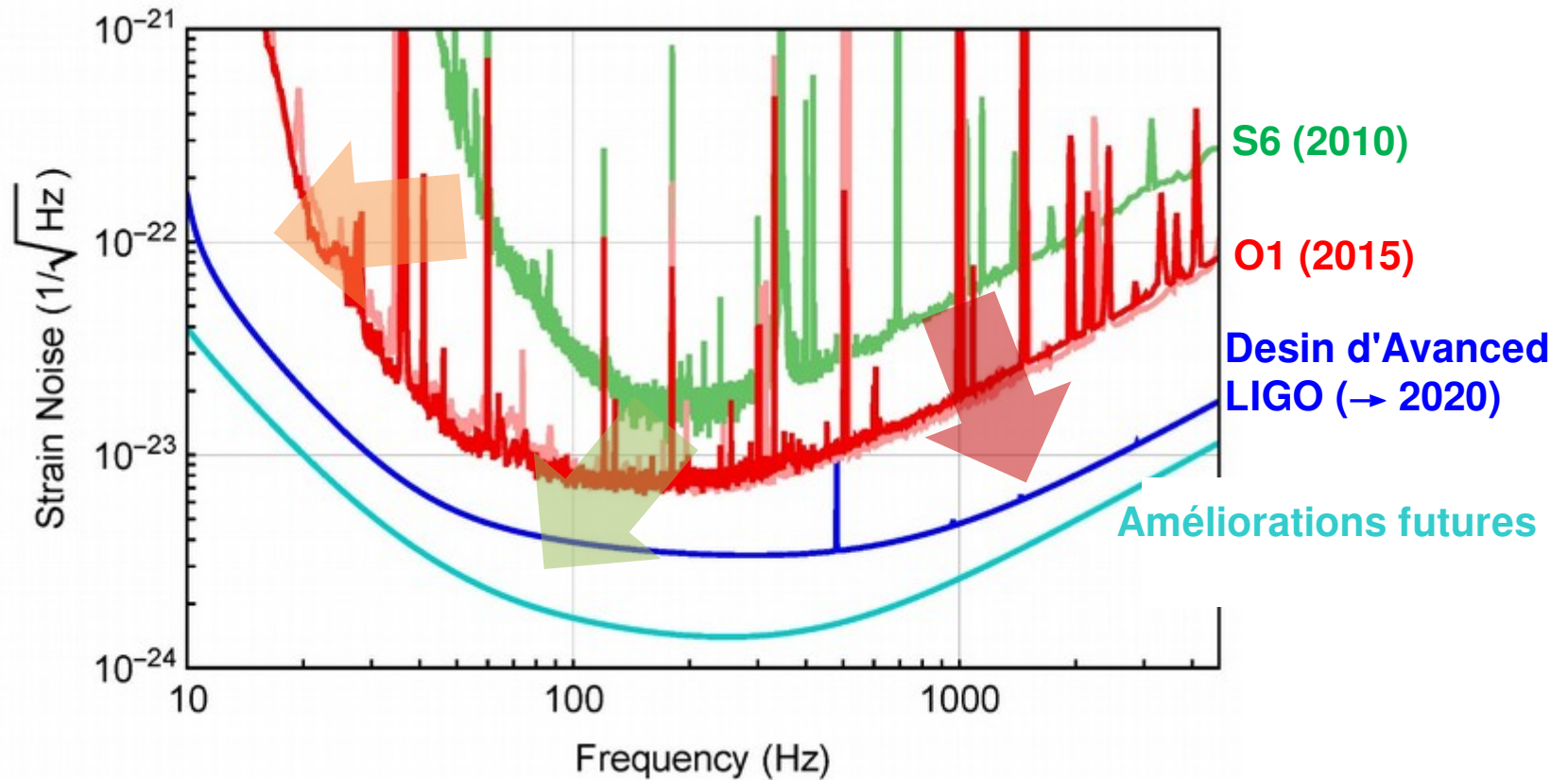
Nouvelle électronique

Cavité optique, sélecteur de mode et fréquence





# De la 1<sup>ère</sup> à la 2<sup>ème</sup> génération de détecteurs



## Bruit sismique

Amélioration de l'isolation sismique

## Lumière diffusée

« Toutes » les optiques et photodiodes sont suspendues sous vide

## Bruit thermique

Revêtement des miroirs amélioré  
Faisceau laser plus gros  
Suspensions monolithiques

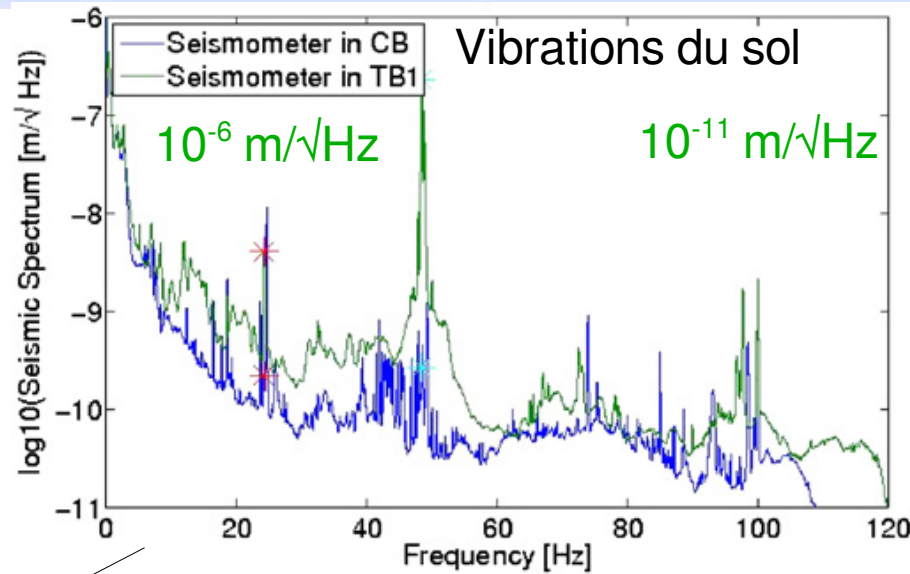
## Bruit de phase

Amélioration du vide

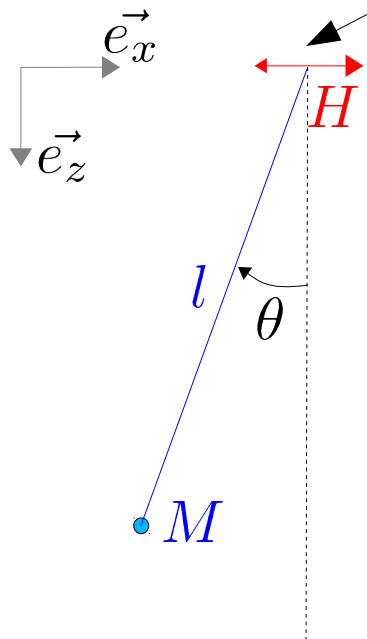
## Bruit de grenaille des photons

Laser plus puissant  
Recyclage du signal  
Détection « DC »  
Compensation thermique

# Bruit sismique : suspension des miroirs



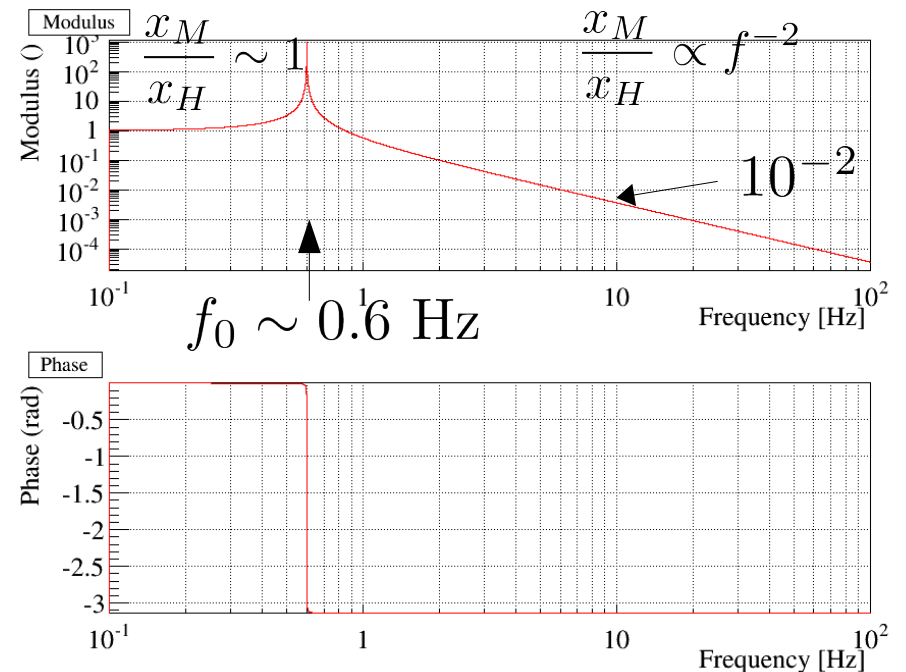
→ on veut  $10^{-19}$  m/√Hz pour détecter les OG !



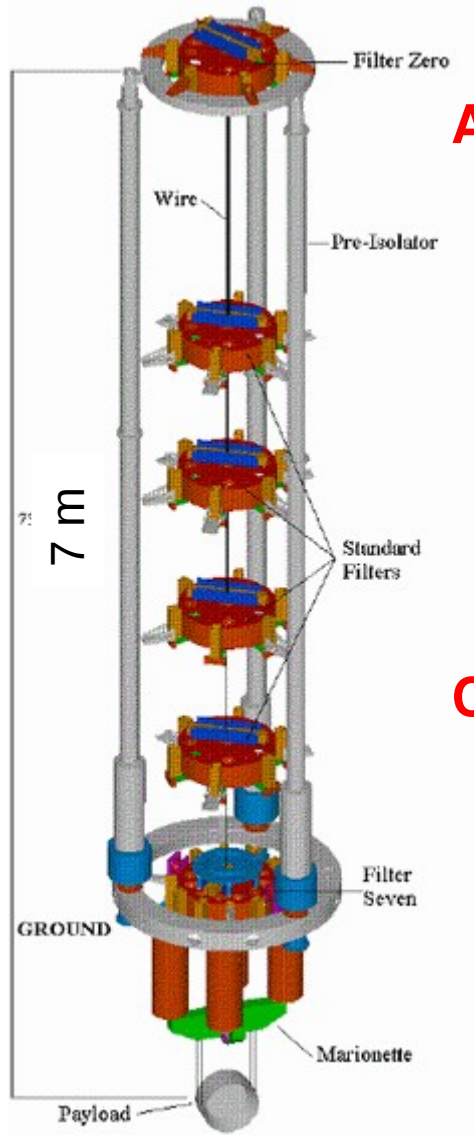
En supposant  $\delta x_H$  petit et sinusoidal et  $\theta$  petit:

$$\underline{x}_M = \underline{\mathcal{H}} \times \underline{x}_H$$

Fonction de transfert



# Suspension d'un miroir de Virgo : atténuation des vibrations du sol

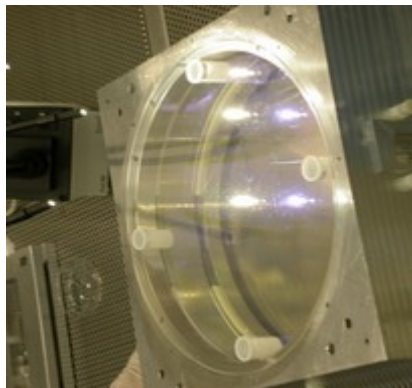


**Atténuation passive** : 7 pendules en cascade

→ facteur  $10^{14}$  à 10 Hz

**Contrôles actifs** à basse fréquence

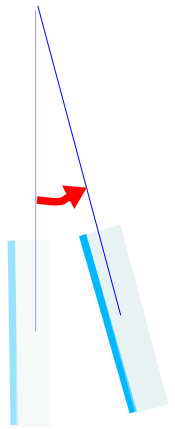
- Accéléromètres ou données de l'interféromètre
- Actionneurs électromagnétiques
- Boucles de contrôle



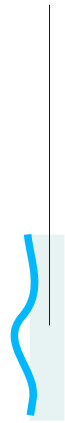
# Bruit thermique

- Lié à l'agitation thermique des atomes

→ dissipation d'énergie via les modes d'excitations macroscopiques du miroir



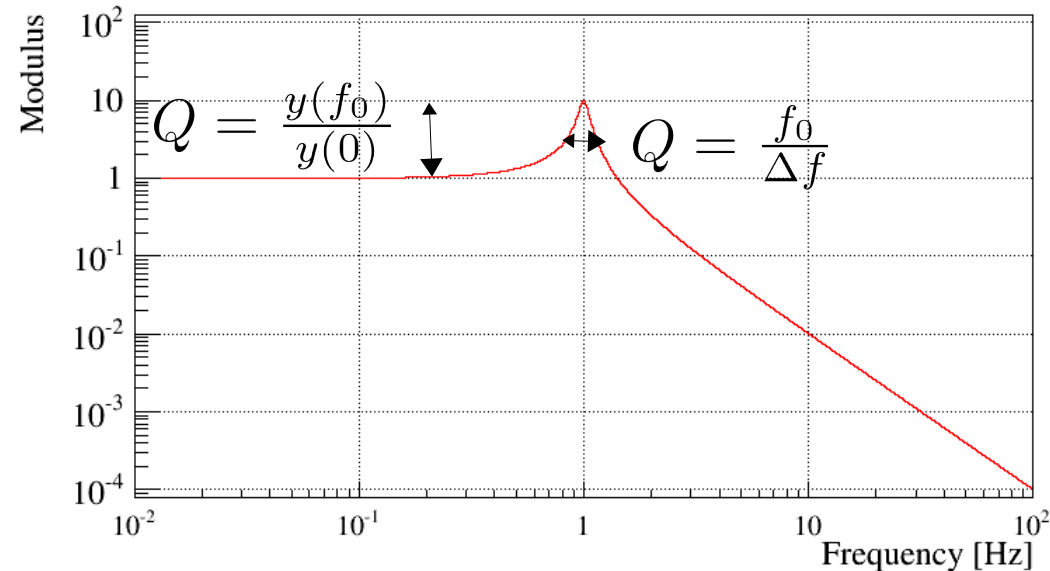
Pendulum mode  
 $f < 40$  Hz



"Mirror" mode  
 $f > \text{few kHz}$



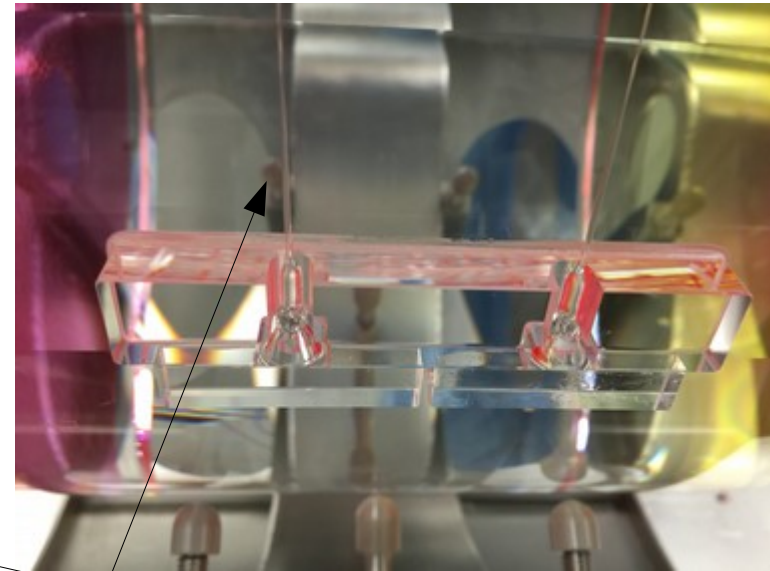
"Violin" modes  
 $f > 40$  Hz



On veut des grands facteurs de qualité  $Q$  pour concentrer tout le bruit dans de petites bandes de fréquences

# Bruit thermique : suspensions monolithiques

- Revêtement de surface de très haute qualité développé au LMA (Laboratoire des Matériaux Avancés, Lyon) couches de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Ti:TaO}_5$
- Suspensions monolithiques développées dans des laboratoires à Perugia et Rome

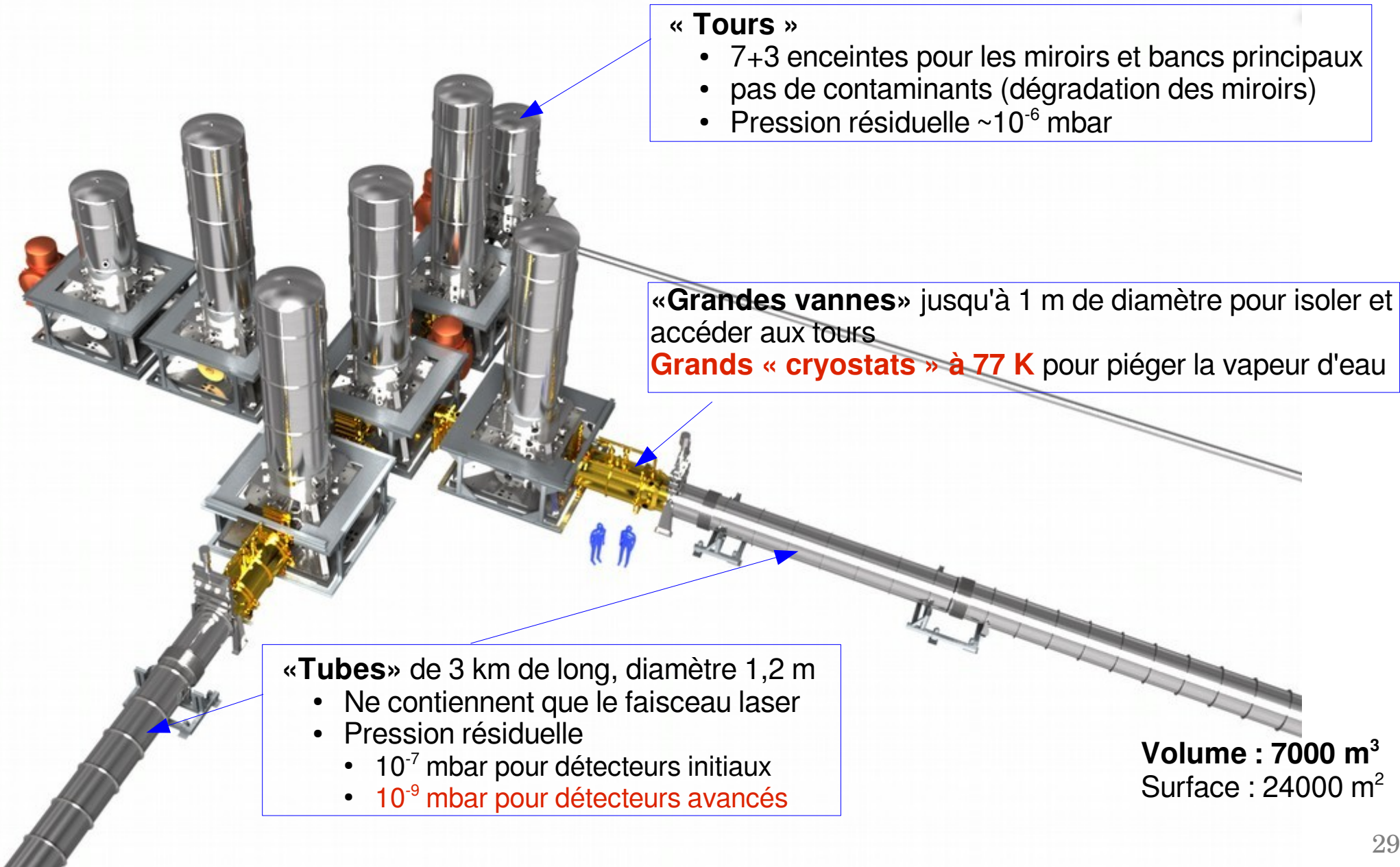


Fibres en verre (fused silica)  
(diamètre  $400\ \mu\text{m}$  et longueur  $0,7\ \text{m}$ )



# Bruit de phase : améliorer le vide

→ lié aux vibrations acoustiques et fluctuations de l'indice de réfraction de l'air



## « Tours »

- 7+3 enceintes pour les miroirs et bancs principaux
- pas de contaminants (dégradation des miroirs)
- Pression résiduelle  $\sim 10^{-6}$  mbar

«Grandes vannes» jusqu'à 1 m de diamètre pour isoler et accéder aux tours

Grands « cryostats » à 77 K pour piéger la vapeur d'eau

## «Tubes» de 3 km de long, diamètre 1,2 m

- Ne contiennent que le faisceau laser
- Pression résiduelle
  - $10^{-7}$  mbar pour détecteurs initiaux
  - $10^{-9}$  mbar pour détecteurs avancés

Volume : 7000 m<sup>3</sup>  
Surface : 24000 m<sup>2</sup>

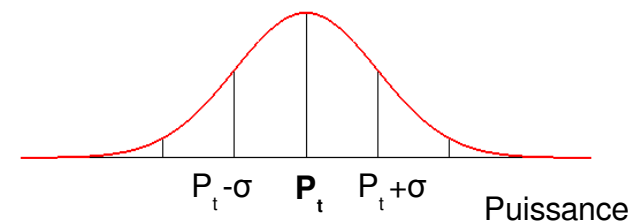
# Enceintes à vide de Virgo





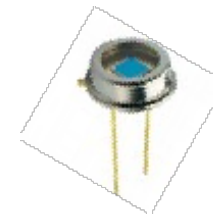
# Le bruit de grenaille des photons

→ fluctuations des temps d'arrivée des photons sur les photodiodes servant à mesurer la puissance du faisceau laser



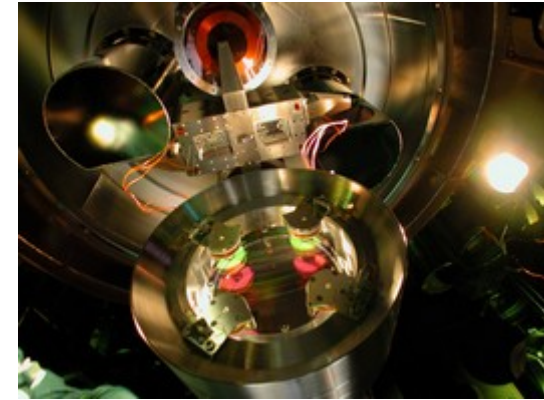
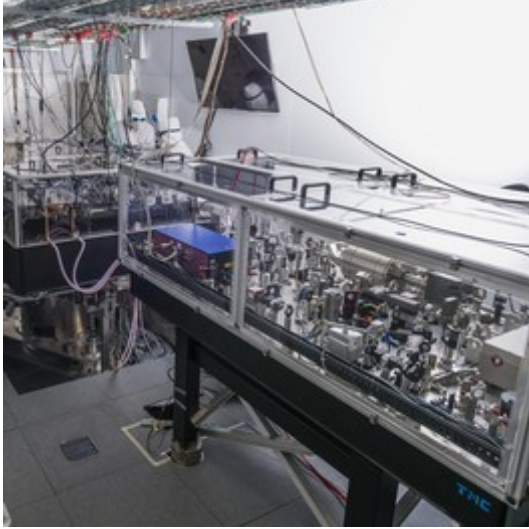
Solutions techniques :

- Augmentation de la puissance du laser
- Choix de photodiodes à haute efficacité quantique
- Limiter les pertes de puissance le long du faisceau



# Quelques autres bruits

Laser : bruits en amplitude, fréquence, position  
Beaucoup de boucles de contrôle pour réduire ces bruits

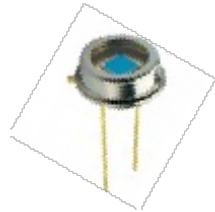


Bruit électromagnétique

Réduction des sources de bruit dans l'environnement  
Réduction des couplages environnement/détecteur

Bruit électronique

Développement d'électronique bas bruit ( $0,1 \text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$ )



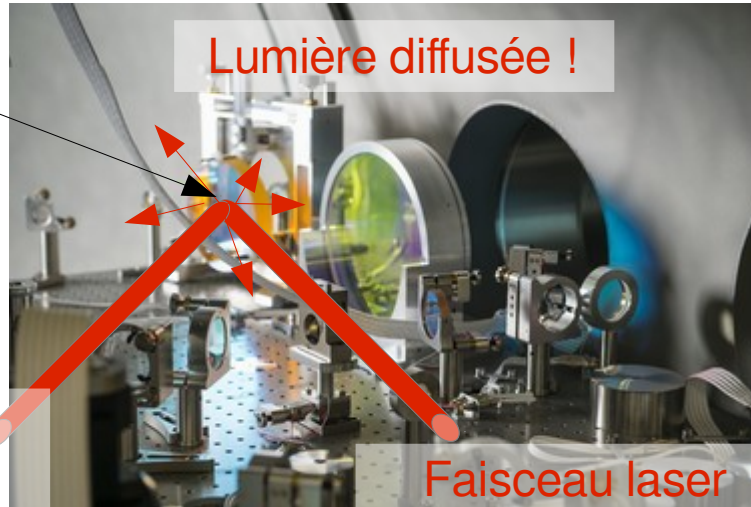
Bruit non-linéaire dû à la lumière diffusée

Bancs optiques suspendus et mis sous vide  
Choix des fréquences de résonance mécanique

# Problème de la lumière diffusée

Élément optique  
(miroir,  
lentille,...) vibrant à  
cause du bruit  
sismique ou  
acoustique

Faisceau laser  
incident



Faisceau laser  
réfléchi

Quelques photons diffusés peuvent  
se recombiner avec le faisceau de  
l'interféromètre

↓  
Bruit de phase

↓  
Fluctuations de la puissance mesurée  
(empreinte des vibrations de l'élément optique)

Evolution pour AdVirgo: bancs  
optiques suspendus et placés  
sous vide





# Des bancs optiques instrumentés



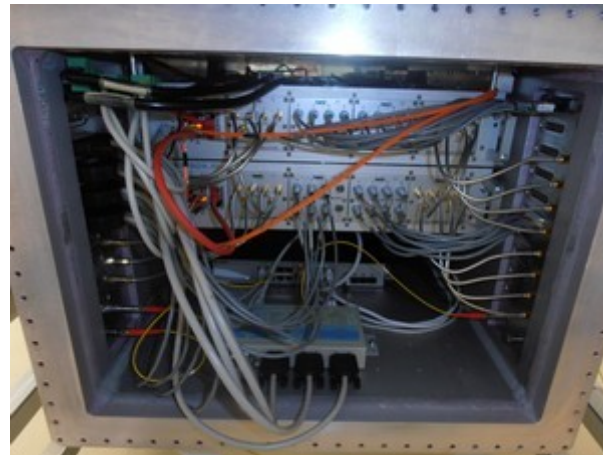
Enceinte à vide  
P ~ 0.1 mbar

Systeme d'attenuation sismique

Banc optique  
Suspendu par un seul cable metallique

Électronique embarquée  
pour limiter nombre de cables (court-circuit sismique)

Consommation max < 300 W  
→ problème de thermique pour évacuer la  
chaleur par radiation seulement

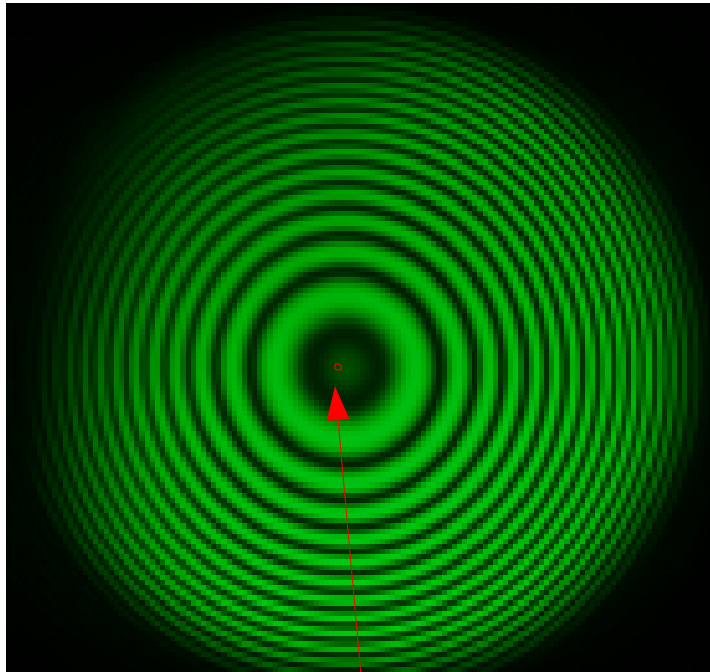




# Éléments à propos du contrôle des interféromètre et de son étalonnage



# Quelle puissance mesure Virgo ?



Taillé équivalente du faisceau de Virgo, mesuré sur une photodiode

**Onde sphérique**

→ Figure d'interférence

**Onde plane**

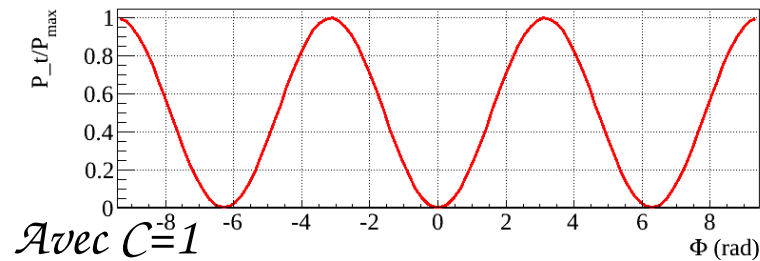
→ « intensité plate »

**Faisceau de Virgo : faisceau gaussien**

Courbure  $\sim 1500$  m

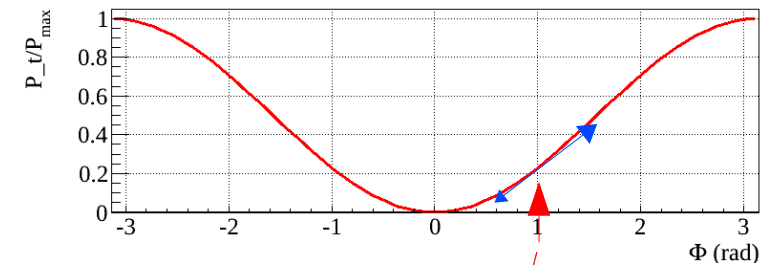
Rayon  $\sim 5$  cm

→ proche d'une onde plane



Miroirs libres

Forçage d'un point de fonctionnement →



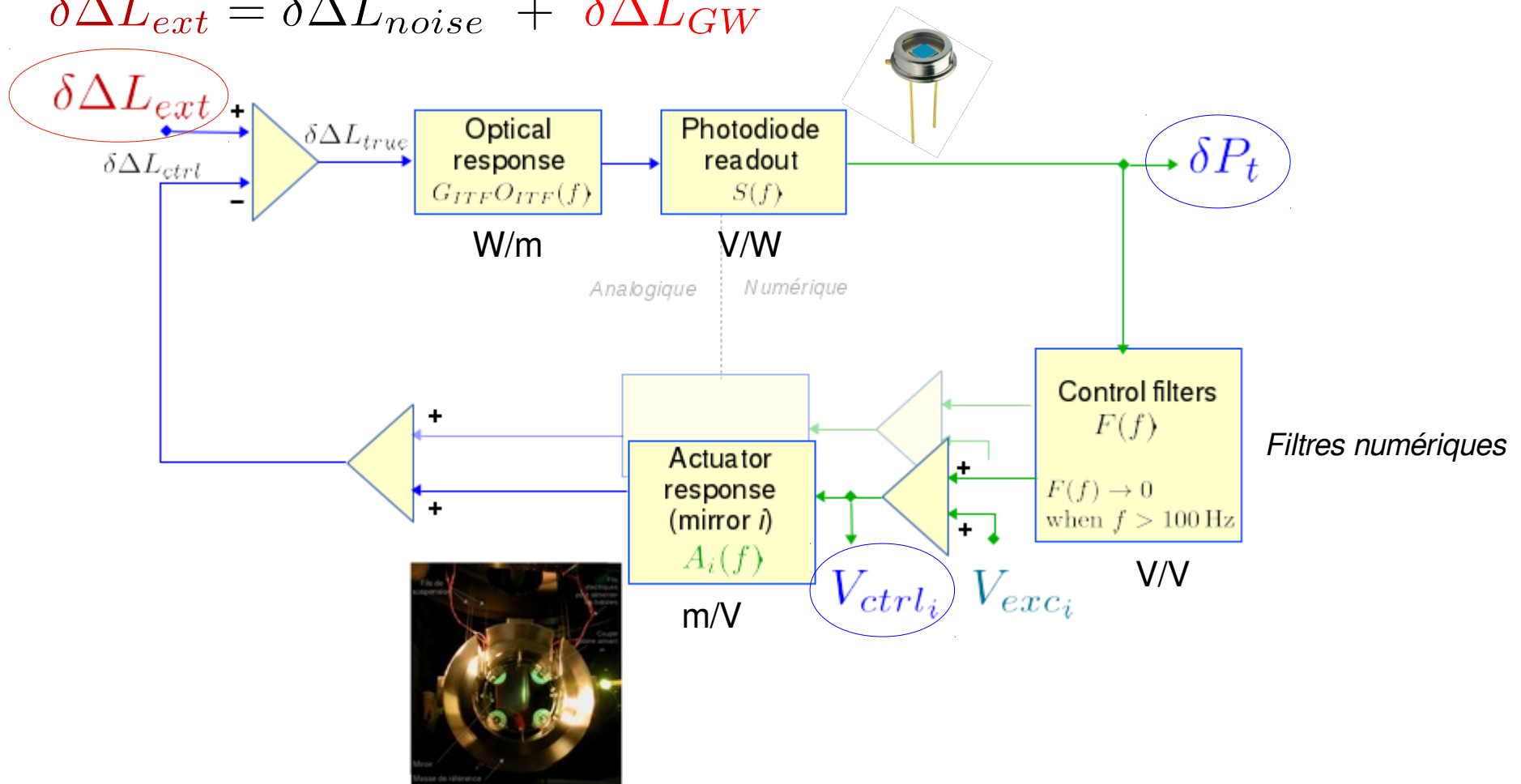
Miroirs contrôlés en position

# Comment contrôle-t-on le point de fonctionnement ?

Petit décalage par rapport à la frange noire :  $\Delta L_0 = n \frac{\lambda}{2} + 10^{-11} \text{ m}$

- Contrôles pour réduire le bruit entre  $\sim 10 \text{ Hz}$  et  $\sim 100 \text{ Hz}$
- Précision du contrôle  $\delta \Delta L_{true} \sim 10^{-16} \text{ m}$

$$\delta \Delta L_{ext} = \delta \Delta L_{noise} + \delta \Delta L_{GW}$$



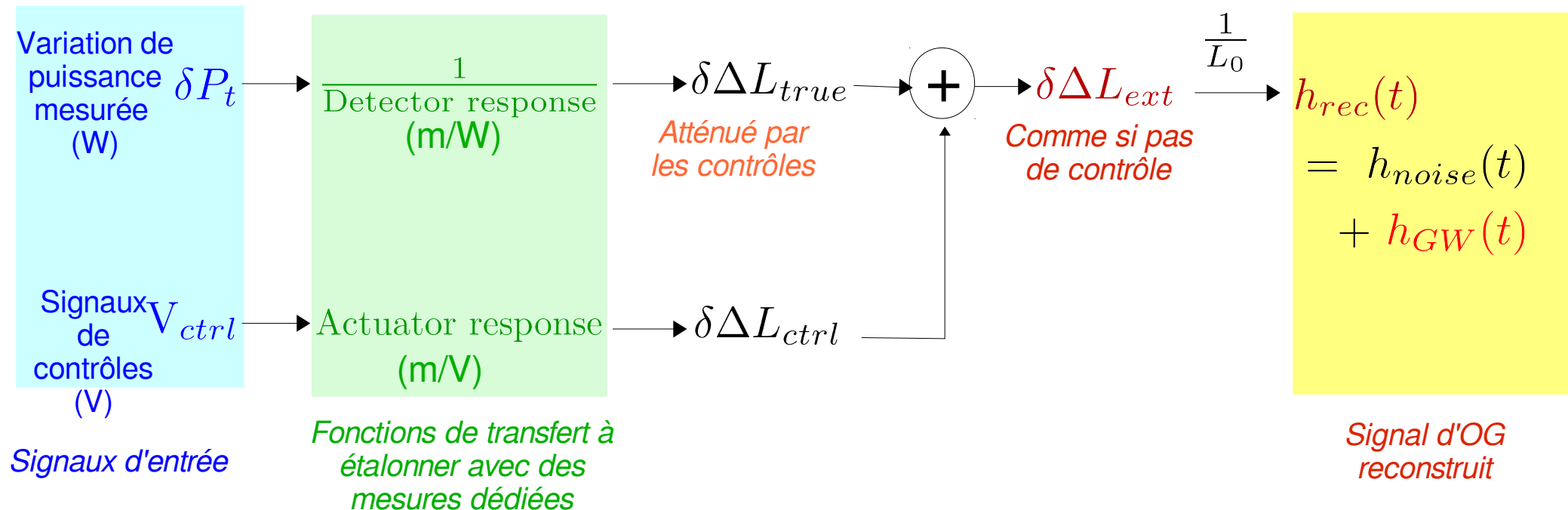
# Des données à l'amplitude de l'OG

- Haute fréquence (>100 Hz) : les miroirs se comportent comme des masses libres

$$\rightarrow h(t) = \frac{\delta\Delta L_{true}(t)}{L_0}$$



- Basse fréquence : le contrôle atténue les bruits.... mais aussi le signal d'OG !  
 → les signaux de contrôle contiennent de l'information sur h(t)





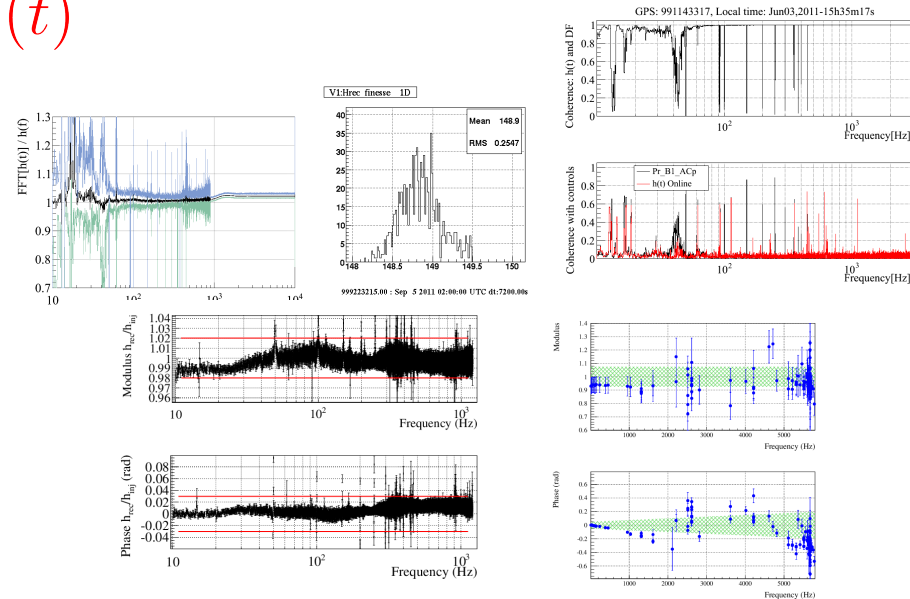
# Incertitudes sur le signal d'OG reconstruit $h(t)$

Signal d'OG reconstruit dans la bande de fréquence [10 Hz – 10 kHz]

$$h_{rec}(t) = h_{noise}(t) + h_{GW}(t)$$

De nombreuses vérifications...

Incertitudes sur le signal reconstruit  $h(t)$

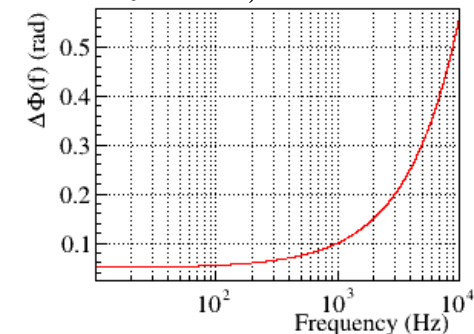


$$\Delta A(f)/A = 7.5\% \quad \text{pour } f < 1 \text{ kHz}$$

$$\Delta A(f)/A = 8.5\% \quad \text{pour } f > 1 \text{ kHz}$$

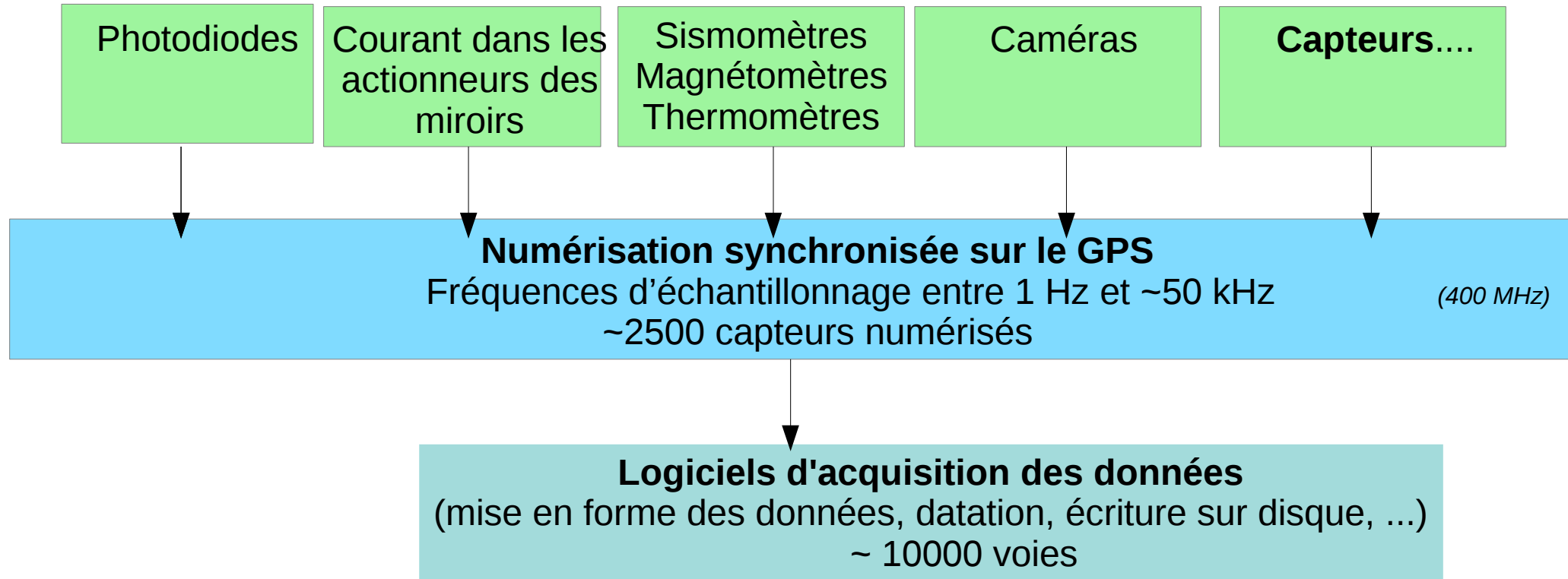
$$\Delta \Phi(f) = (50 \times 10^{-3} + 2\pi f \Delta t_d) \text{ rad}$$

$$\text{avec } \Delta t_d = 8 \mu\text{s}$$



→  $h_{rec}(t)$  est le signal utilisé par les analyses de données

# L'acquisition des données de Virgo



Flux continu de ~2 To/jour (20 à 40 Mo/s)

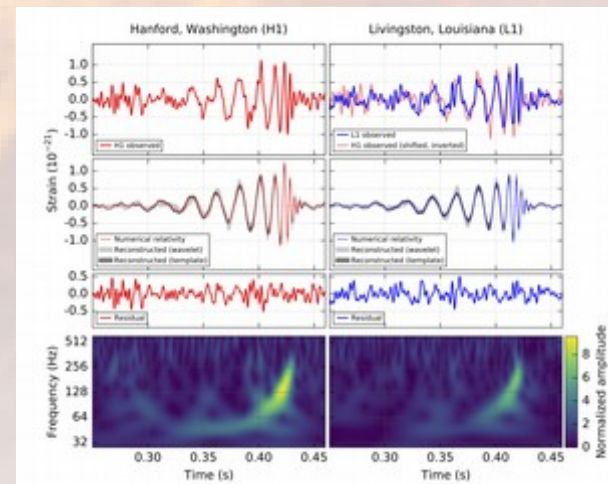
Espace disque sur le site Virgo : ~400 To pour ~6 mois de données

Stockage à long terme : données envoyées à des centres de calculs (Lyon, Bologna)

# Quelle physique avec les ondes gravitationnelles ?

Tests de la Relativité Générale

Astronomie gravitationnelle

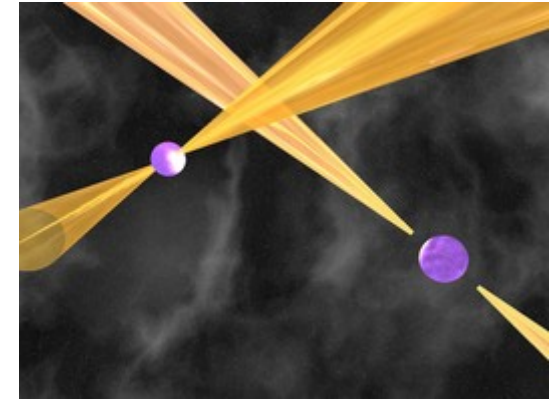


# Des tests de la Relativité Générale (RG)

**PSR J0737-3039**

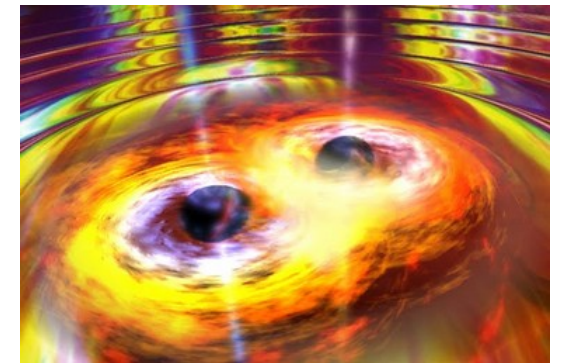
Pulsar binaire le plus relativiste connu aujourd'hui :  
vitesse orbitale  $v/c \sim 2 \times 10^{-3}$

Deux étoiles à neutrons  
Période 2 heures  
Distance  $\sim 10^6$  km



**GW150914 et GW151226**

Grande vitesse, très dynamique, gravité en champ fort :  
 $v/c \sim 0.5$

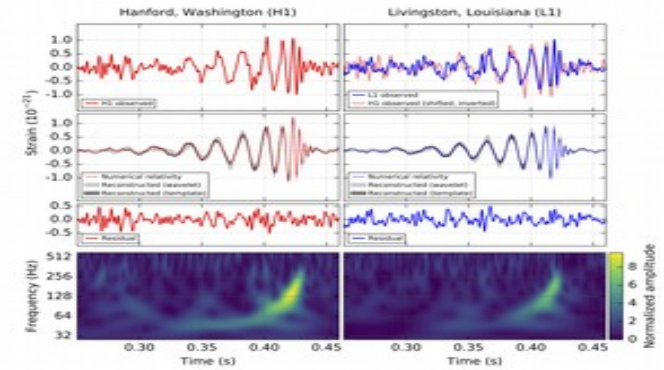


Deux trous noirs  
"Période"  $\sim 0.01$  s  
"Distance"  $\sim 100$  km

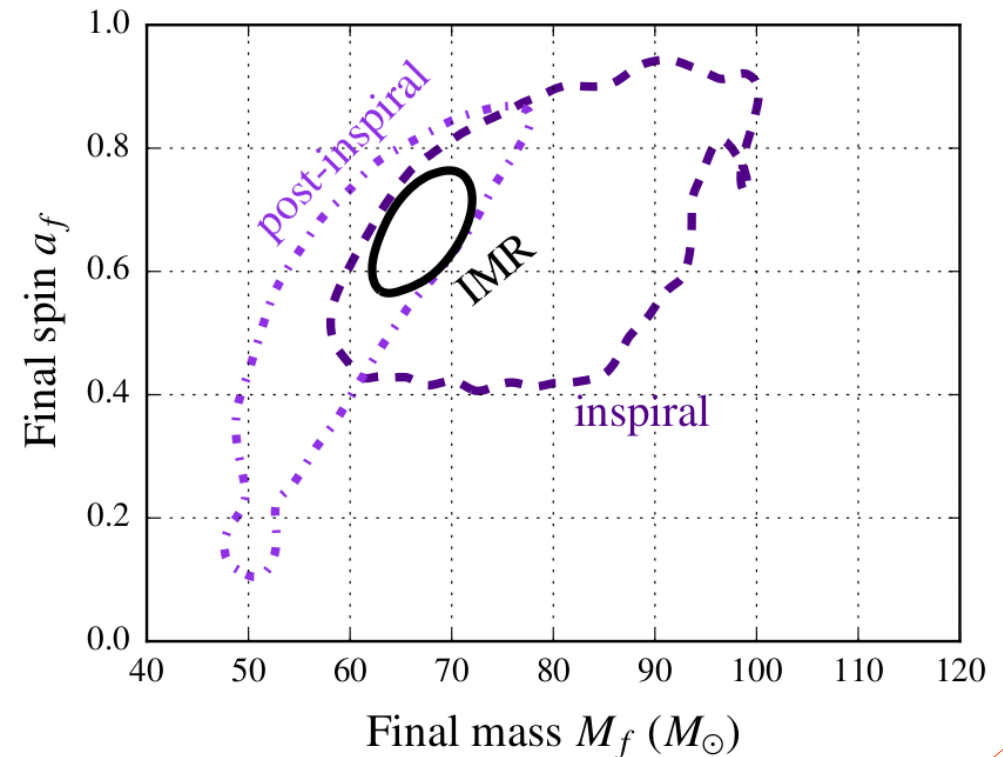
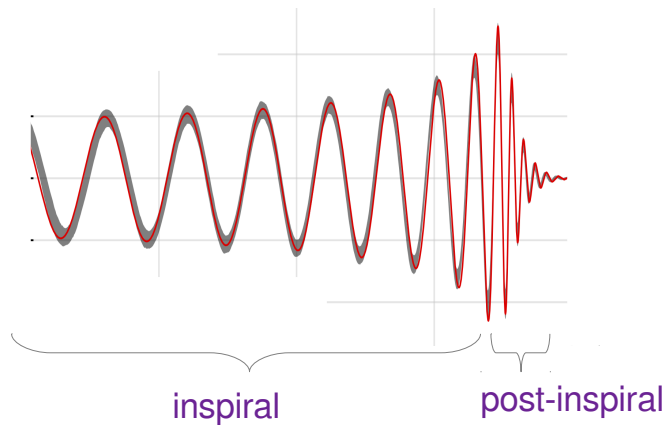


# Test de RG : cohérence de la forme d'onde

Vérification des résidus après soustraction de la forme d'onde la mieux ajustée sur les données :  
→ écarts à la RG dans GW150914 < 4%

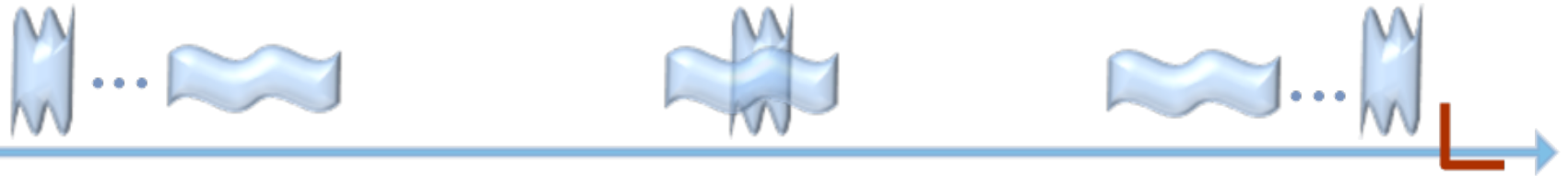
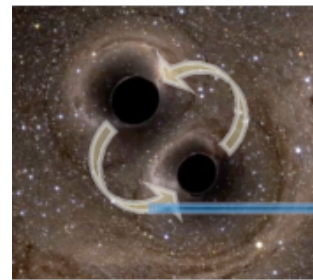


Vérification de la cohérence interne de la forme d'onde



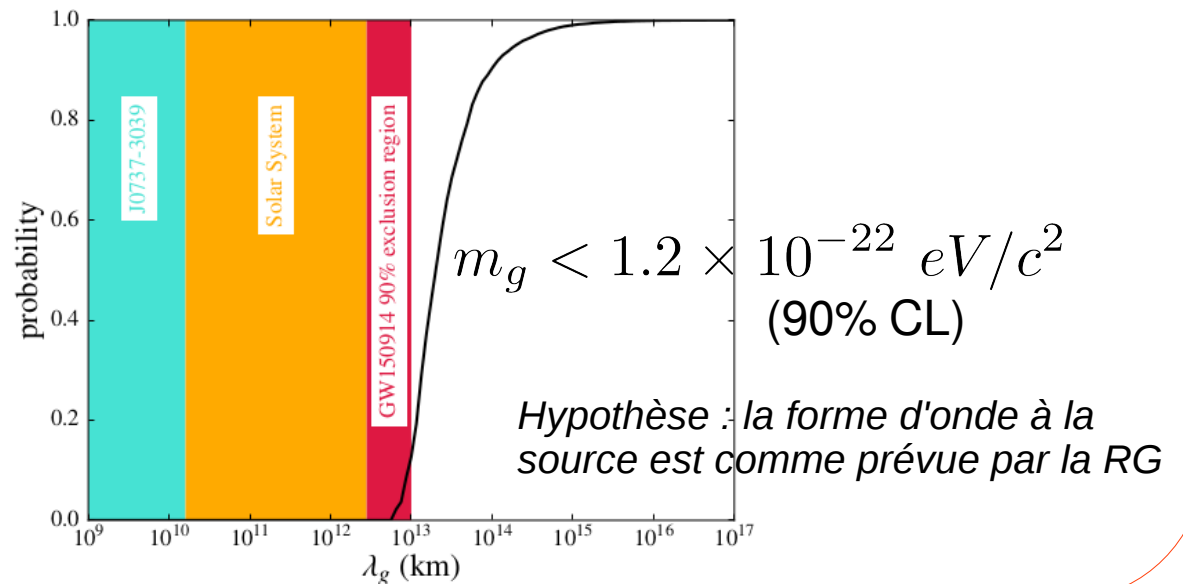
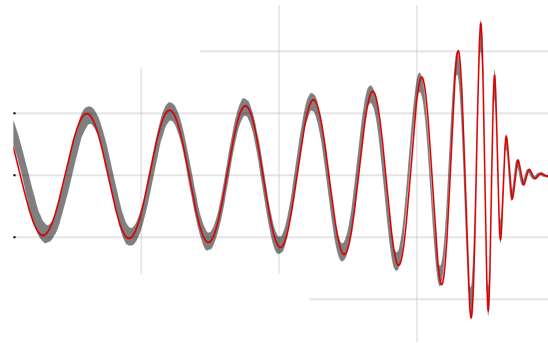
# Test de RG : estimation de limite sur la masse du graviton

Masse du graviton  $\neq 0 \rightarrow$  espace-temps dispersif pour les OGs



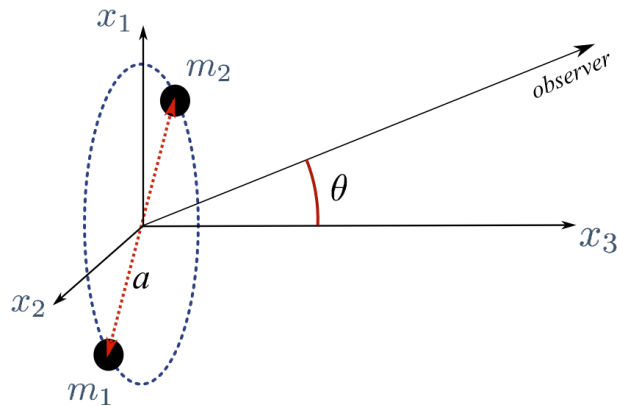
Interferometer

Forme de l'onde mesurée  $\rightarrow$  limite sur la masse du graviton



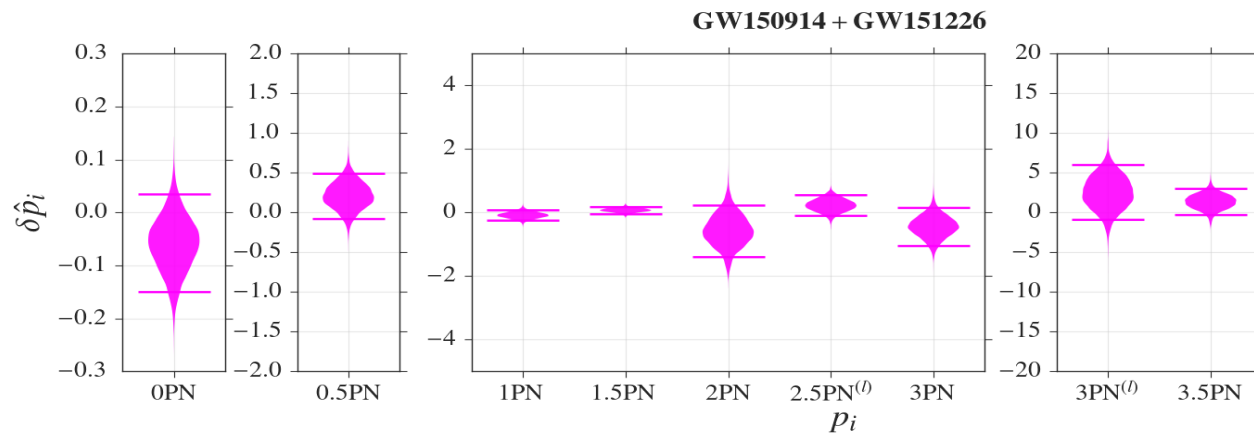
# Test de RG : des écarts ?

Système binaire → physique newtonienne + correction post-newtoniennes



$k$	$N$	2	3	4	5
$\mathcal{F}_k$	$\frac{32\eta^2 v^{10}}{5}$	$-\frac{1247}{336} - \frac{35\eta}{12}$	$4\pi$	$-\frac{44711}{9072} + \frac{9271\eta}{504} + \frac{65\eta^2}{18}$	$-\left(\frac{8191}{672} + \frac{535\eta}{24}\right)\pi$
$t_k^v$	$-\frac{5m}{256\eta v^8}$	$\frac{743}{252} + \frac{11\eta}{3}$	$-\frac{32\pi}{5}$	$\frac{3058673}{508032} + \frac{5429\eta}{504} + \frac{617\eta^2}{72}$	$-\left(\frac{7729}{252} + \eta\right)\pi$
$\phi_k^v$	$-\frac{1}{16\eta v^5}$	$\frac{3715}{1008} + \frac{55\eta}{12}$	$-10\pi$	$\frac{15293365}{1016064} + \frac{27145\eta}{1008} + \frac{3085\eta^2}{144}$	$\left(\frac{38645}{672} + \frac{15\eta}{8}\right)\pi \ln\left(\frac{v}{v_{\text{iso}}}\right)$
$\phi_k^t$	$-\frac{2}{\eta\theta^5}$	$\frac{3715}{8064} + \frac{55\eta}{96}$	$-\frac{3\pi}{4}$	$\frac{9275495}{14450688} + \frac{284875\eta}{258048} + \frac{1855\eta^2}{2048}$	$\left(\frac{38645}{21504} + \frac{15\eta}{256}\right)\pi \ln\left(\frac{\theta}{\theta_{\text{iso}}}\right)$
$F_k^t$	$\frac{\theta^3}{8\pi m}$	$\frac{743}{2688} + \frac{11\eta}{32}$	$-\frac{3\pi}{10}$	$\frac{1855099}{14450688} + \frac{56975\eta}{258048} + \frac{371\eta^2}{2048}$	$-\left(\frac{7729}{21504} + \frac{3}{256}\eta\right)\pi$
$\tau_k$	$\frac{3}{128\eta}$	$\frac{5}{9}\left(\frac{743}{84} + 11\eta\right)$	$-16\pi$	$2\phi_4^v$	$\frac{1}{3}(8\phi_5^v - 5t_5^v)$

Ajustement de la forme d'onde en laissant libre les paramètres de corrections post-newtoniens

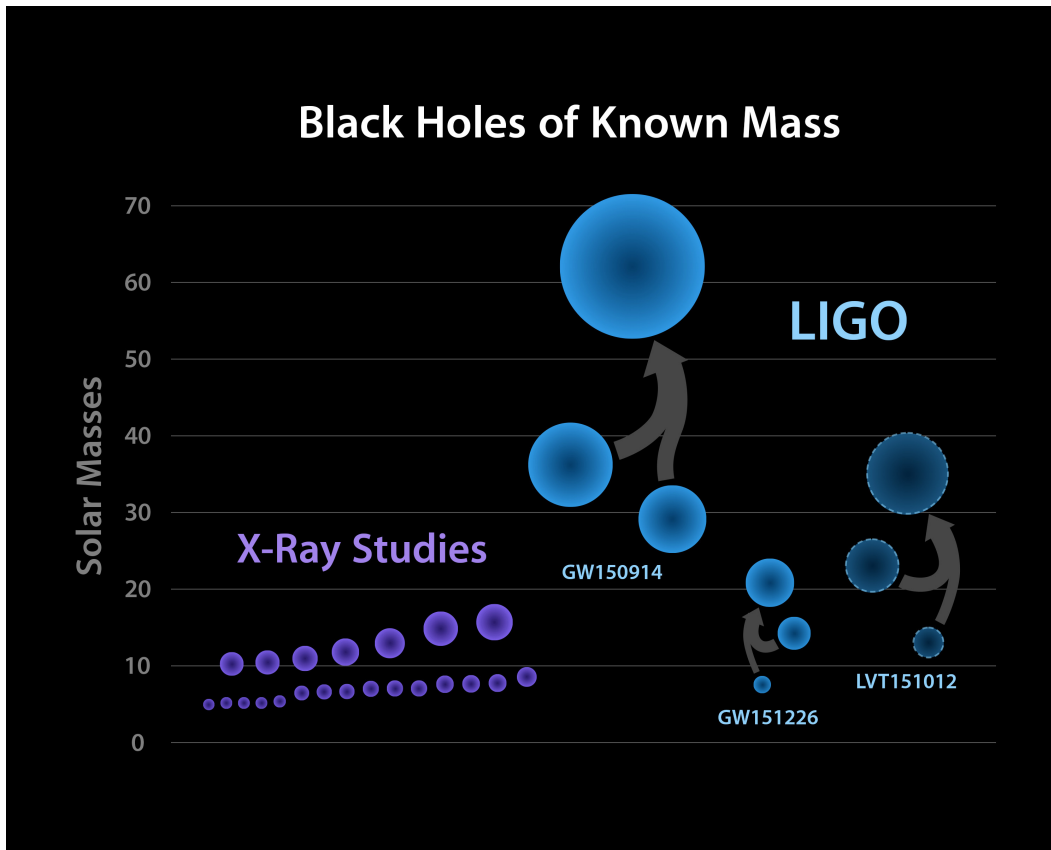


→ pas de signe de déviation à la RG dans la forme d'onde



# Implications astrophysiques : des trous noirs de masses intermédiaires

Des **trous noirs de masse stellaire relativement lourds existent** ( $>25 M_{\odot}$ )

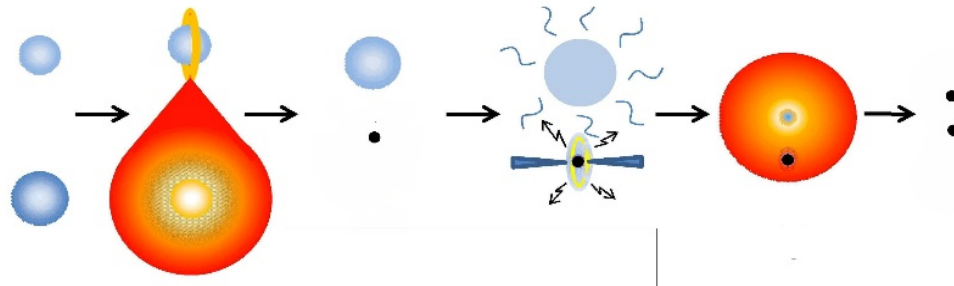


Comment se forment de tels trous noirs ?  
Des étoiles massives à faible vent stellaire  
Environnement à faible métallicité

# Implications astrophysiques : formation de trous noirs binaires ?

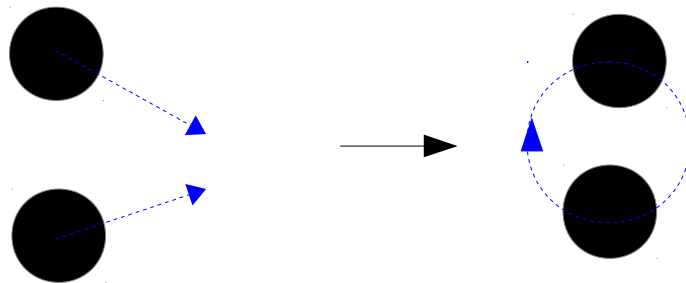
**Découverte des OG → des trous noirs binaires se forment dans la nature**  
Pas assez de contraintes sur le spin pour choisir entre les deux scénarios de formation

A partir d'étoiles binaires ?



Spins probablement alignés

Capture dynamique dans des amas d'étoiles denses ?



Spins probablement non alignés

# Implications astrophysiques : taux des coalescences de trous noirs binaires

## Des trous noirs binaires fusionnent à un taux détectable

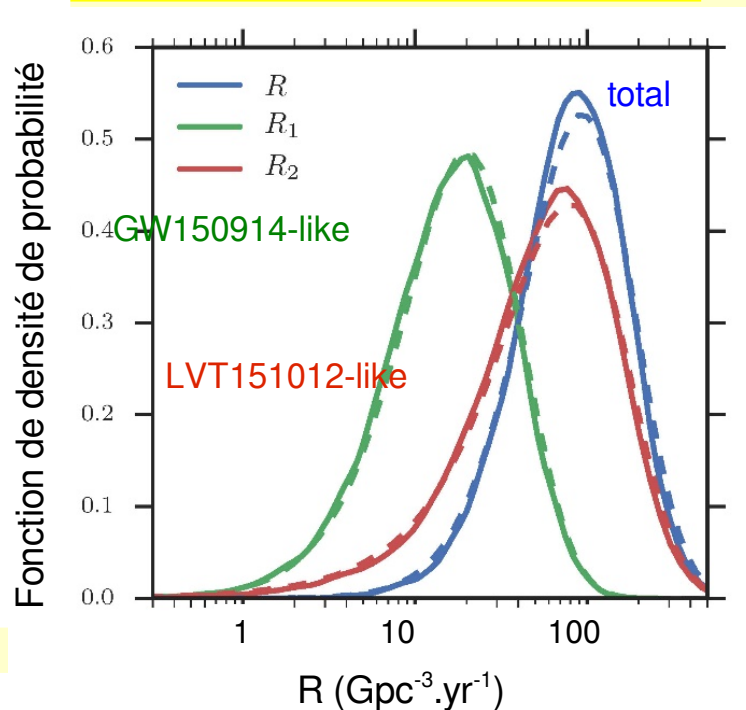
Observations électromagnétiques  
+ modèle de population :  
 $R \sim 0.1 \text{ à } 300 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$

Limite supérieure de LIGO-Virgo en 2011 :  
 $R < 140 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$  pour les paramètres de GW150914

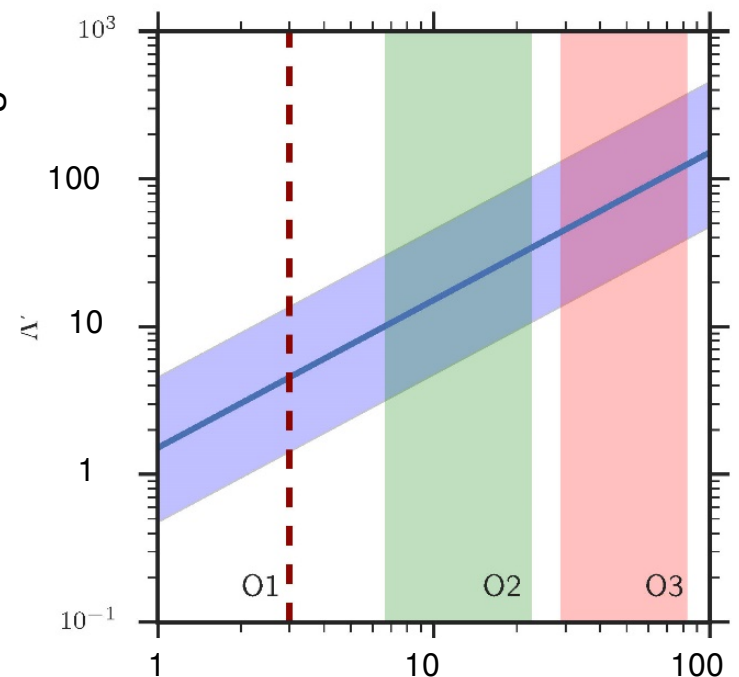
Comptage de signaux  
dans les expériences  
→ statistique très faible

Estimation de la sensibilité à une  
population de sources  
→ dépend de la distribution de  
masse très mal connue

→  $R \sim 2 \text{ à } 400 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$



Nombre attendu d'événements significatifs



Augmentation du volume d'espace.temps  
relativement aux premiers 16 jours du run 01



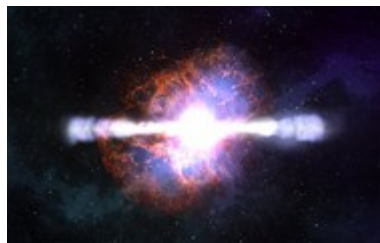
# Autres sources recherchées

**4 mois de données de O1**  
**Run d'observation O2 sur le départ...**  
**De nombreuses autres recherches en cours...**

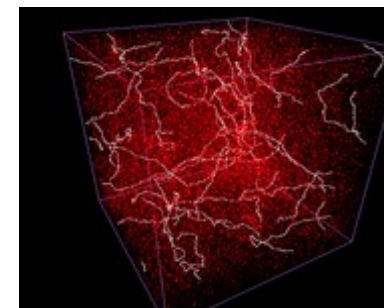
Étoiles à neutrons binaires  
Binaires étoiles à neutrons/trous noirs  
Trous noirs de masses intermédiaires



OG liés à des  
sursauts gamma...



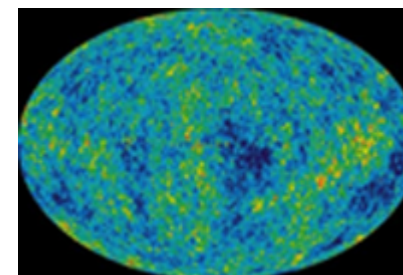
« Sursauts » génériques  
Cordes cosmiques



Étoiles à neutrons en rotation  
non axi-symétrique



Fond stochastique d'OG



# Spectre des OG, autres détecteurs

Cordes cosmiques

Binaires de trous noirs et étoiles à neutrons

Coalescences de binaires

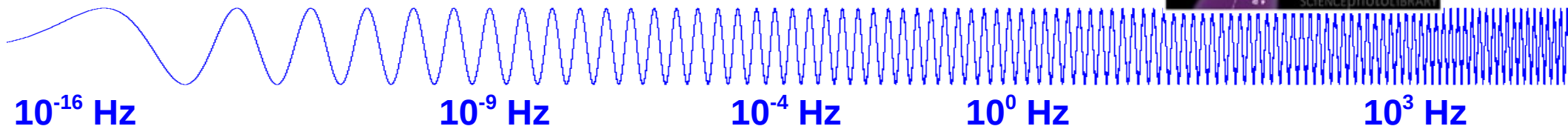
Supernovae

Radiation relique

Binaires de trous noirs supermassifs

Binaires de rapport de masse extrême

Étoiles à neutrons en rotation



Sondes de l'inflation

Pulsar timing

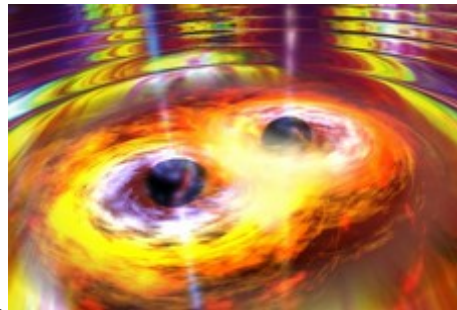
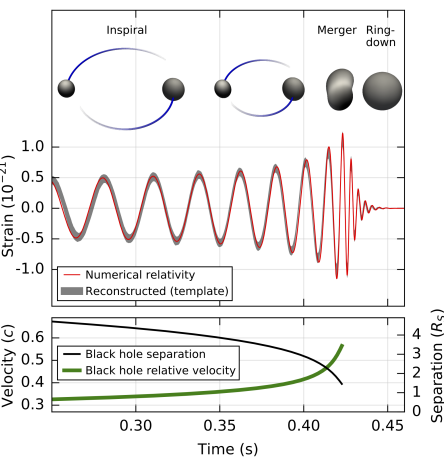
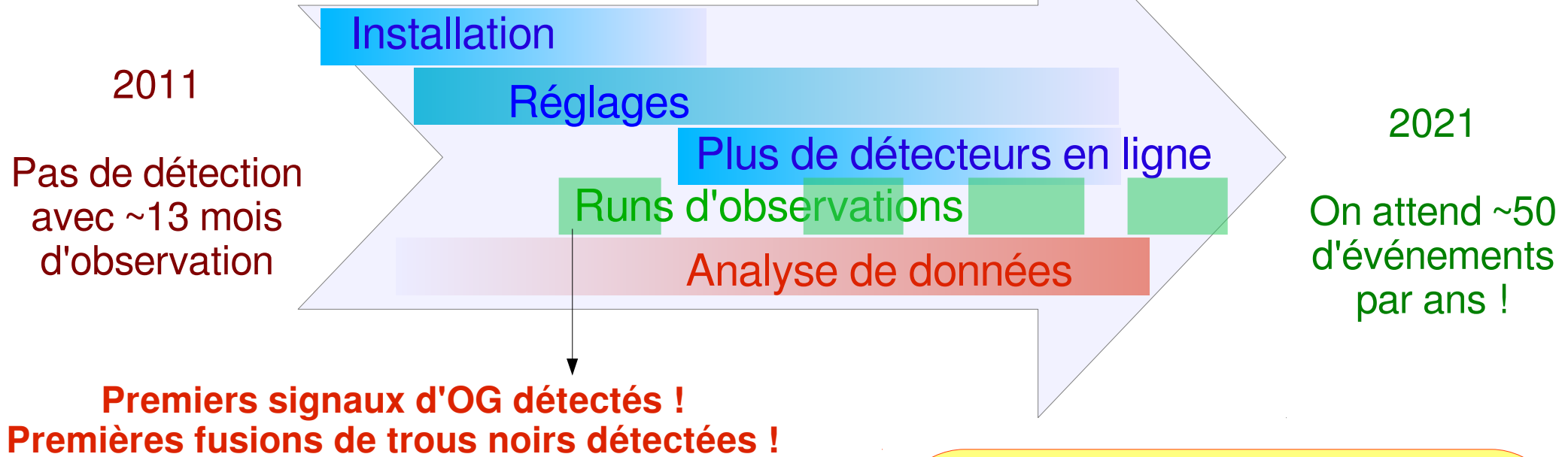
Détecteurs spatiaux

Interféromètres au sol

L. Rolla

Teacher Program – 18 octobre 2016

# Perspectives



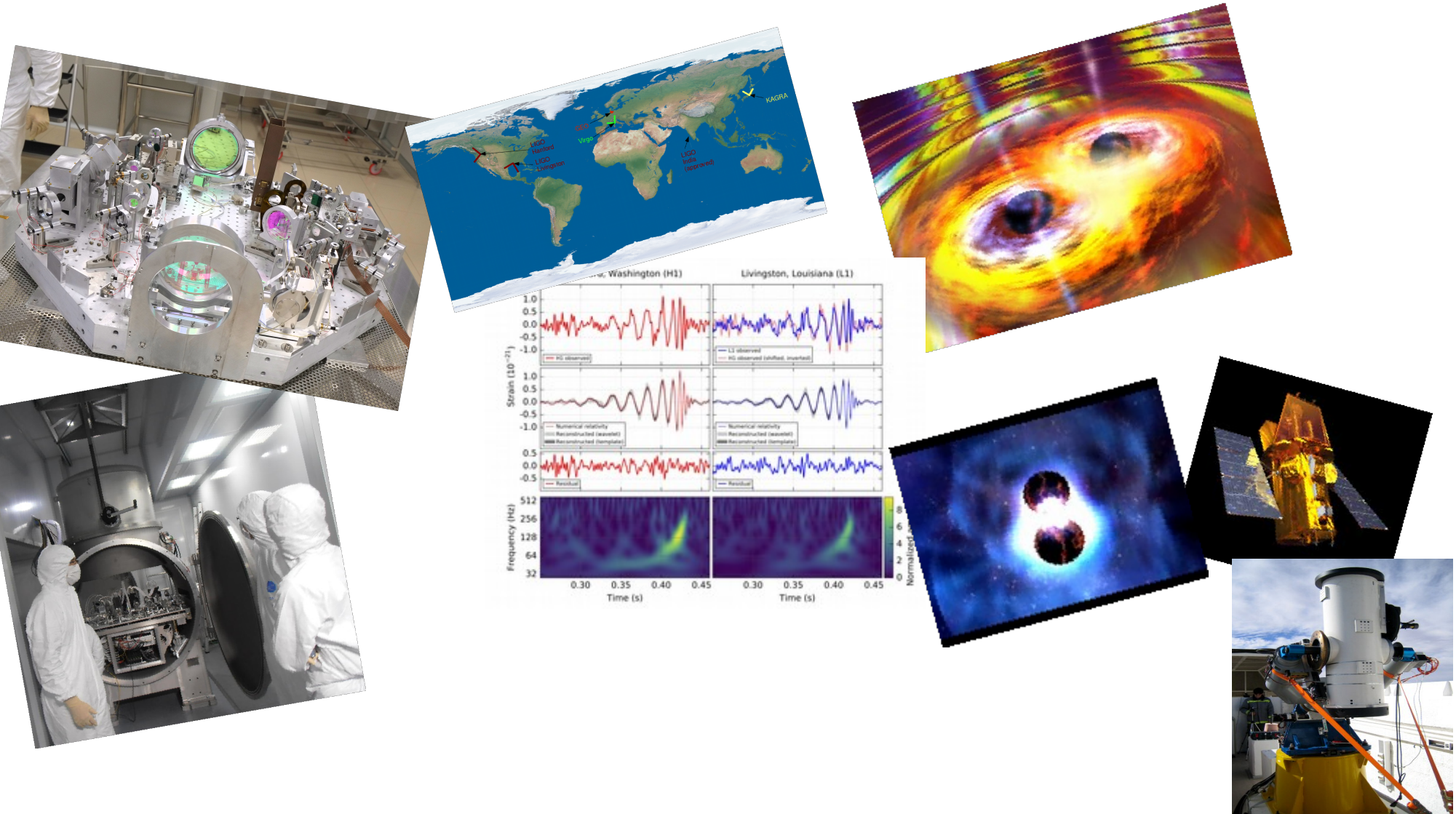
## Début d'une nouvelle ère

- Nouveaux tests de la Relativité Générale
- Astronomie gravitationnelle et cosmologie

**On se démène pour qu'**Advanced Virgo** rejoigne le réseau en mars !**



# Nous avons encore de quoi nous amuser... !



# GW150914

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	$1 \times 10^{-21}$
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	$\pm 0.002$ fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 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	$3.6 \times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
false alarm prob.	less than 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M <sub>⊙</sub>
false alarm rate	1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M <sub>⊙</sub>	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	65	remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^5$ km <sup>2</sup>
chirpmass	28	consistent with general relativity?	passes all tests performed
primary BH	32 to 41	graviton mass bound	$< 1.2 \times 10^{-22}$ eV
secondary BH	25 to 33	coalescence rate	2 to 400 Gpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup>
remnant BH	62	online trigger latency	~ 3 min
mass ratio	0.6 to 1	# offline analysis pipelines	5
primary BH spin	< 0.7	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
secondary BH spin	< 0.9	papers on Feb 11, 2016	13
remnant BH spin	0.7	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1		
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameters with a range (e.g. distance) are 90% credible bounds; fractional error on parameters without a range is less than 10%. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= $9.46 \times 10^{12}$  km; Mpc=mega parsec=3.2 million

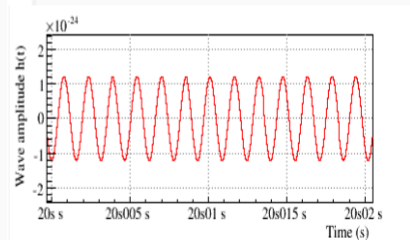
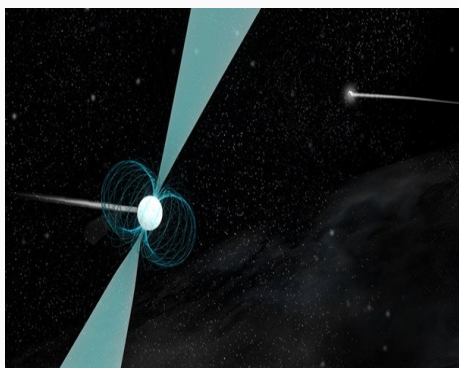
# GW151225

observed by	LIGO L1, H1	duration from 35 Hz	~1 s
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 35 Hz	~55
date	26 Dec 2015	signal arrival time delay	arrived in H1 1 ms after L1
time	03:38:53 UTC		
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	$\sim 3.4 \times 10^{-22}$
redshift	0.05 to 0.13	peak displacement of interferometers arms	$\sim \pm 0.7$ am
signal-to-noise ratio	13		
false alarm prob.	~ 1 in 10 million	frequency/wavelength at peak GW strain	420 Hz, 710 km
		peak speed of BHs	~ 0.6 c
total mass	20 to 28 $M_{\odot}$	peak GW luminosity	2 to 4 $\times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
primary BH	11 to 23 $M_{\odot}$	radiated GW energy	0.8-1.1 $M_{\odot}$
secondary BH	5 to 10 $M_{\odot}$	remnant ringdown freq.	~ 750 Hz
remnant BH	19 to 27 $M_{\odot}$	remnant damping time	0.00 ~ 1.3 ms
mass ratio	> 0.28	remnant size, area	60 km, $3.5 \times 10^4$ km <sup>2</sup>
spin of one of the black holes	> 0.2	online trigger latency	~ 67 s
remnant BH spin	0.7 to 0.8	# offline analysis pipelines	2
resolved to	~850 sq. deg.		

Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer= $10^{-18}$  m,  $M_{\odot}$ =1 solar mass= $2 \times 10^{30}$  kg



# Wave amplitude from expected GW sources



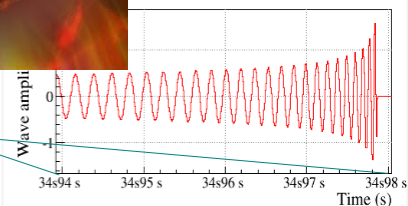
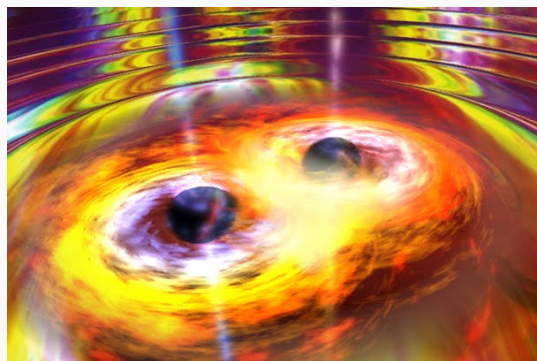
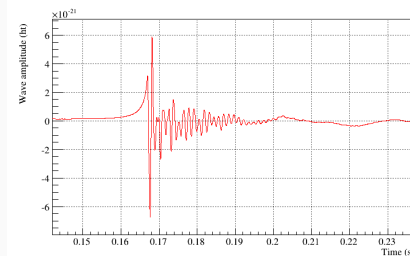
## Rotating neutron stars

- 10 km radius
  - rotation period 1 ms to 1 s
  - $10^9$  in the Milky Way (1000 known pulsars)
- continuous wave with  $h < 10^{-26}$  at  $d \sim 1$  kpc  
(Virgo:  $\Delta L < 10^{-23}$  m)

## Supernova (“burst”)

- star core-collapse
  - expected rate:  $\sim 3$ /century in the Milky Way
- wave of few ms, with  $h \sim 10^{-23}$  to  $10^{-20}$  at  $d \sim 10$  kpc

(Virgo:  $\Delta L \sim 10^{-20}$  to  $10^{-17}$  m)



## Compact Binary Coalescence (CBC)

- system of two compact objects (neutron stars or black holes)
  - end of life: coalescence and merger into a black hole
  - expected rate: 10 to 200/year in a radius of 300 Mpc
- wave of few seconds, with  $h \sim 10^{-23}$  at  $d \sim 100$  Mpc

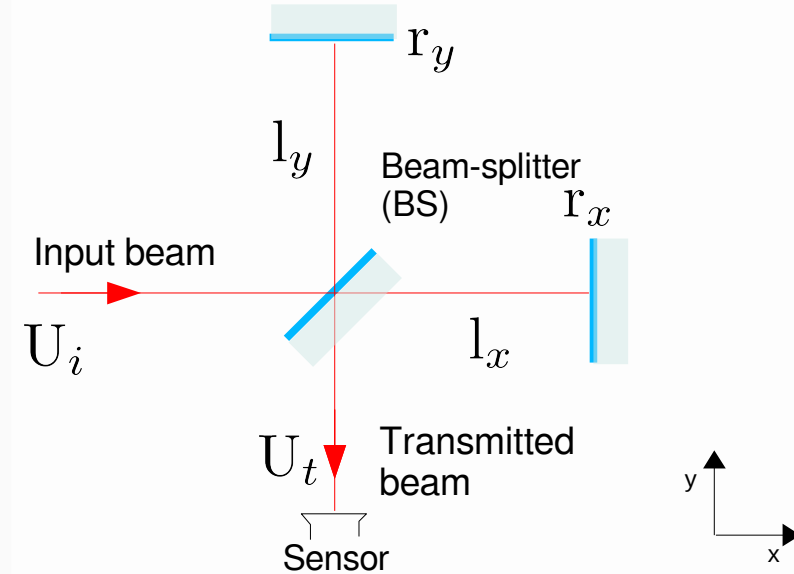
(Virgo:  $\Delta L \sim 10^{-20}$  m)

(1 pc  $\sim$  3.26 light-years)

# Simple Michelson interferometer: transmitted power

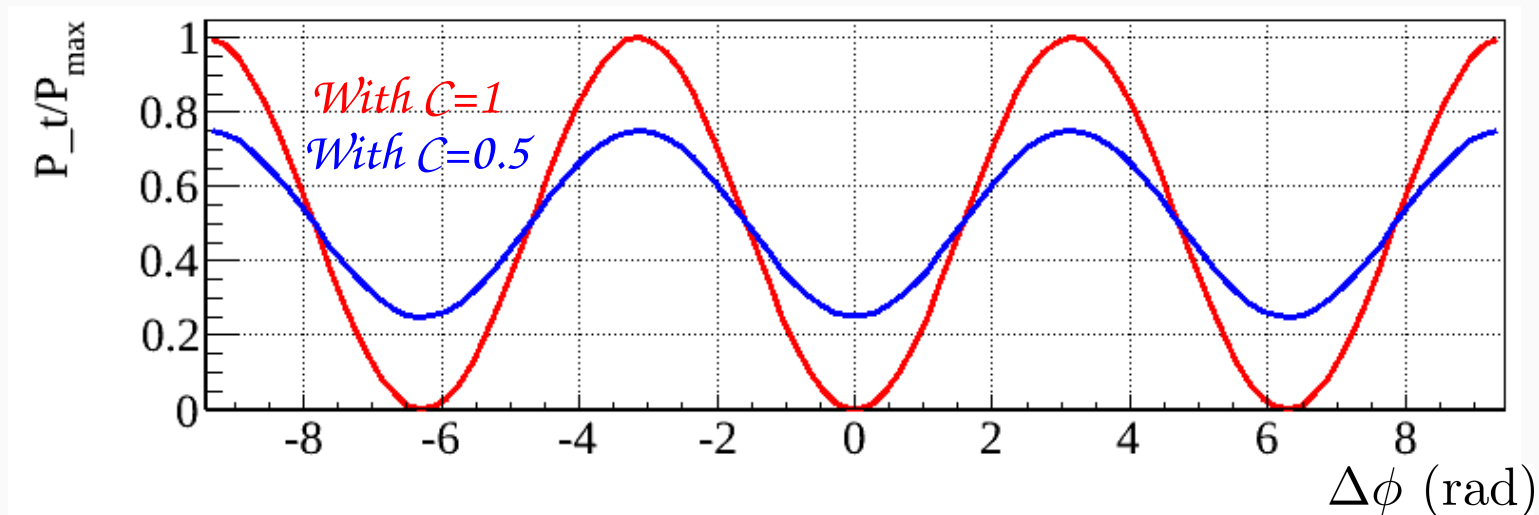
Field transmitted by the interferometer

$$U_t = \frac{A_i}{2} (r_y e^{2jkl_y} - r_x e^{2jkl_x})$$



Transmitted power

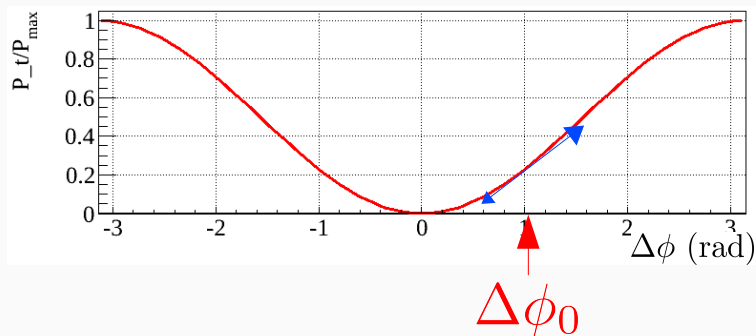
$$P_t \propto |U_t|^2 = \frac{P_{max}}{2} (1 - C \cos(\Delta\phi)) \quad \text{where } \Delta\phi = 2k(l_y - l_x)$$



# From the power to the gravitational wave strain $h$

Interferometer set around a **working point**

$$\Delta\phi_0 = 2k(l_y - l_x) = 2k\Delta L_0$$



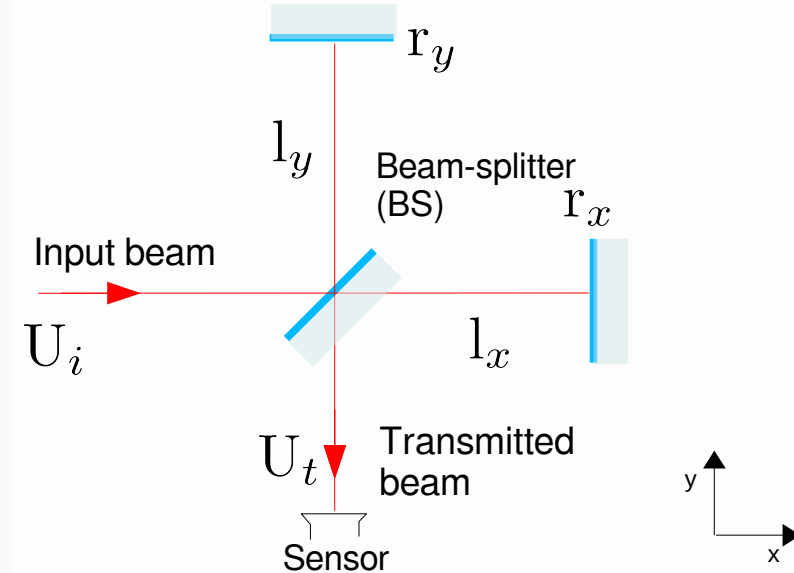
$$\delta P_t = P_i C \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_0\right) \times \delta\Delta L$$

$$\delta P_t = (\text{Interferometer response}) \times \delta\Delta L$$

(W/m)

Measured  
physical quantity

Physical effect  
to be detected



Around the working point:

$$\delta P_t \propto \delta\Delta L = hL_0$$

$$\delta P_t \propto h$$

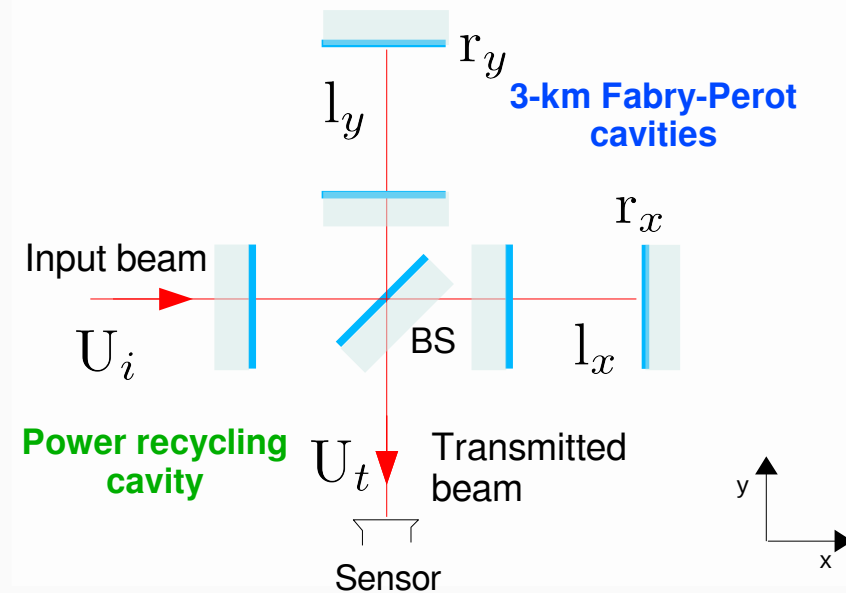
# Improved interferometer response

More mirrors to form cavities:

- 3-km Fabry-Perot **cavities** in the arms
- power recycling **cavity**

$$\delta P_t = \underbrace{G_{PR} P_i C \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_0\right) \frac{2\mathcal{F}}{\pi}}_{\sim 12000} \times \delta \Delta L$$

$$\delta P_t = \underbrace{(\text{Interferometer response})}_{\text{(W/m)}} \times \delta \Delta L$$



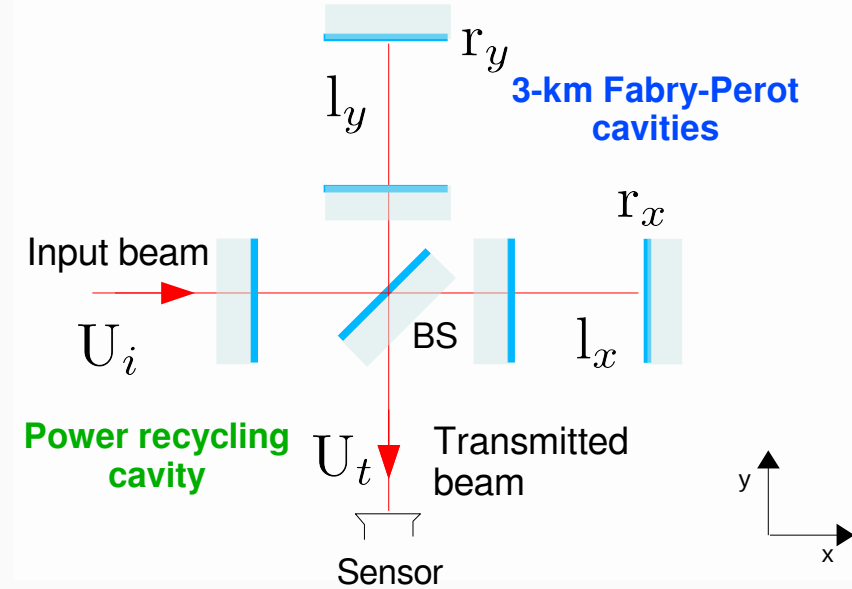
For the same  $\delta \Delta L$ ,  
 $\delta P_t$  has been increased  
 by a factor 12000



# Order of magnitude of the “sensitivity”

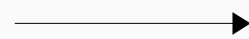
$$\delta P_t = G_{PR} P_i C \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_0\right) \frac{2\mathcal{F}}{\pi} \delta \Delta L$$

Laser wavelength	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Input power	$P_i \sim 100 \text{ W}$
Interferometer contrast	$C \sim 1$
Cavity finesse	$\mathcal{F} \sim 450$
Power recycling gain	$G_{PR} \sim 38$
Working point	$\Delta L_0 \sim 10^{-11} \text{ m}$



Shot noise due to output power of  $\sim 50 \text{ mW}$

$$\rightarrow \delta P_{t,min} \sim 0.1 \text{ nW}$$



$$\delta \Delta L_{min} \sim 5 \times 10^{-20} \text{ m}$$

$$\rightarrow h_{min} = \frac{\delta \Delta L_{min}}{L} \sim 10^{-23}$$



*In reality, the detector response depends on frequency...*

# From $h_{rec}(t)$ to Virgo sensitivity curve

1/ Reconstruction of  $h(t)$

$$h_{rec}(t) = h_{noise}(t) + h_{GW}(t)$$



2/ Amplitude spectral density of  $h(t)$   
(noise standard deviation over 1 s)

$\sim 10^{-19}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (Virgo, 2011)

$\sim 10^{-20}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (Advanced Virgo,  $\sim 2021$ )

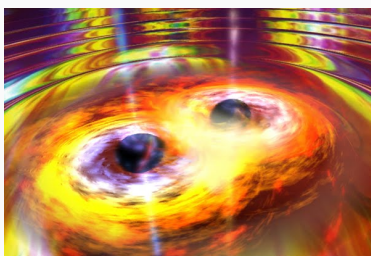
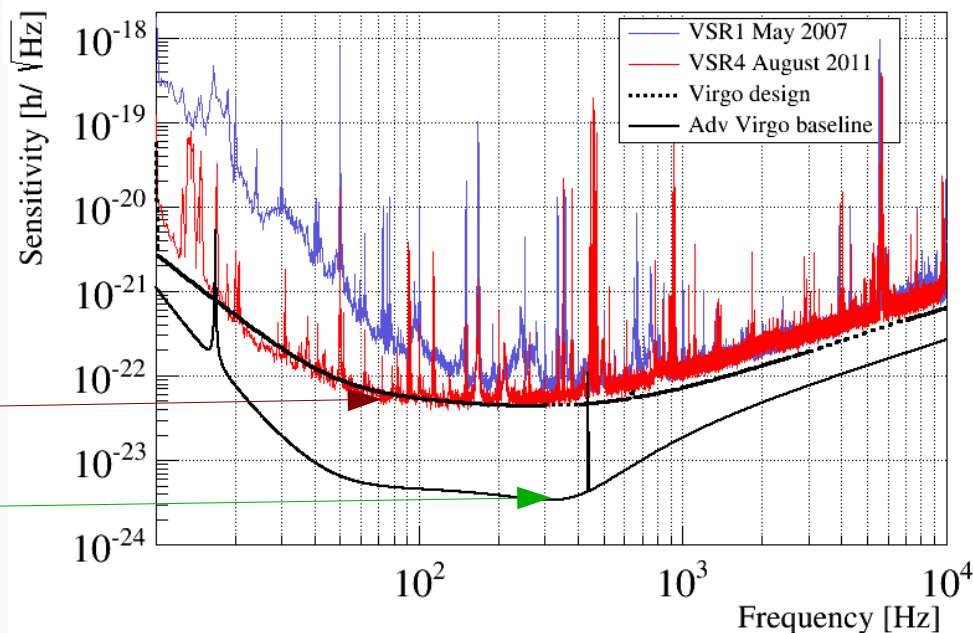


Image: Danna Berry/SkyWorks/NASA

## Compact Binary Coalescences

Signal lasts for a few seconds

→ can detect  $h \sim 10^{-23}$

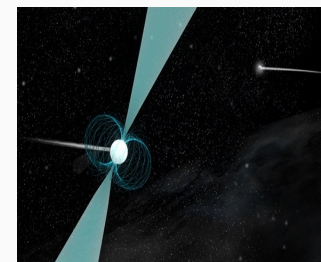


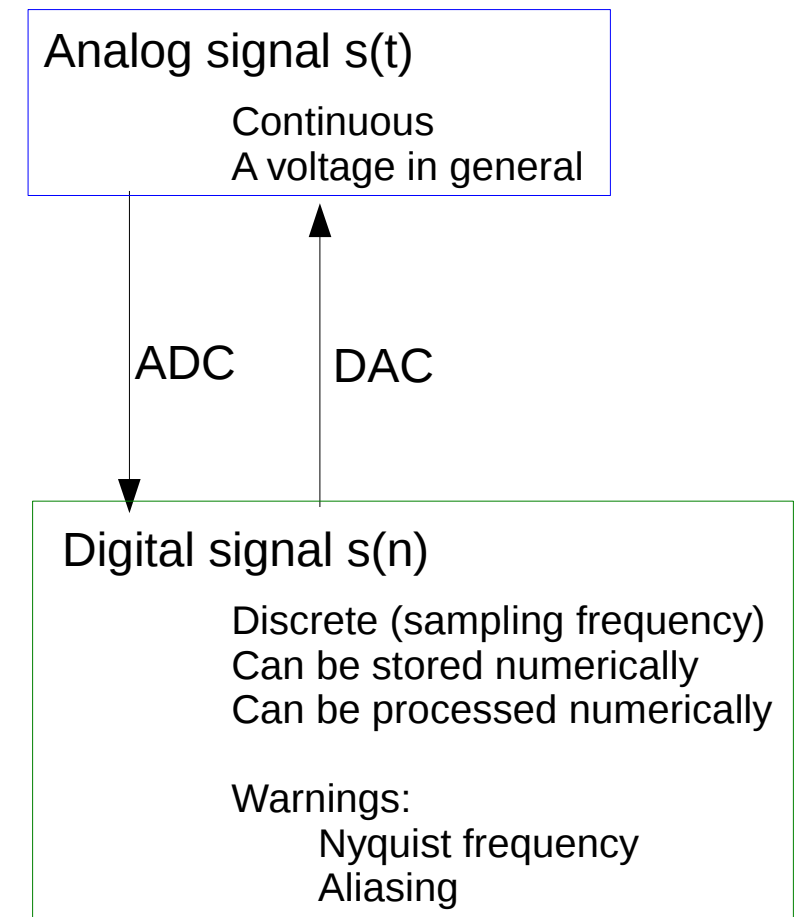
Image: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

## Rotating neutron stars

Signal averaged over days ( $\sim 10^6$  s)

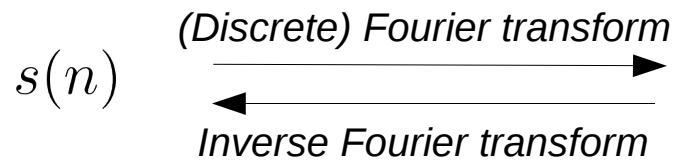
→ can detect  $h \sim 10^{-26}$

# Notes about data processing: digitisation



# Notes about data processing: spectral analysis

A signal can be decomposed in different frequency components.

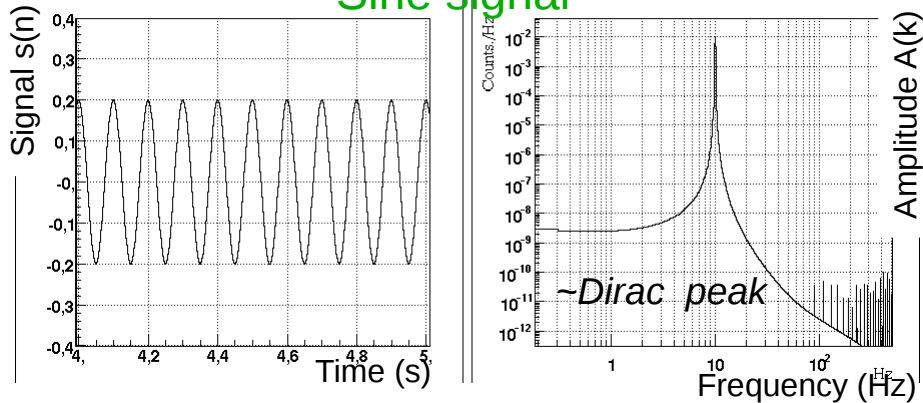


$A(k)$  and  $\Phi(k)$

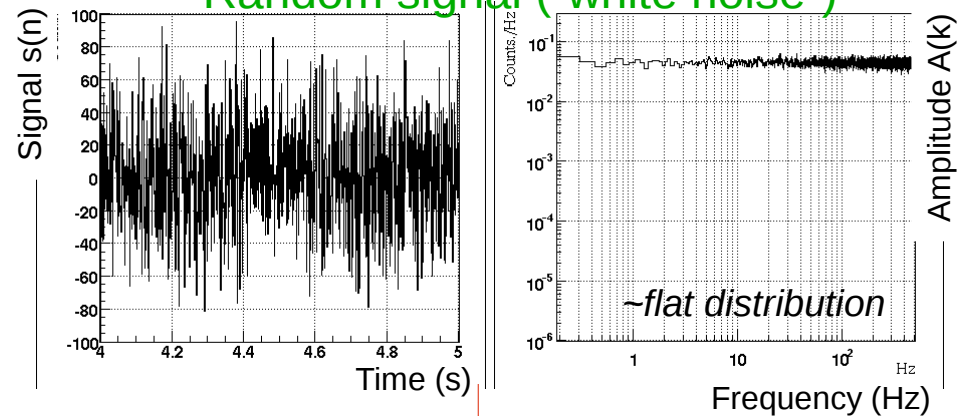
$$S(k) = \sum_{n=1}^N s(n)e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}$$

$$= A(k)e^{\Phi(k)}$$

Sine signal



Random signal ("white noise")



Apply a low-pass filter on the signal

Filtering the data  
= modifying the frequency components

