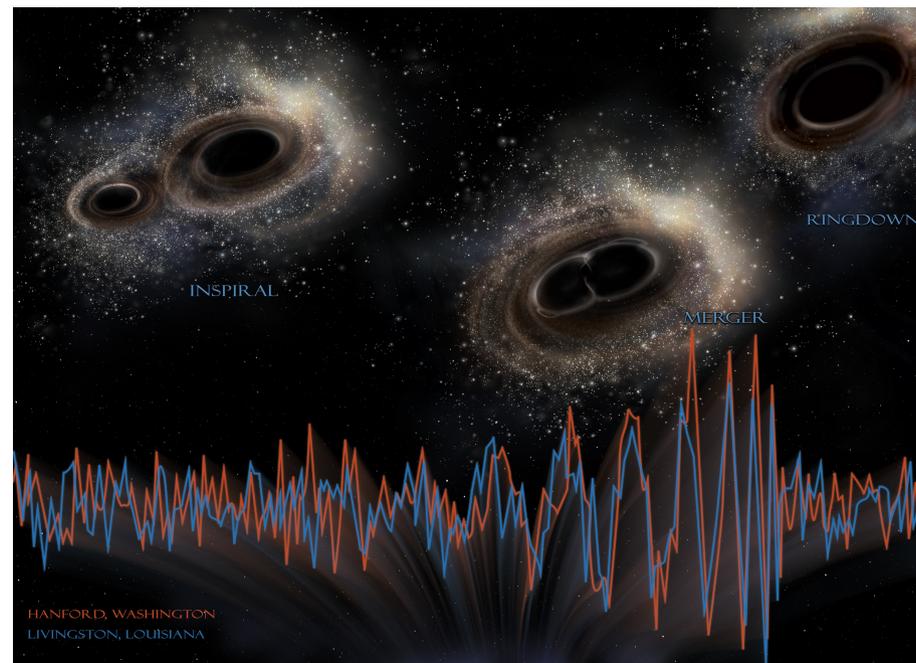
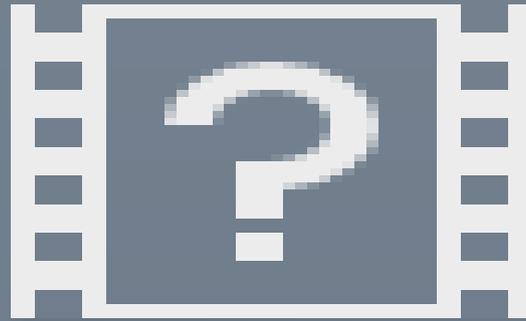


Astronomie en onde gravitationnelle



Nicolas Leroy
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay
EPhyD 2017

Il y a plus d'un milliard d'années
dans une lointaine galaxie

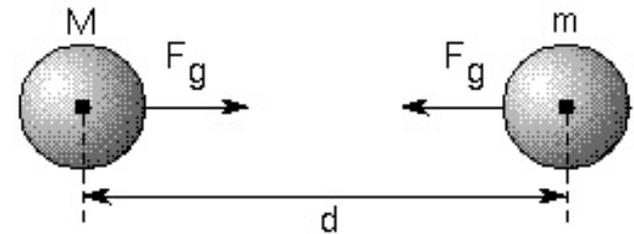
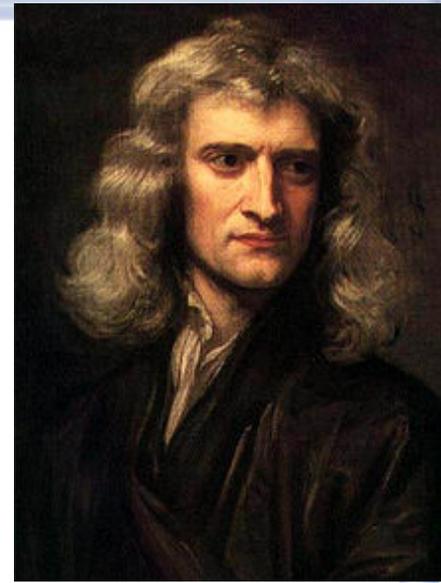


Commençons ...

- Expliquer ce que sont les OG
 - Un peu de gravitation
 - Comment les créer
 - Comment les détecter
- Détecteurs au sol : LIGO – Virgo
- Événements observés

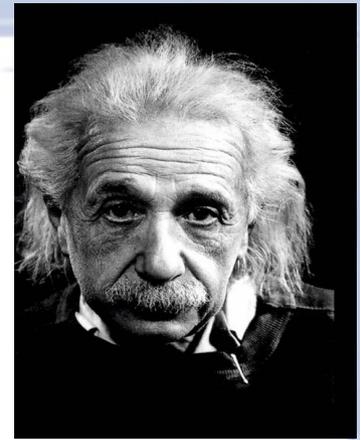
De Newton (1687)

- La gravitation est universelle : même force entre la pomme et la Terre qu'entre le Soleil et la Terre
- Action à distance
 - Explication naturelle pour la forme des orbites des planètes
 - N'explique pas l'origine de la gravitation
 - Effet instantané du moindre changement
- Coordonnées galiléenne
- Temps et distance absolus



$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

À Einstein (1915)

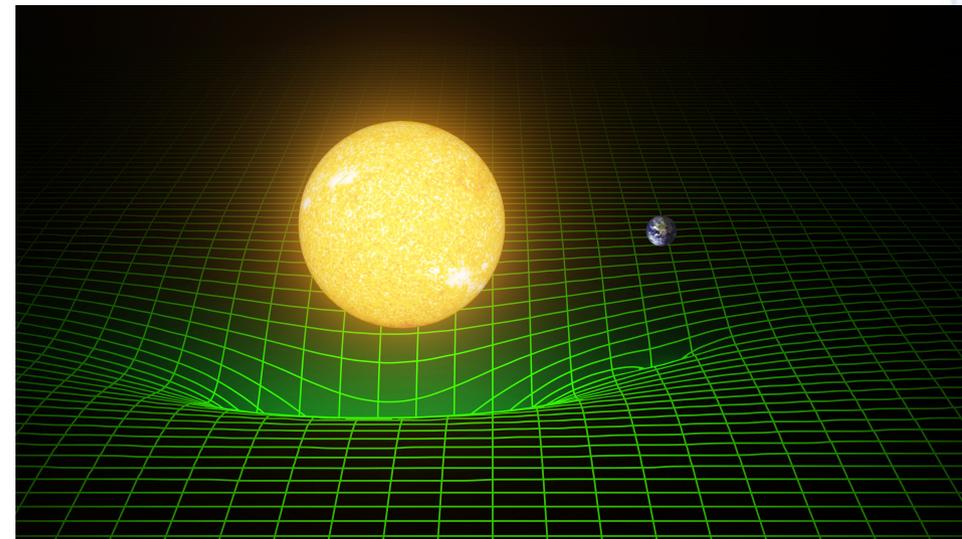


- La gravité ne résulte pas d'une force mais d'une déformation de l'espace temps
- Tout objet déforme l'espace-temps



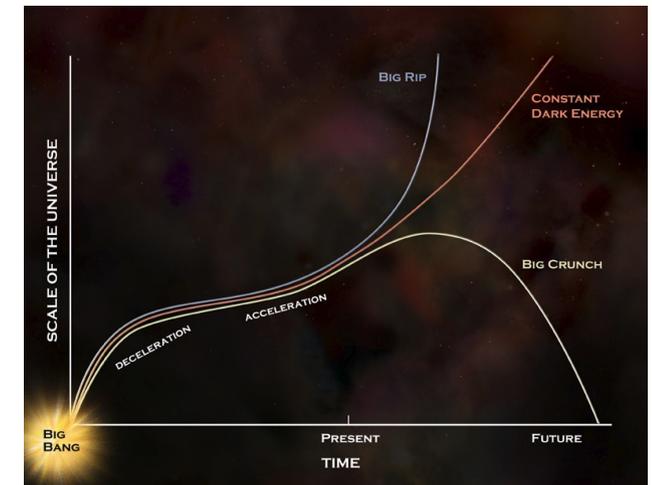
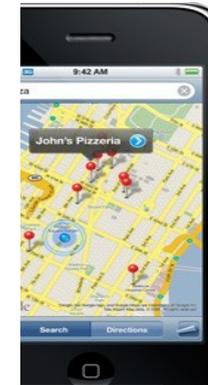
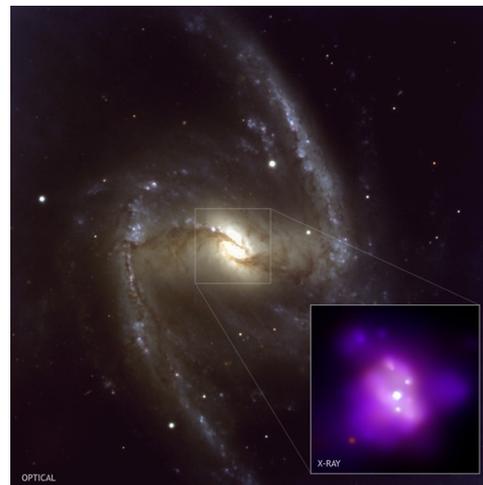
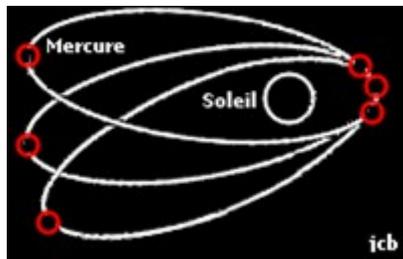
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

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



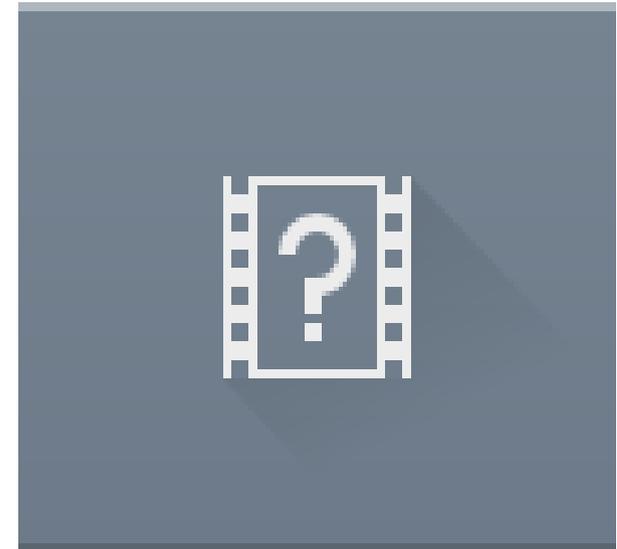
Les succès de la relativité générale

- Déviation de la lumière à proximité de grandes masses (Eddington 1919)
- Orbites planétaires (précession de Mercure)
- GPS (dilatation du temps)
- Singularités gravitationnelles (trous noirs)
- Expansion de l'univers (constante cosmologique)
- Beaucoup d'autres choses...



Quand les masses se déplacent ...

- Masses en accélération :
 - variation locale de la courbure
 - 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)

Un peu d'histoire

- 1915/16 → 1936: RG et OG – Einstein
- 52 : existence OG vérifiée (Choquet-Bruhat)
- 57 : OG peuvent être détectée (Pirani, Bondi et Feynman)
- 63 : trou noir en rotation (Kerr)
- 90s : forme d'onde analytique de la phase coalescente (blanchet, Damour, Deruelle, Iyer, Will, ...)
- 00s : Effective One Body (Damour, Buonanno)
- 06 : simulation numérique complète (Pretorius, Baker, Loustos, Campanelli)
- 60s : barres de Weber
- 70s : premier prototype interféromètre (Forward)
- 72 : détermination des bruits des instruments (Weiss)
- 80s : premiers protos (Weiss, Drever, Brillet, ...)
- 90s : LIGO (USA) – Virgo (Italy)
- 00s : premières prise de données
- 07 : accord LIGO-Virgo
- 10s : construction de la nouvelles génération

Les produire en laboratoire ?

- Prouver l'existence des OG : peut-on faire comme Hertz avec les ondes électromagnétiques ?

- Puissance émise : $P = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}_{\mu\nu} \ddot{Q}^{\mu\nu} \rangle$ Moment quadrupolaire:
quantifie écart à la symétrie
sphérique

$G/5c^5 \sim 10^{-53} \text{ W}^{-1}$

facteur astronomiquement pénalisant !

source	distance	$h = \Delta L/L$	P (W)
Barreau d'acier, 500 T, $\varnothing = 2$ m L = 20 m, 5 tours/s	1 m	2×10^{-34}	10^{-29}
Bombe H, 1 mégatonne Asymétrie 10%	10 km	2×10^{-39}	10^{-11}

Allons voir plus loin, plus compact

- « G/c^5 very small , c^5/G will be better » @ J. Weber(1974)

- Puissance émise :
$$P = \frac{G}{c^5} \epsilon^2 \omega^6 M^2 R^4$$

ϵ : asymétrie

R : rayon de la source

M : masse de la source

ω : vitesse caractéristique

- Rayon de Schwarzschild :
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

rayon de trou noir de même masse

- Récrivons la puissance :
$$P = \frac{c^5}{G} \epsilon^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \left(\frac{R_s}{R} \right)^2$$

Pour être détectable :

- **astre compact**
- **grande asymétrie du système**
- **mouvement relativiste**

Supernovae

10 M_\odot @ 10 kpc

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

NS-NS @ 10 Mpc

$$h \sim 10^{-20}$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ al} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

Sources possibles

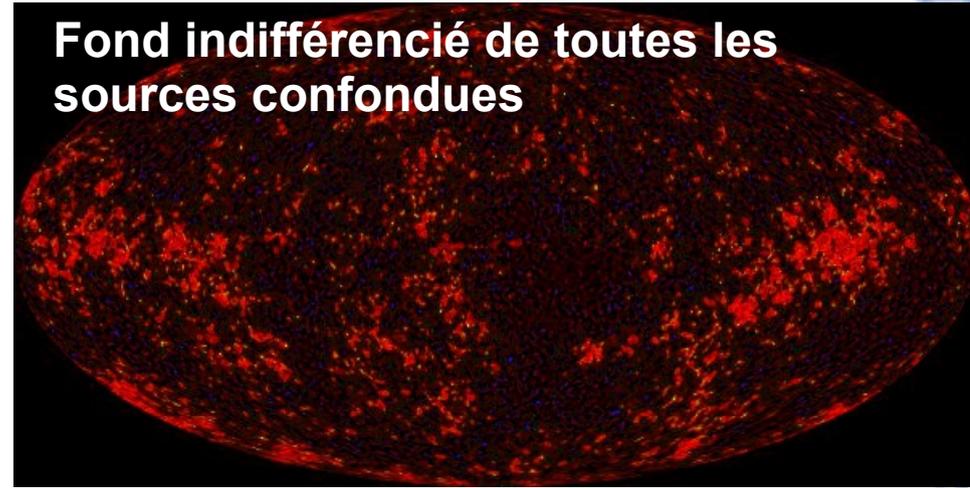
**Effondrement
d'étoile massive
(supernova)**



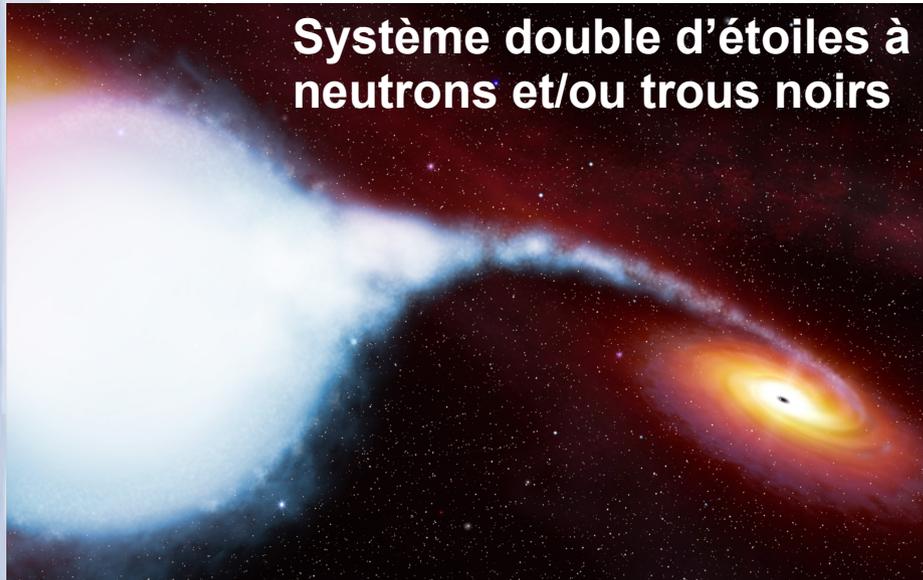
**Étoile à neutrons
isolée**



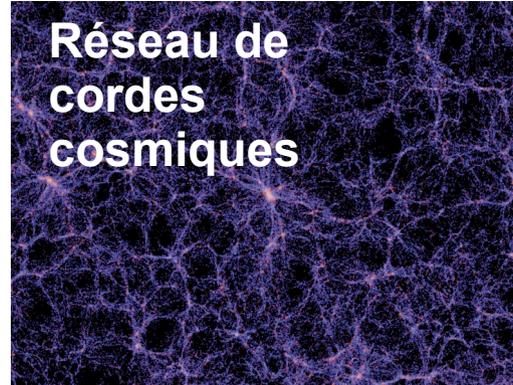
**Fond indifférencié de toutes les
sources confondues**



**Système double d'étoiles à
neutrons et/ou trous noirs**

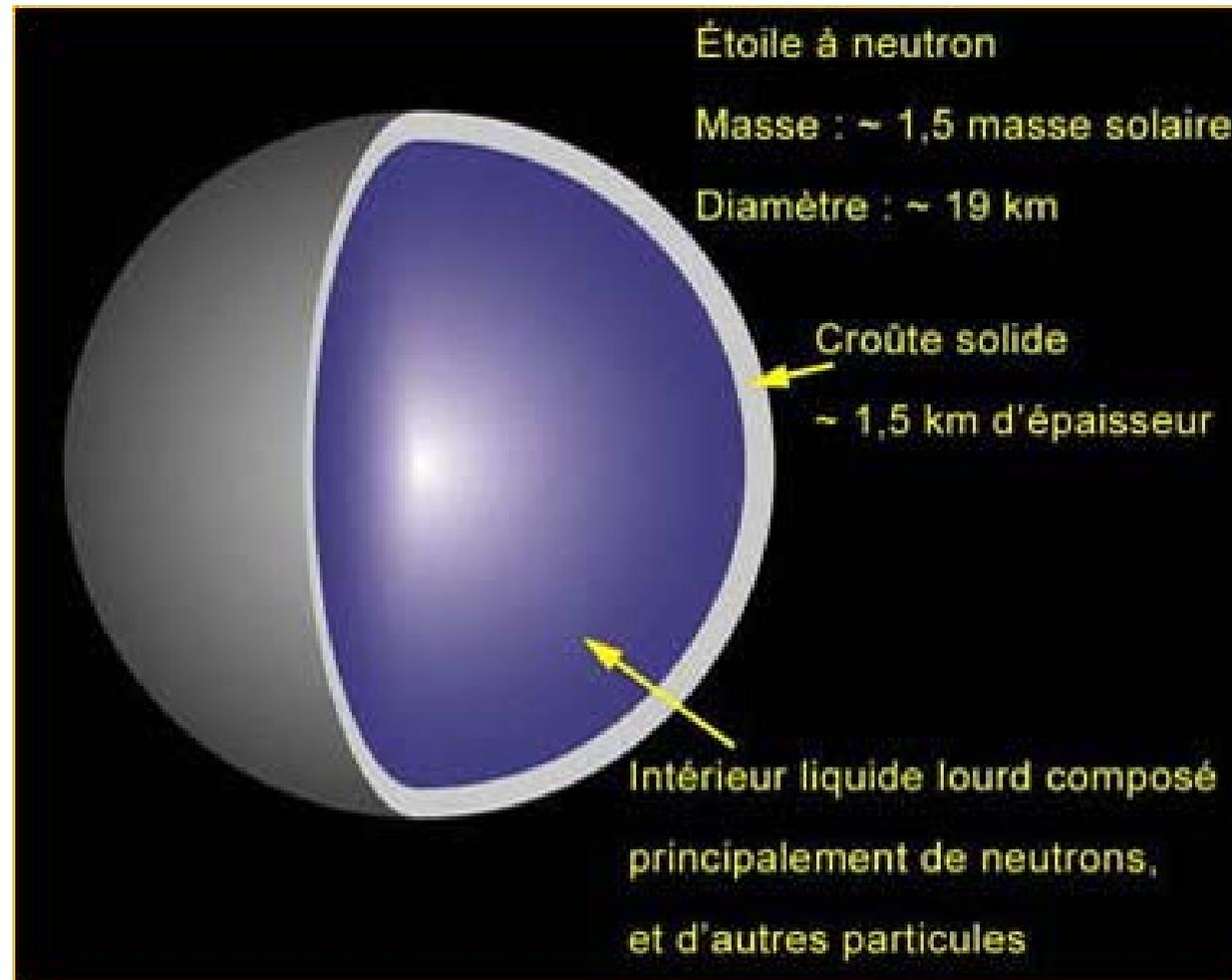


**Réseau de
cordes
cosmiques**



Surprise !

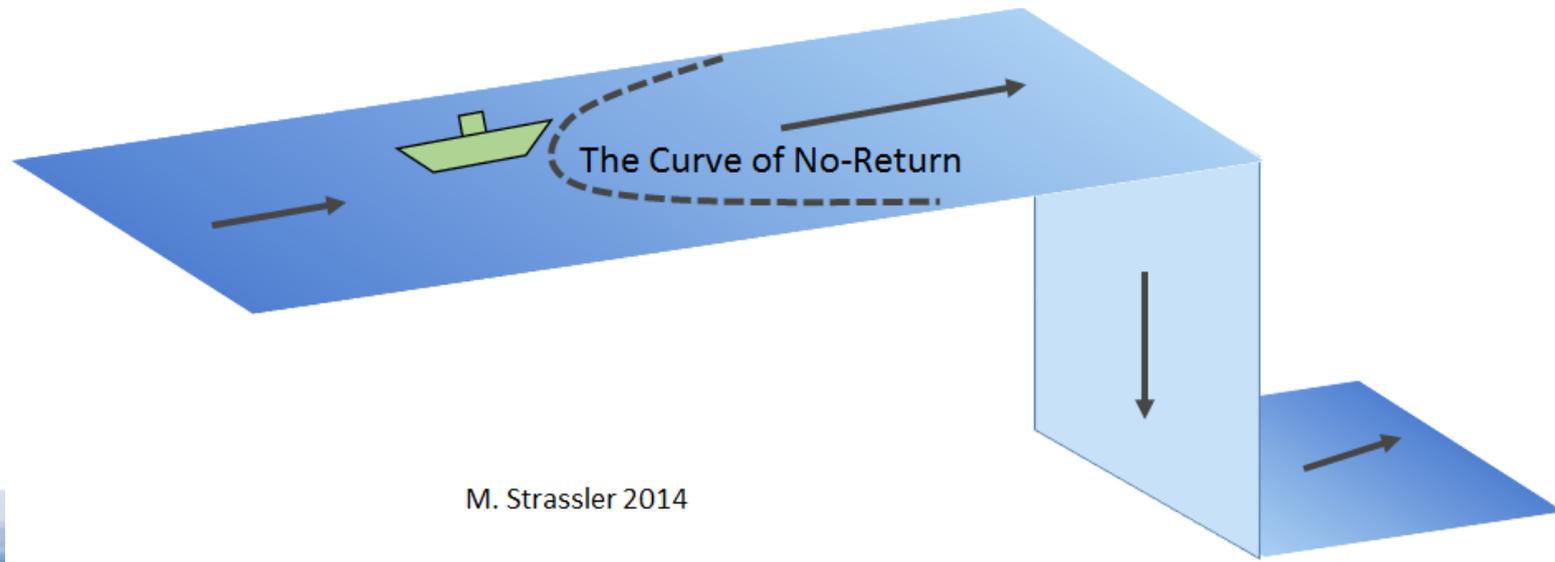
Etoiles à neutrons



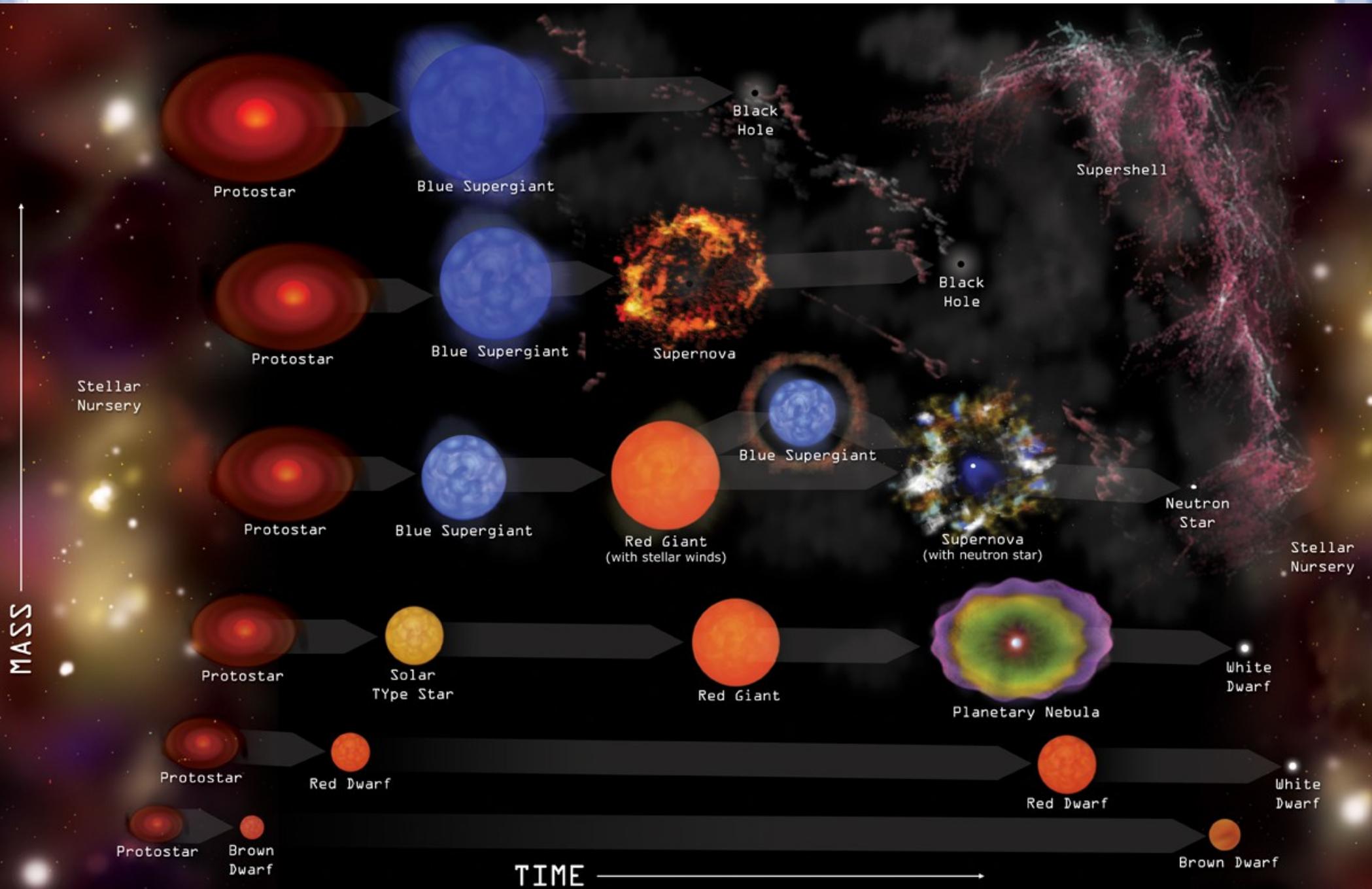
Trous noirs

- Région de l'espace temps dont rien ne peut s'échapper, même la lumière
- La frontière immatérielle entre l'intérieur de l'objet (sans retour possible) et le reste de l'univers est appelé l'horizon

A Person In a Boat that Crosses the Curve of No-Return Will Notice Nothing at the Time, But is Doomed To Go Over The Waterfall



Création d'objets compacts

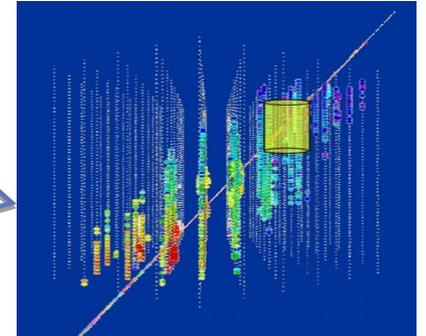


Les débuts de l'astronomie multi-messagers

Gamma-rays



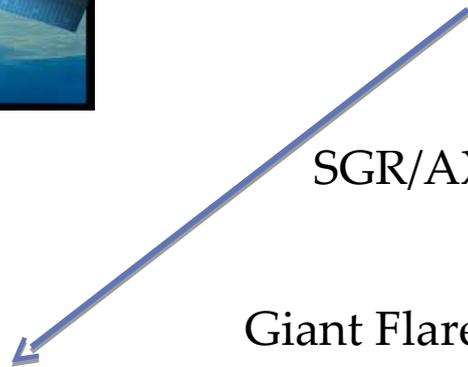
HE (>1 TeV) ν



GRB



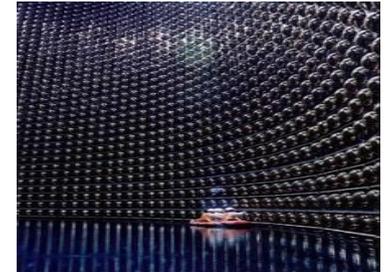
SGR/AXP



Supernovae
type II



LE (MeV) ν

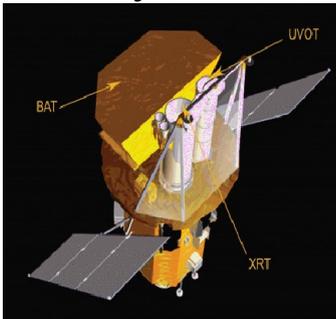


Giant Flare

Pulsar/
pulsar glitches



X-rays

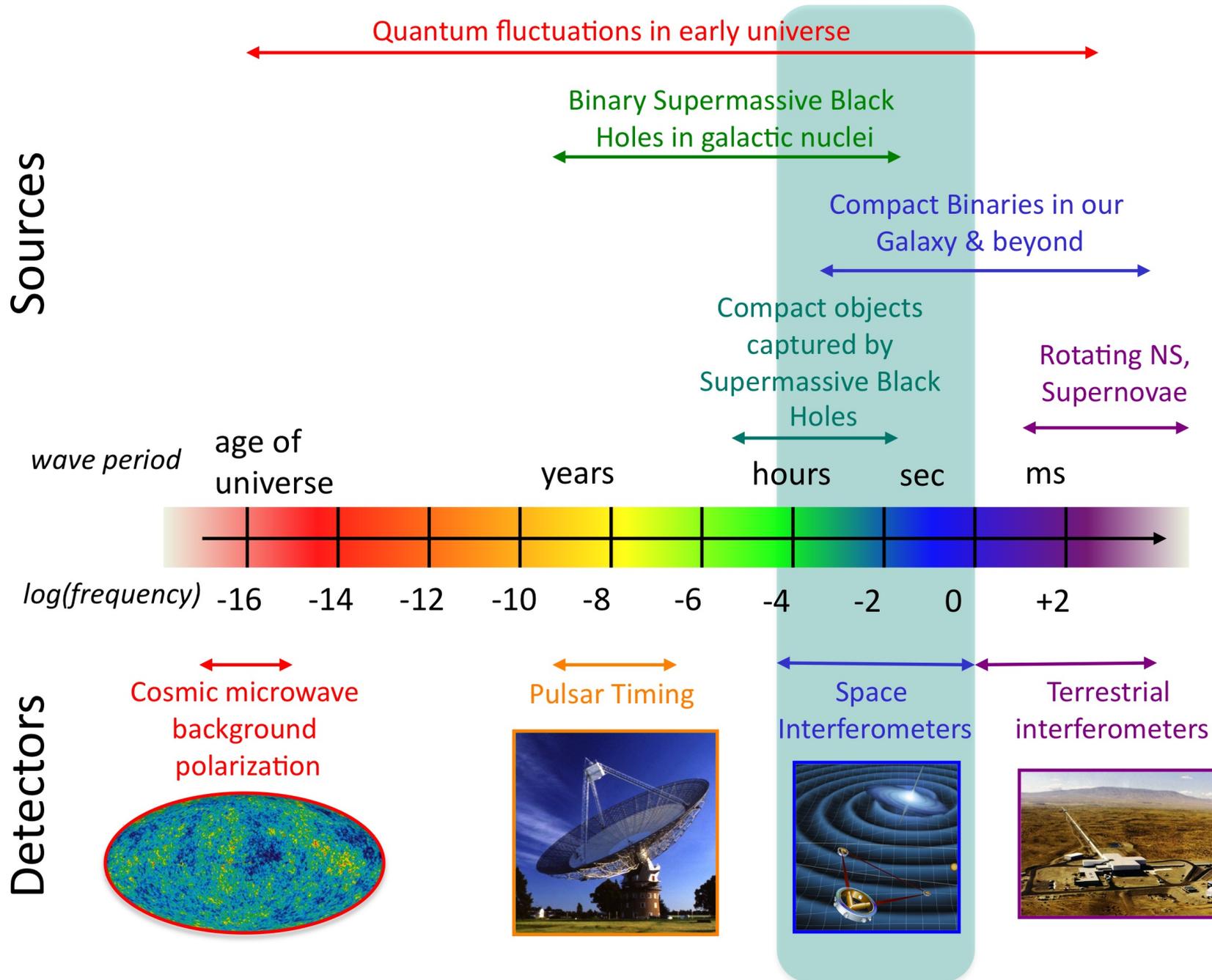


Optical



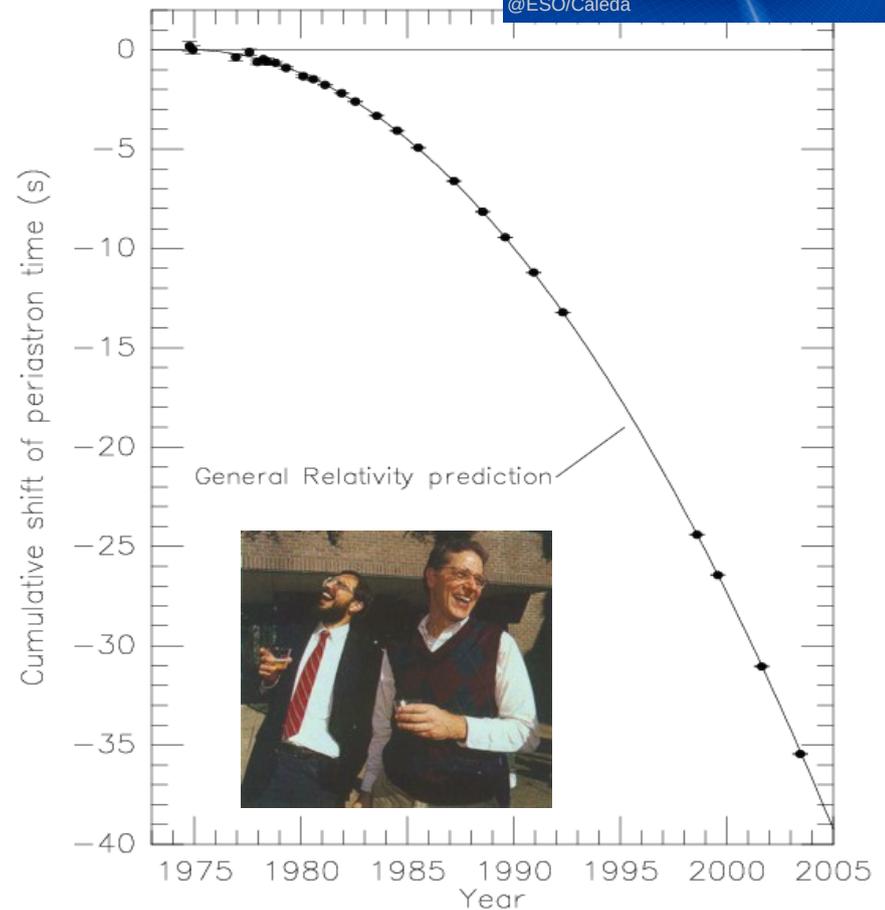
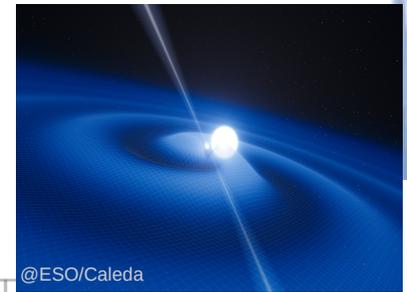
Radio

The Gravitational Wave Spectrum



La première preuve

- La première preuve expérimentale existait
 - Pulsars binaires comme PSR 1913+16
- Perte d'énergie de ces systèmes par OG induit une diminution de la période orbitale
 - ♦ Séparation $\sim 10^6$ km
 - ♦ Diminution de 3mm/orbite(8h)
 - ♦ Observée pendant plus de 30 ans

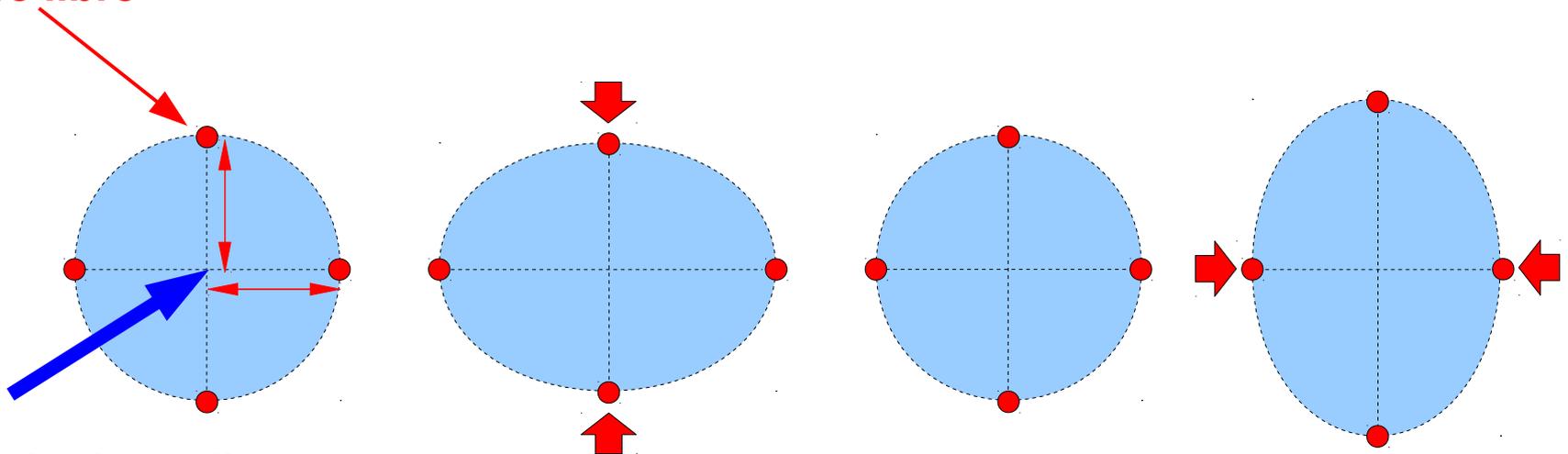


Prix Nobel Hulse et Taylor en 1993

Passage d'une onde

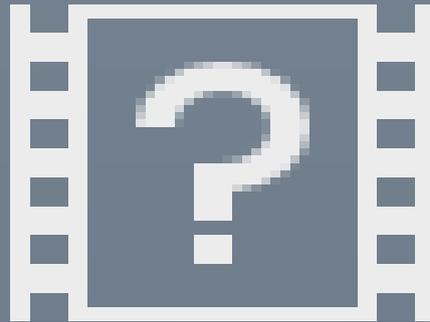
- Espace-temps légèrement modifié
→ les distances changent brièvement : $h = \delta L / L$
- h correspond au taux de déformation de l'espace-temps
- Très faible interaction avec la matière – accès aux grandes distances
- Détecter une onde gravitationnelle revient à détecter une variation relative de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

Masse libre



Onde gravitationnelle

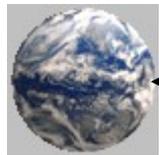
Interféromètre de Michelson



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

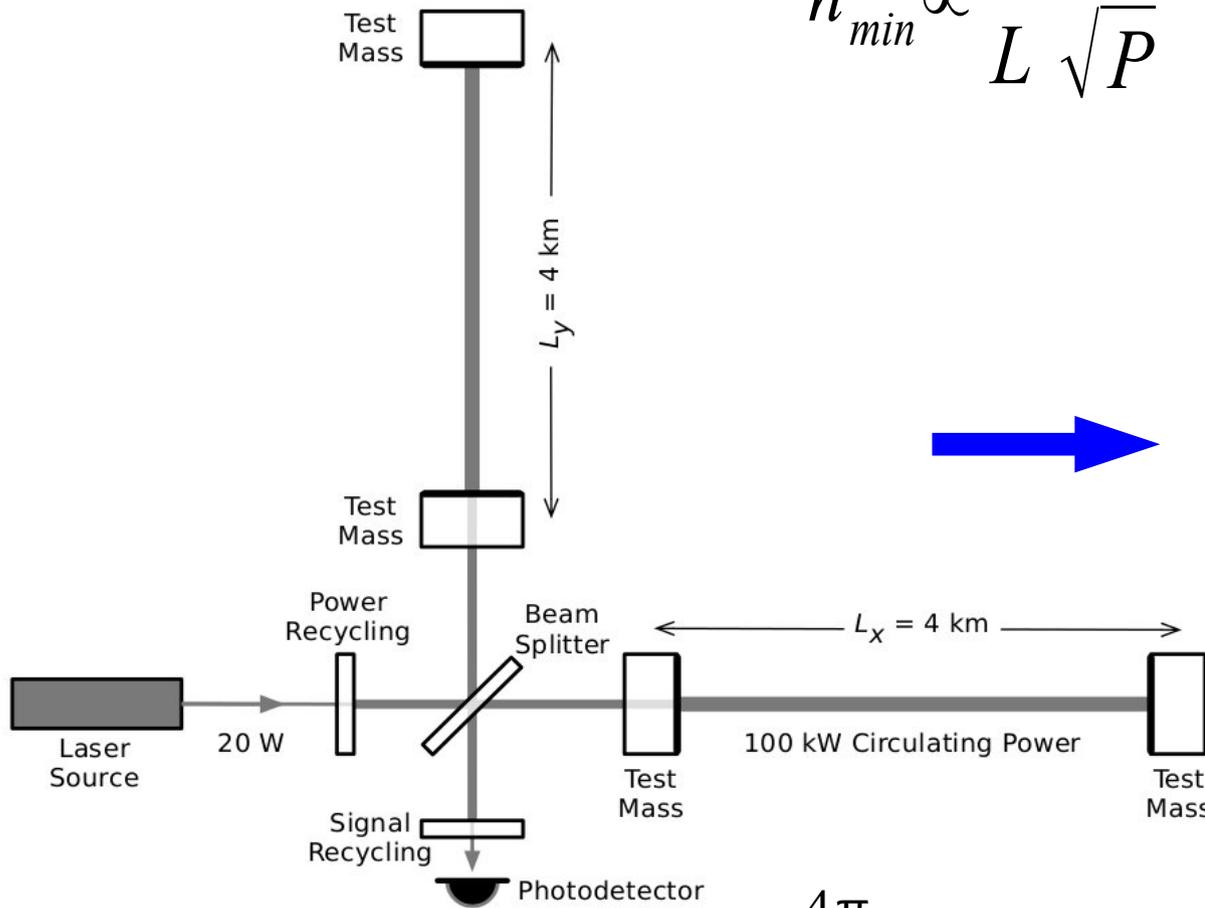
Soleil



Détecteurs interférométriques

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

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

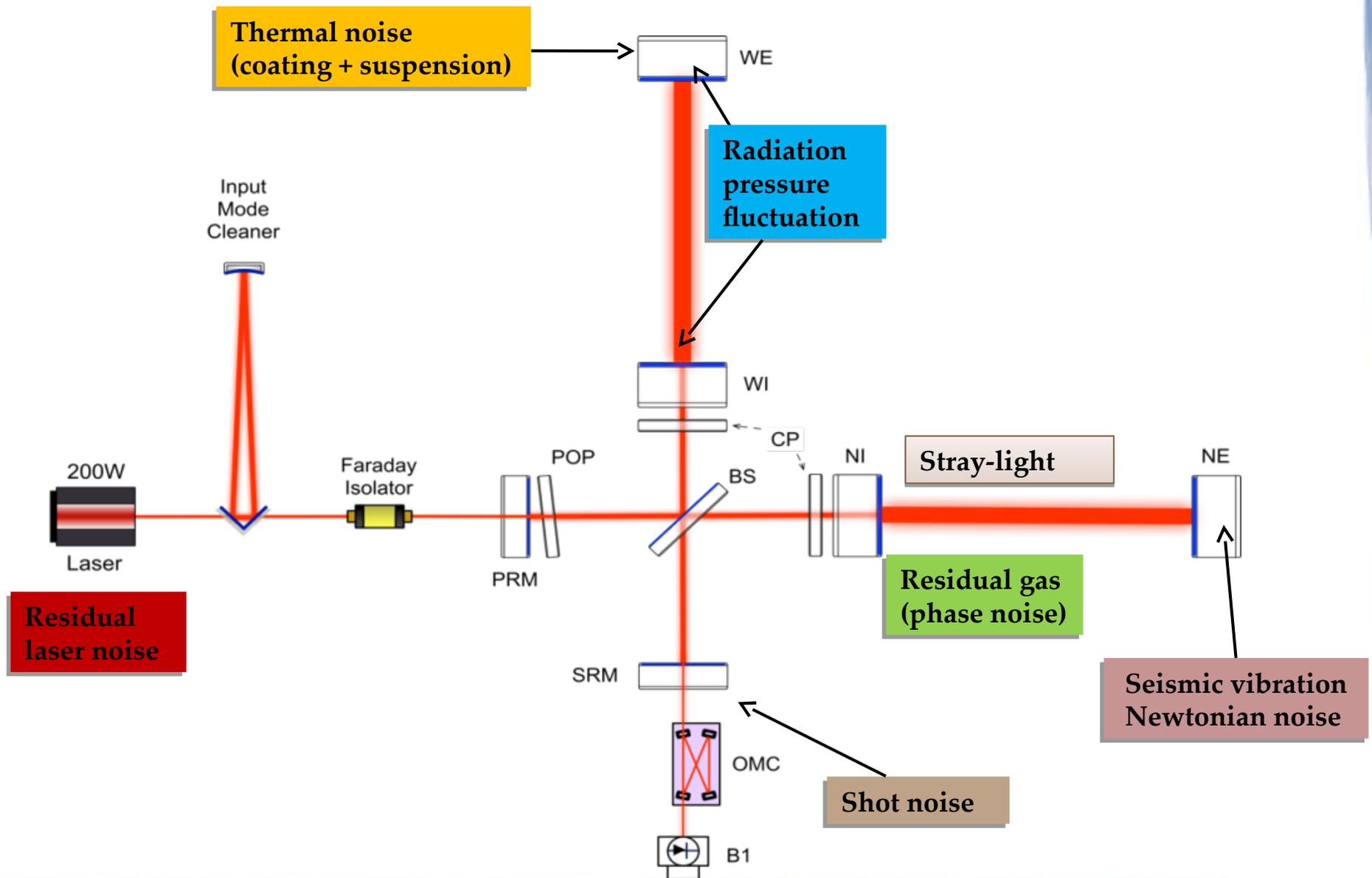


$$h_{min} \approx 10^{-23}$$

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

Ensemble maintenu en résonance
par un contrôle à 10 kHz

Les quelques petits problèmes à résoudre



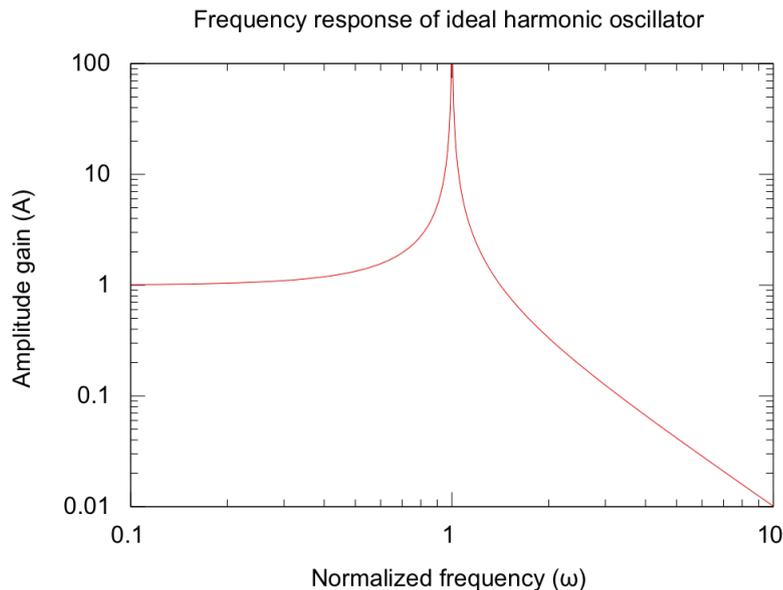
S'isoler du sol

- Origines du bruit (quelques exemples):

- Houle
- Activité humaine
- Tremblements de terre

- Bruit sismique mesuré :

→ Filtrage indispensable – oscillateur harmonique



Pendule inversé :
7m, 1 tonne

7 filtres passifs

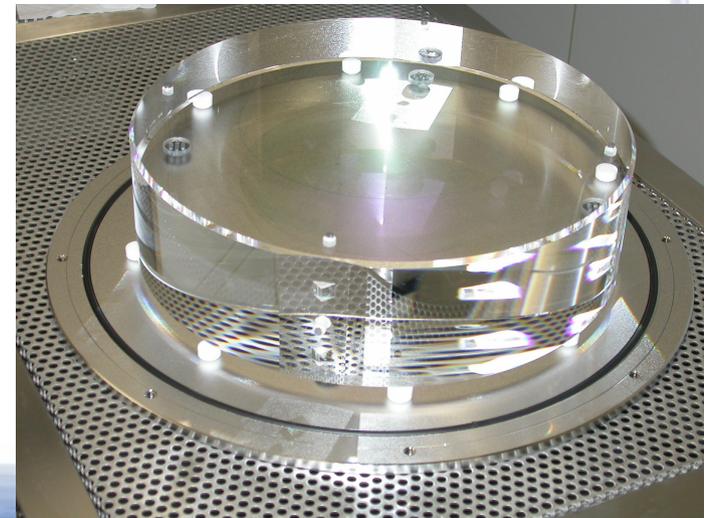
Atténuation sismique:
 $\sim 10^{14}$ à 10 Hz

Miroir quasi parfait

- A température ambiante la surface du miroir peut bouger
 —→ masse de 40 kg
- Réflectivité définie à mieux que quelques parties par millions: nos miroirs standard le sont à 1 %
- Faibles pertes (absorption, diffusion) de l'ordre que quelques ppm à $\lambda=1064\text{nm}$
- Surface définie avec défauts $<$ au nm ($\lambda/1000$) sur 30 cm de diamètre

Solution actuelle :

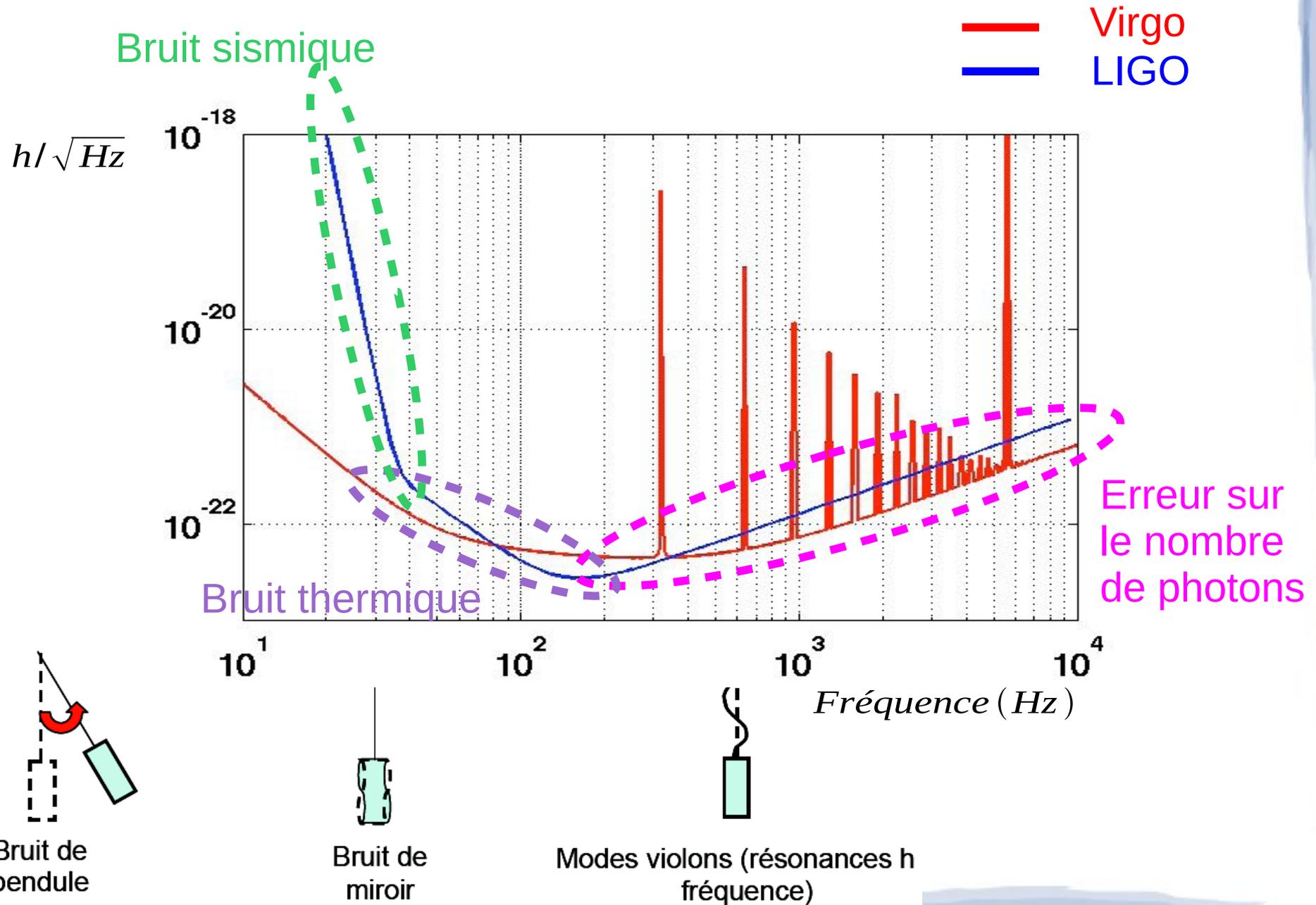
- miroir en silice (SiO_2)
- diamètre : 35 cm
- épaisseur : 10 – 20 cm
- masse : 40 kg
- dépôt en couches monoatomiques



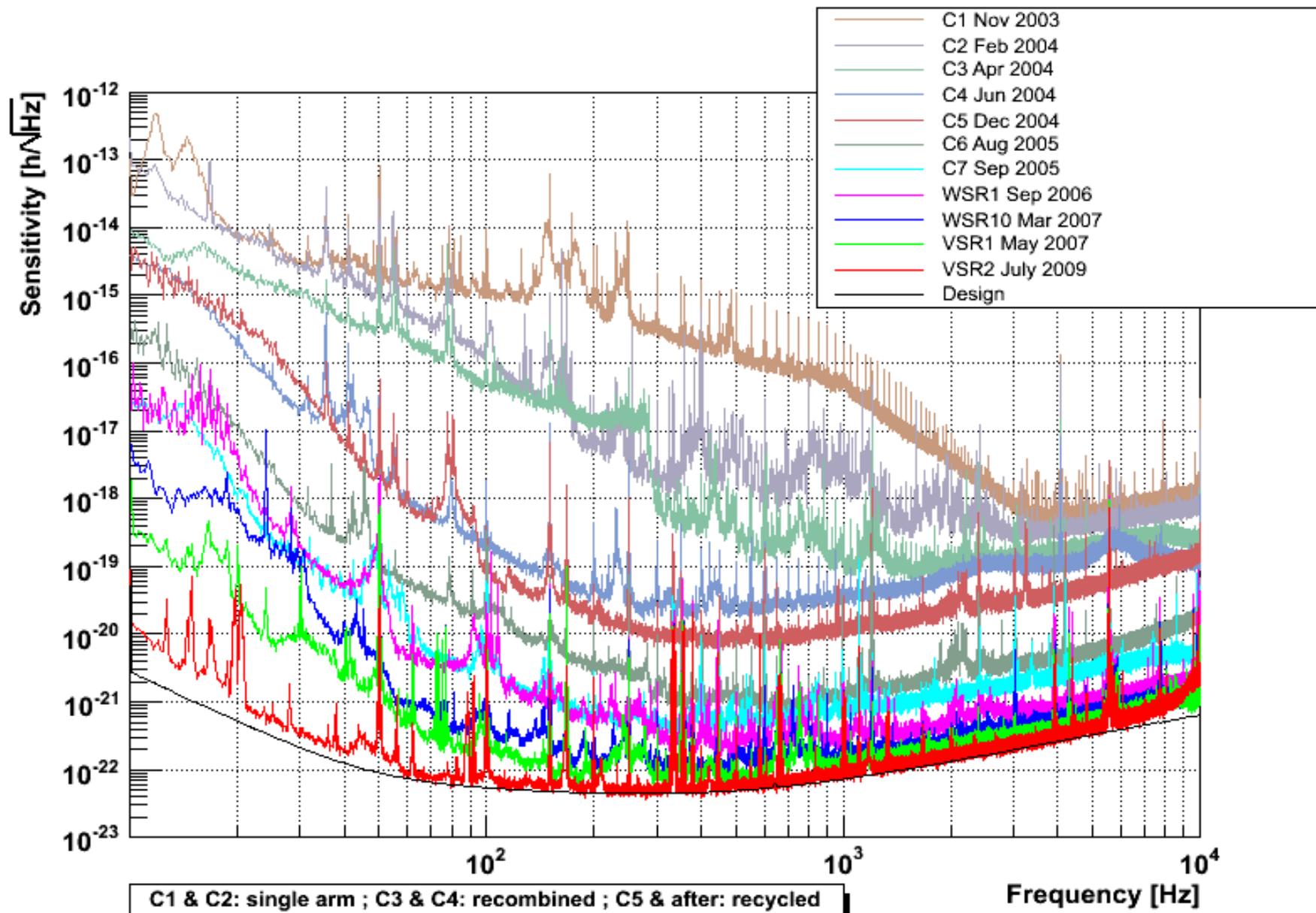
Autres solutions utilisées

- Bruit acoustique – enceinte à vide + protection spécifiques autour des systèmes externes
- Fluctuation d'indice sur le chemin optique – enceinte à vide $P \sim 10^{-9}$ mbar dans 7000 m^3
- Bruit du laser – contrôle en permanence
- Toute lumière diffusée doit-être piégée
- Contrôle des éléments optiques (par couple bobine-aimant ou électrostatique):
 - Contrôle des longueurs : $<10^{-12}$ m
 - Alignement des miroirs : $<10^{-9}$ rad

Sensibilité de l'expérience

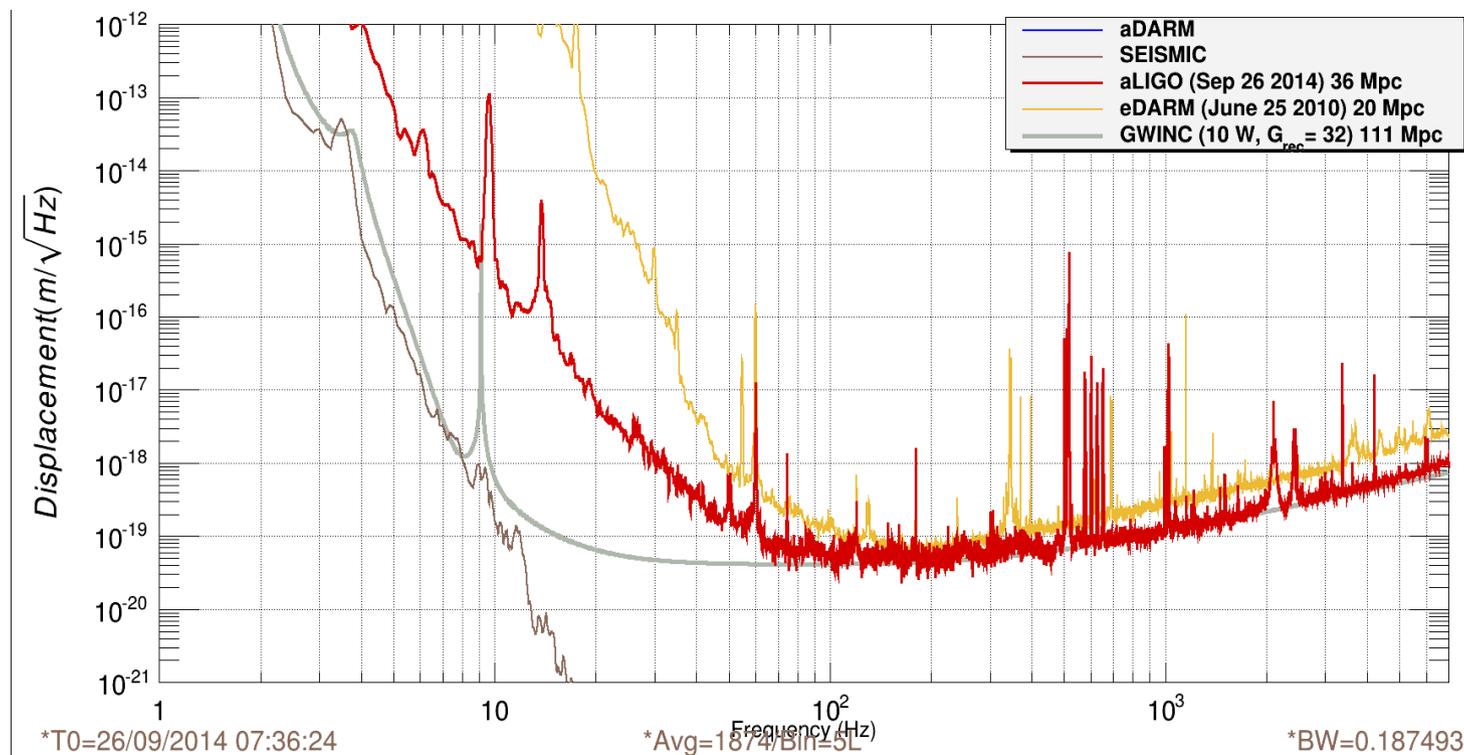


La première génération ne s'est pas faite pas toute seule



Mais cela fut rentable

- En 5 mois après construction nous obtenons une sensibilité meilleure que là où nous étions arrêté

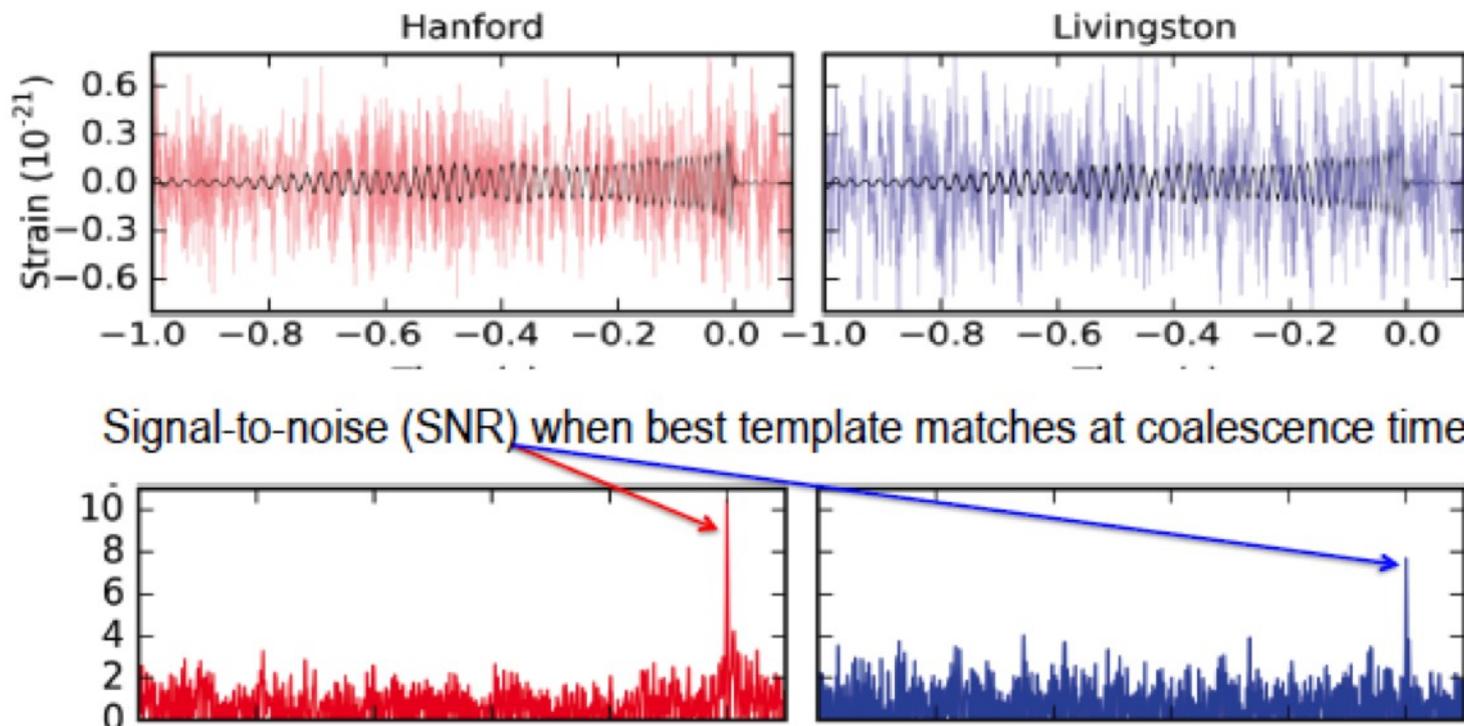


Réseau mondial : quelques chiffres

- Nombre de collaborateurs : 250 Virgo / 750 LIGO
- Prix d'un miroir : 400 000 euros
- Prix d'un laser : 2 millions euros pour un laser de 200 W
- Prix d'une suspension : 500 000 euros
- Prix total pour Advanced Virgo : 22 millions euros (rien en infrastructure)
- Coût fonctionnement : 10 millions par an/site (coût lié au site , R&D, ...)
- 1 seul signal contenant l'information OG mais plus de 100000 canaux pour le comprendre
- Espace disque : 410 000 Go / site / an

Analyse des données

- Tenir compte de la nature des objets astrophysiques recherchés
- Différents types d'analyse selon le type de signal
- Reconstruire les caractéristiques de cet événement



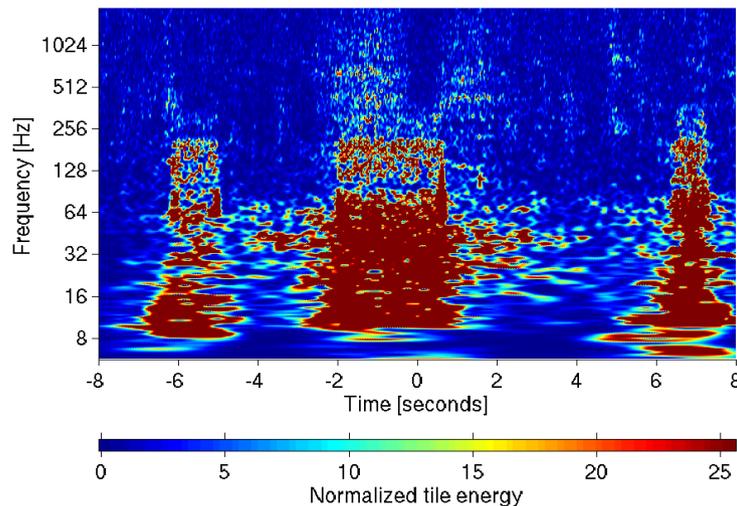
Quelques difficultés

- Pas de déclenchement de l'expérience, ni de conditions expérimentales connues
- Rapport signal sur bruit et très faible comparé aux observatoires électromagnétiques
- Méthodes numériques lourdes et nécessite de grosses puissances de calculs
- 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 : quelques unes par mois
 - Rapport 1 / 10 000 000

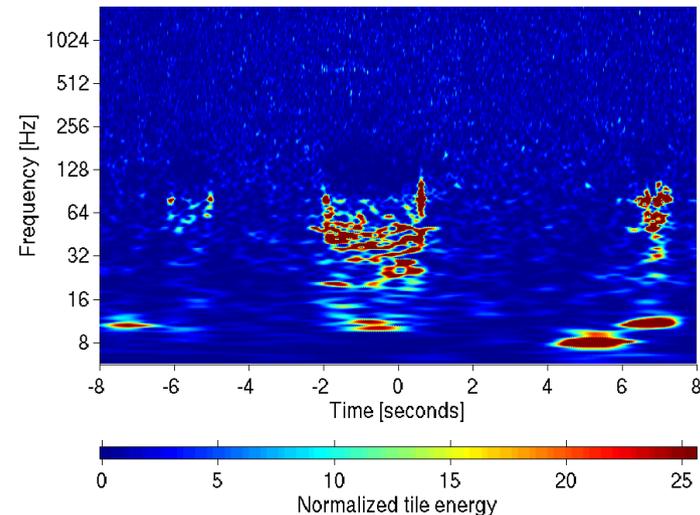
Nettoyer les données

- Un grand nombre d'événements peuvent être détectés au niveau de la frange noire : problème électronique, bruit acoustique sur les tables optiques, ...

Signal sur la frange noire



Courant envoyé sur une bobine



- Travail important sur la compréhension des bruits du détecteur

Un réseau mondial de détecteurs

LIGO -
Hanford 4 km



G1: 600 m



V1: 3 km

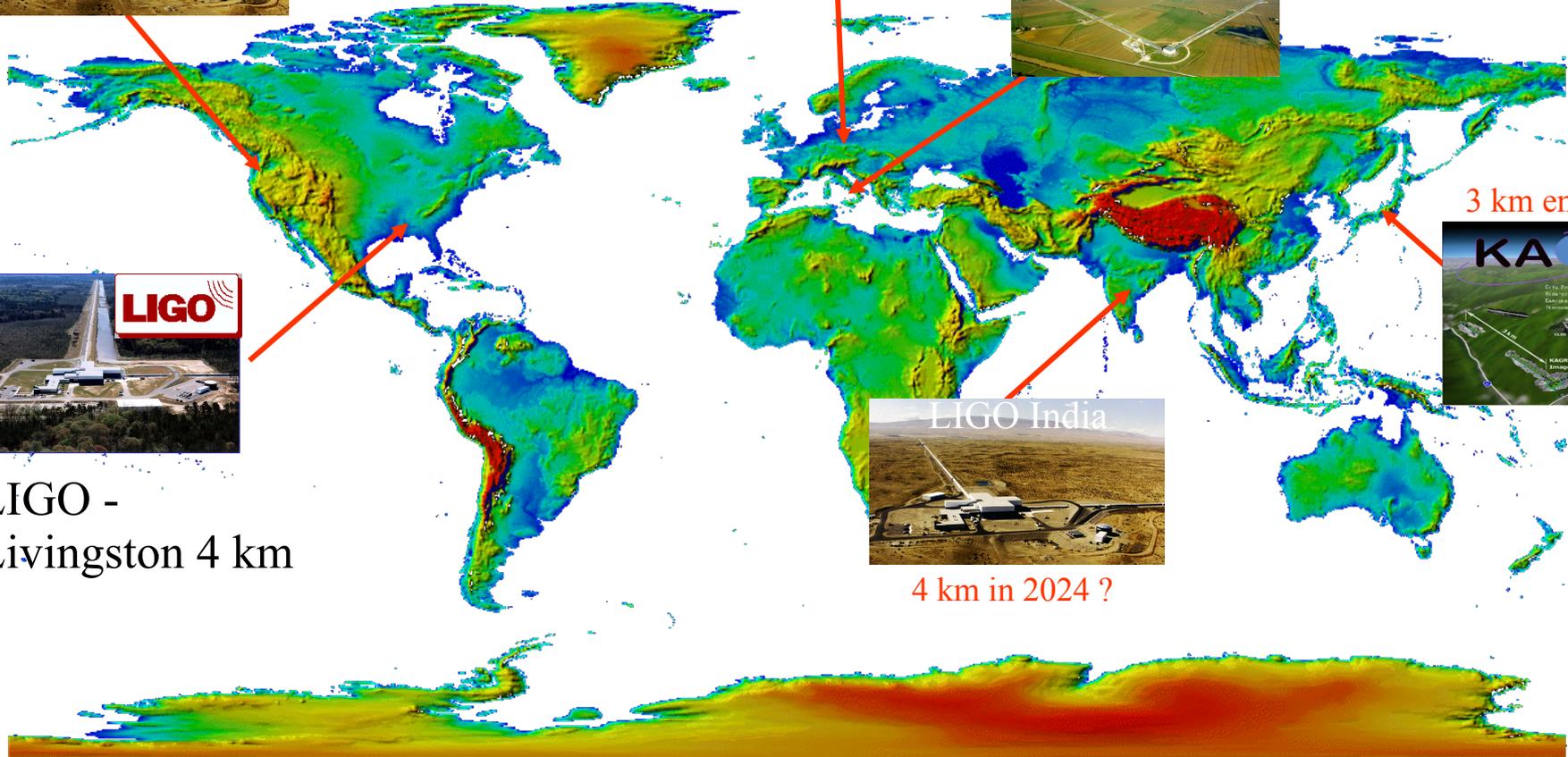


LIGO -
Livingston 4 km



4 km in 2024 ?

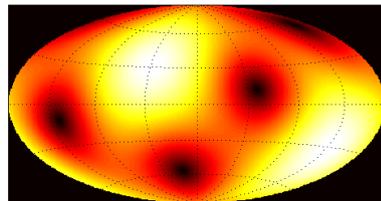
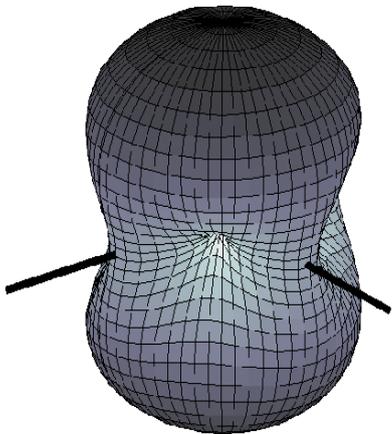
3 km en 2020 ?



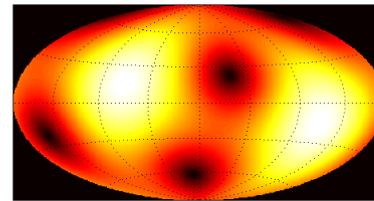


Analyse en réseau

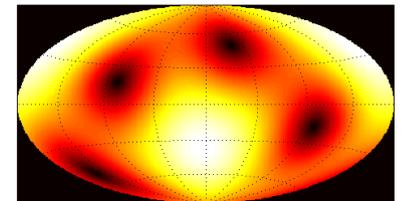
- Beaucoup d'avantages:
 - Meilleure discrimination des faux événements
 - Les ITFs ne sont pas directionnels mais n'ont pas la même couverture sur l'ensemble du ciel
 - Position reconstruite par temps de vol
 - 2 détecteurs : un anneau
 - 3 détecteurs : 2 zones possibles
 - > 3 : détermination non ambigu



Hanford



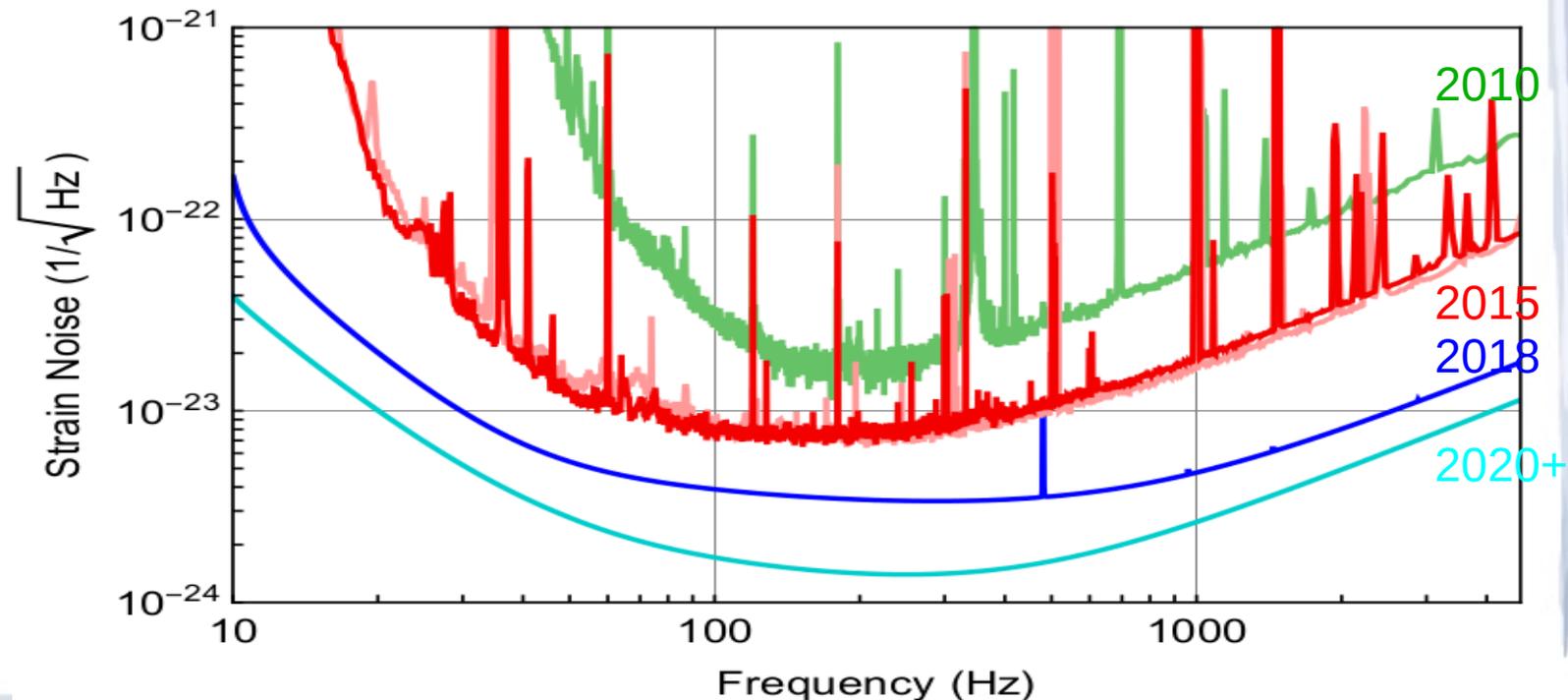
Livingston



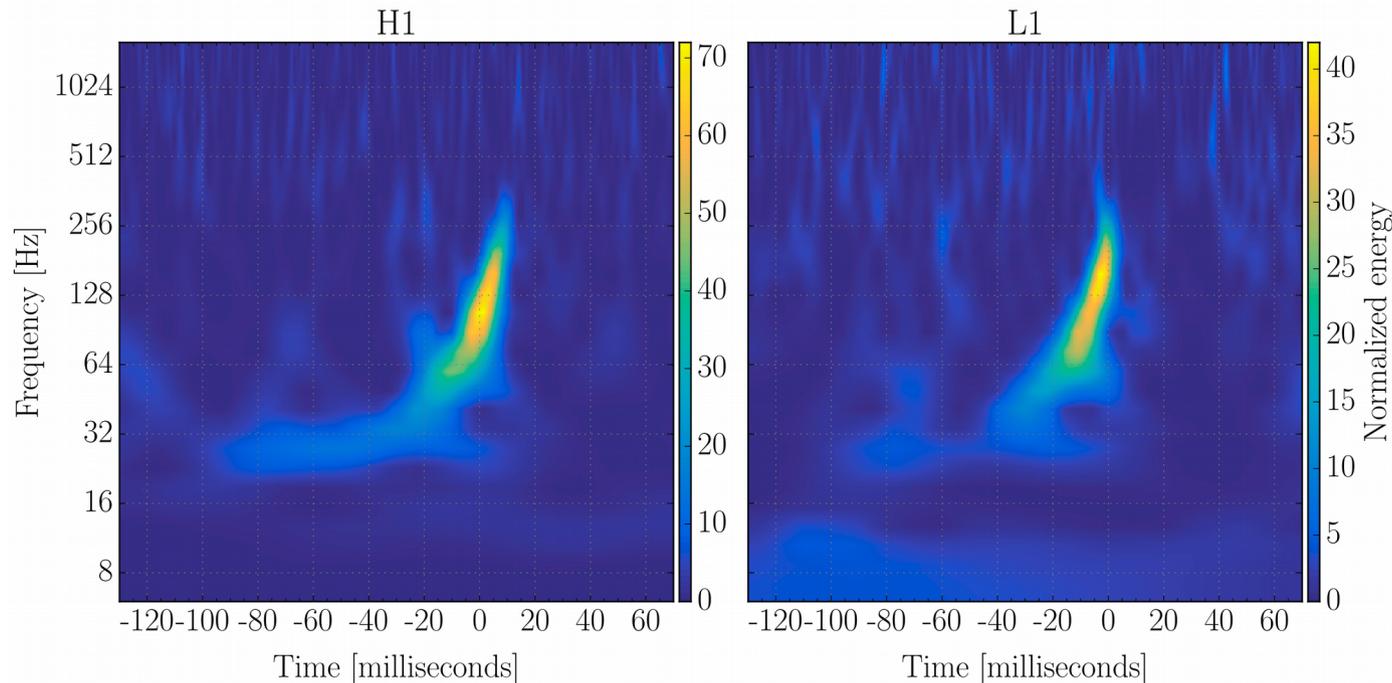
Virgo

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



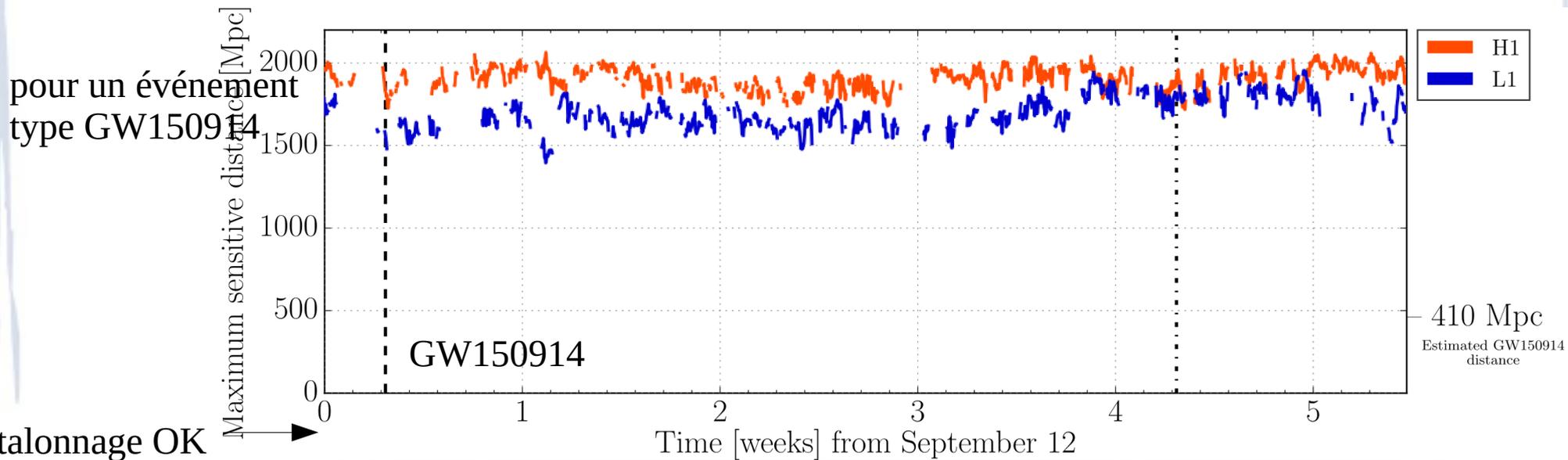
Le 14 septembre 2015 09:51 UTC



- 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

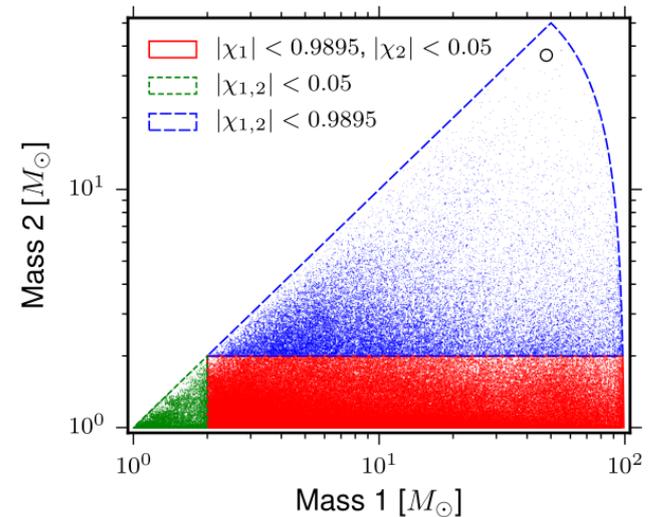
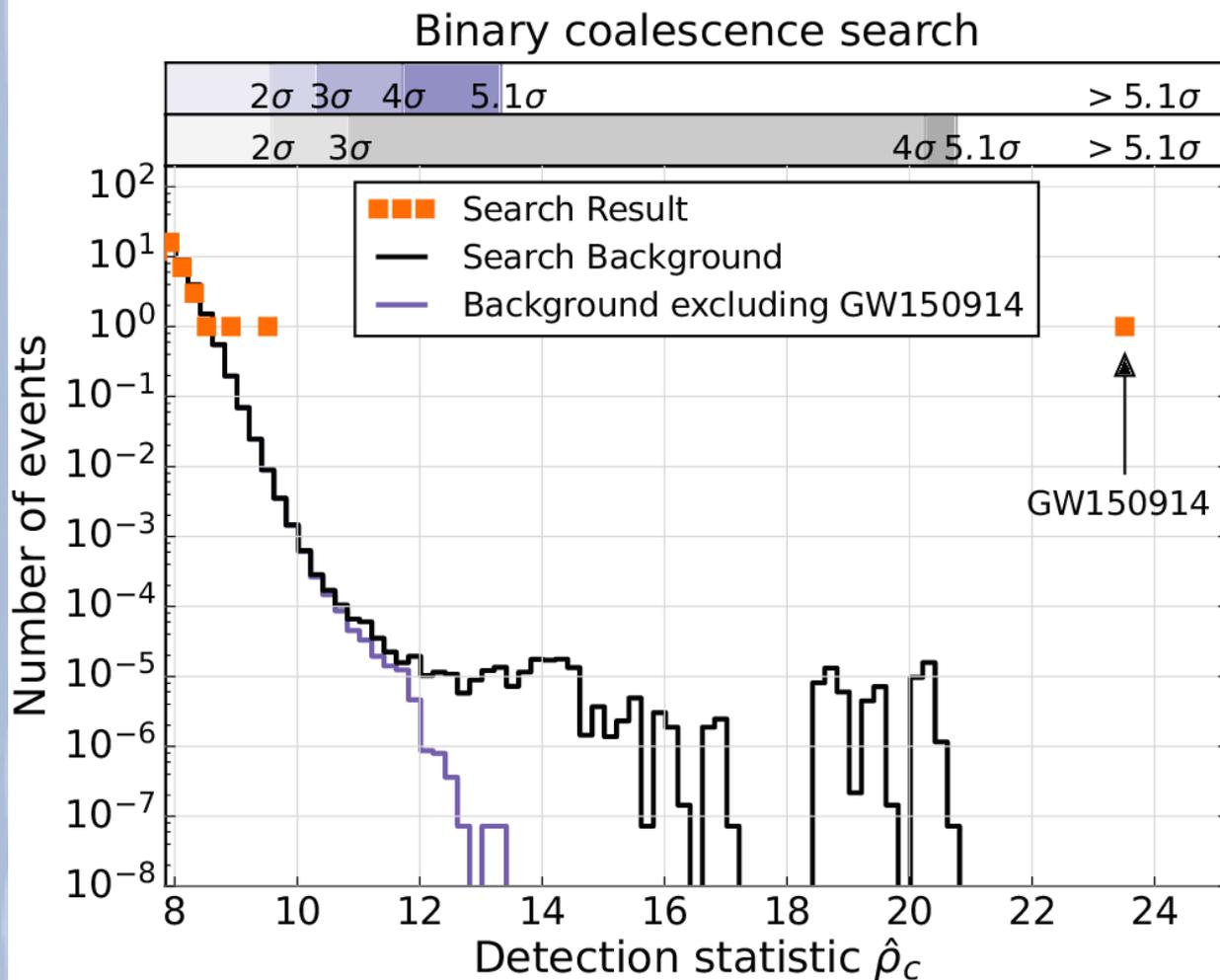
Actions pour vérifier l'événement

- 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

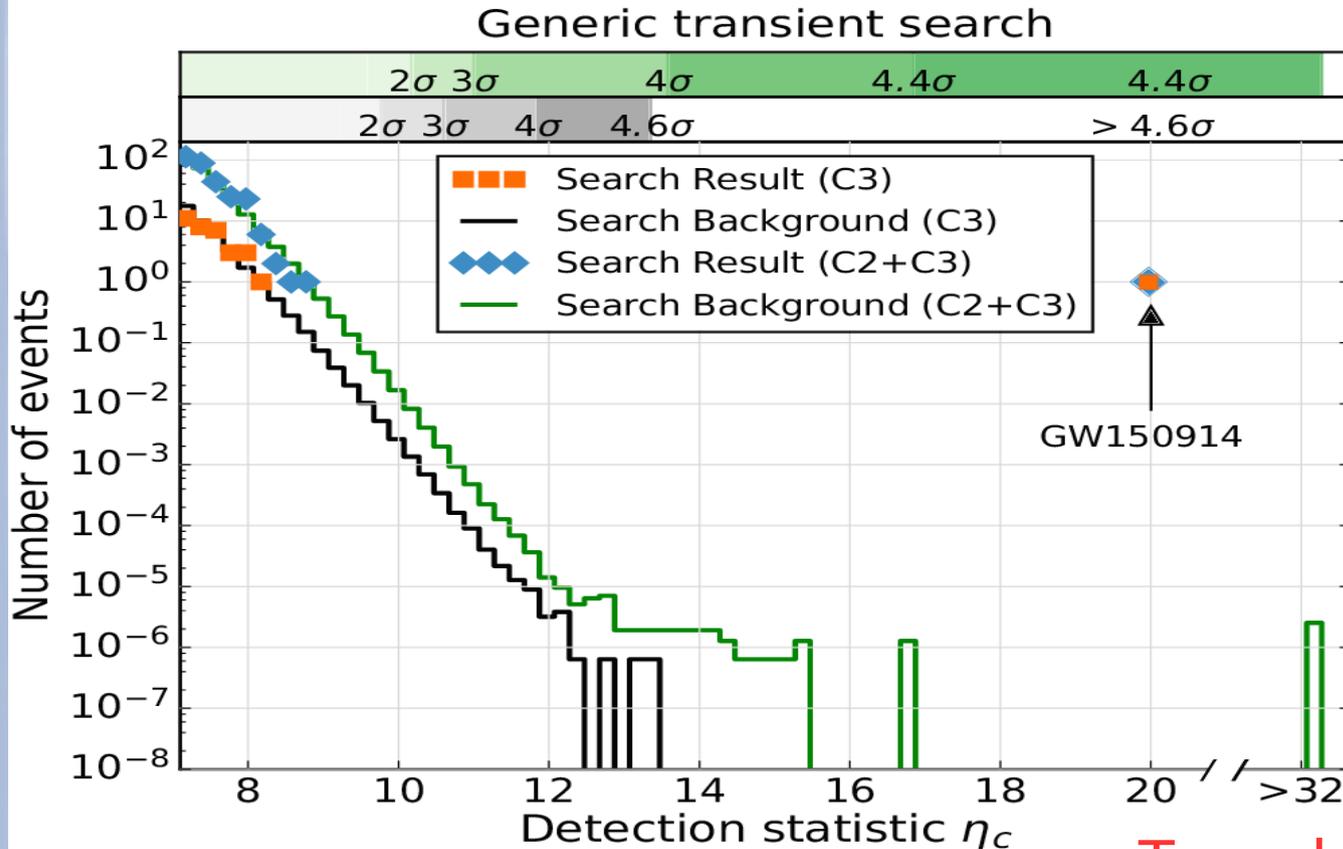


Taux de fausse alarme :
< 1evt/200 000 ans

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

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

- Analyse sans a priori sur forme d'onde



Taux de fausse alarme :
< 1evt/67 400 ans

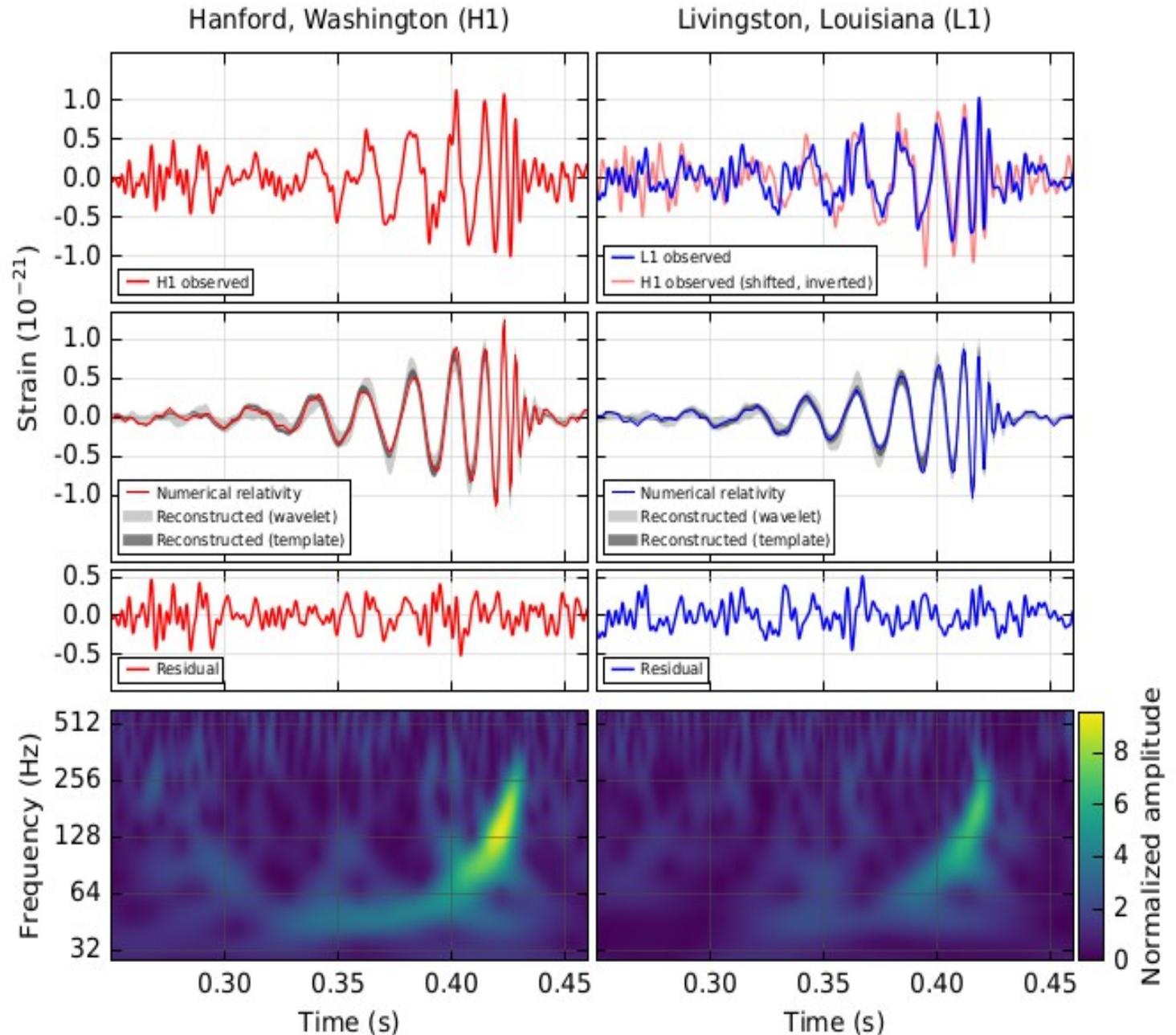
Probabilité fausse détection
< 2×10^{-6} soit $> 4.16 \sigma$

Signal reconstruit

1 : Signaux dans les détecteurs

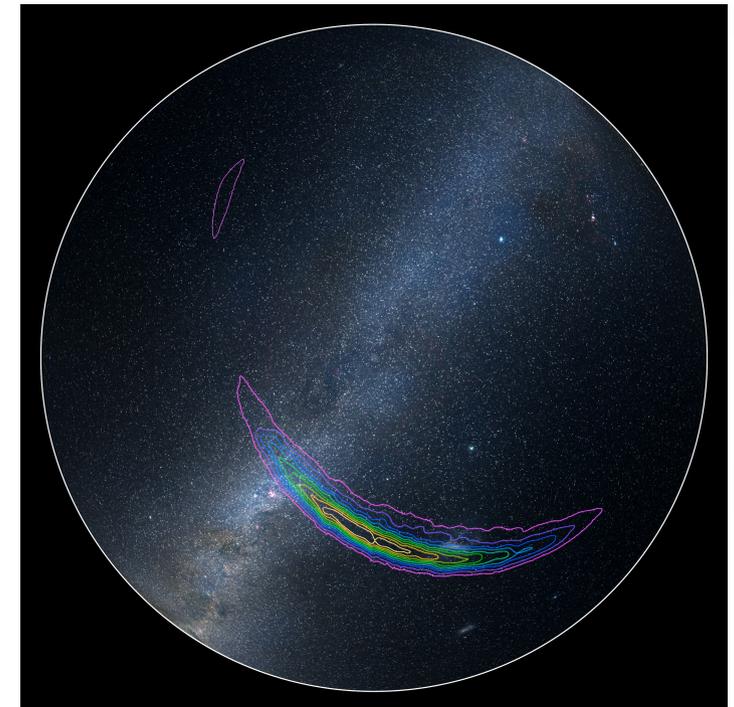
2 : Prédiction de RG

Résidus : 1 - 2

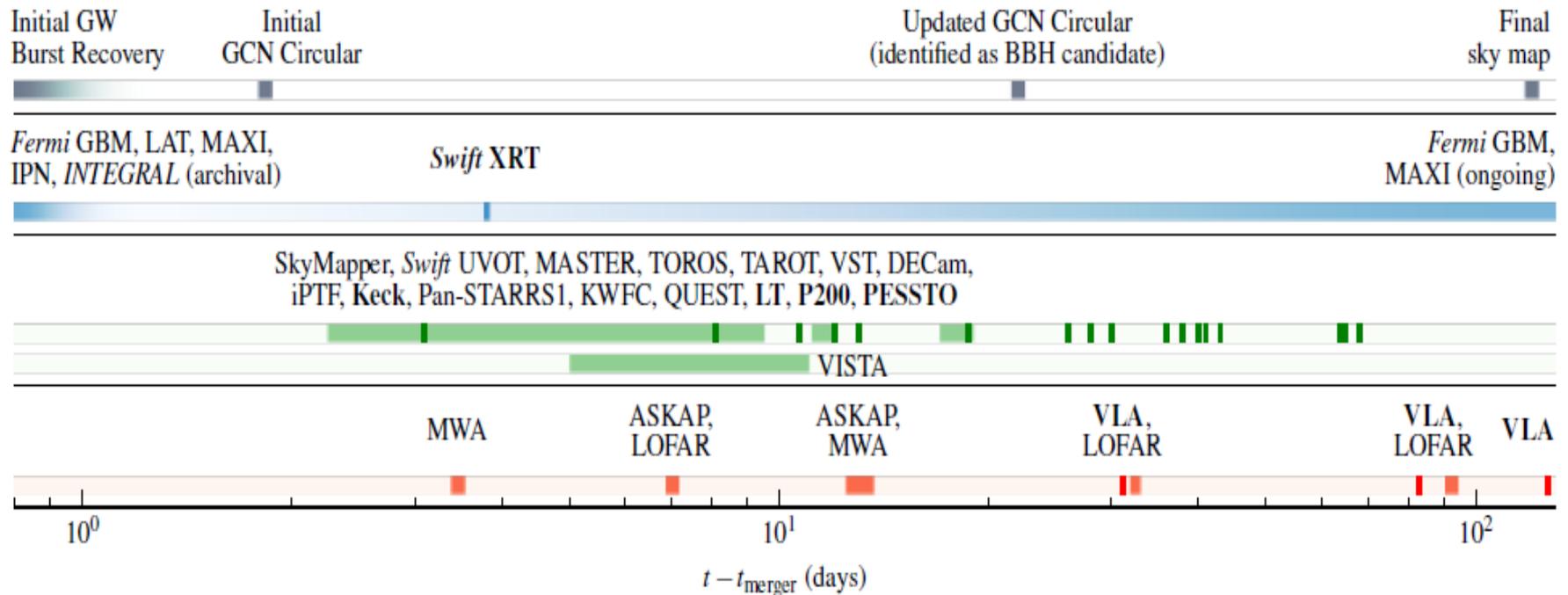


Que peut-on en dire ?

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	face-on/off		
resolved to	~600 sq. deg.		

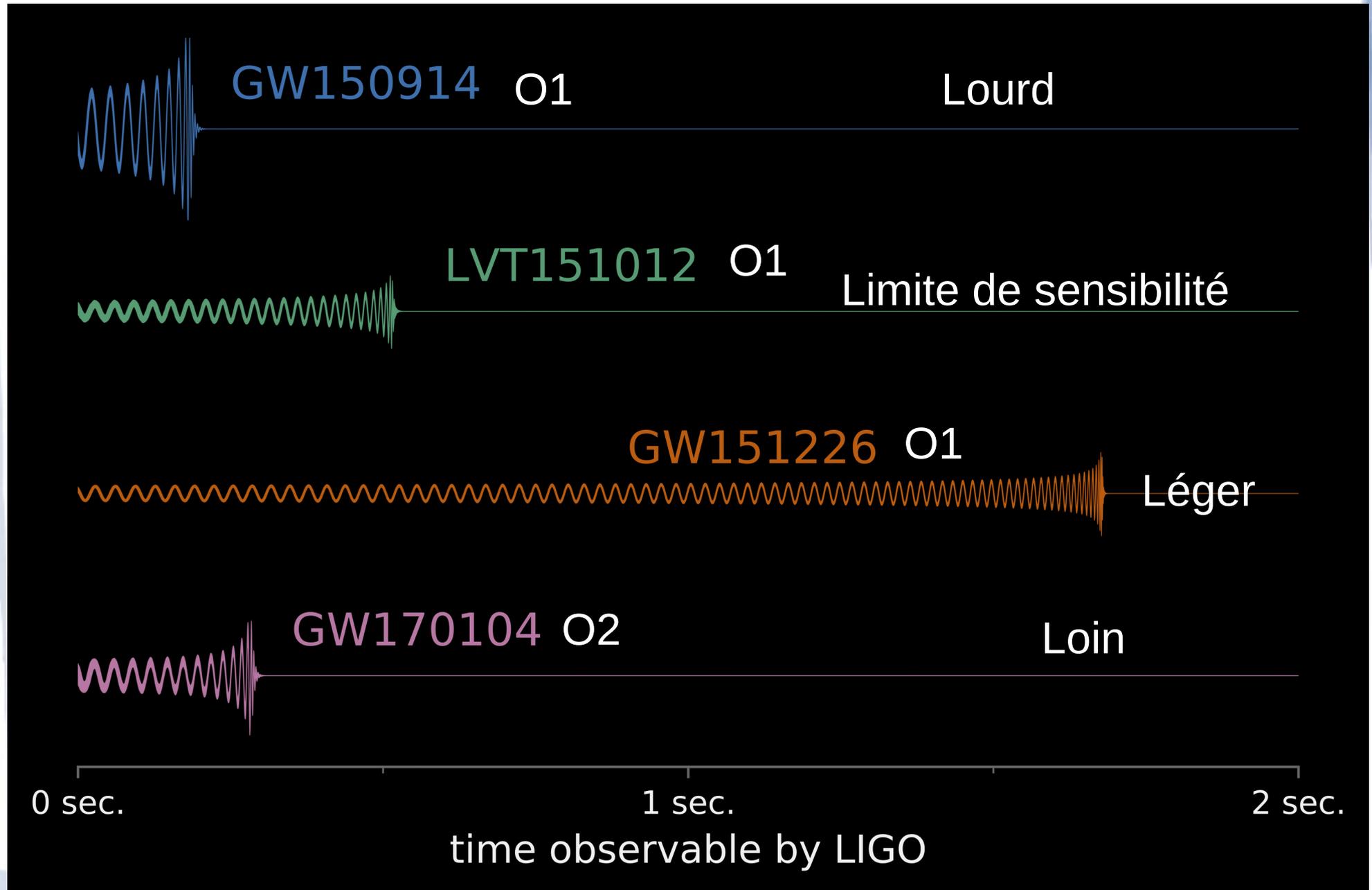


Suivi par des télescopes électromagnétiques



- 2 trous noirs : probabilité faible d'avoir une émission EM
- Pas de signaux clairement corrélés

Plusieurs détections effectuées

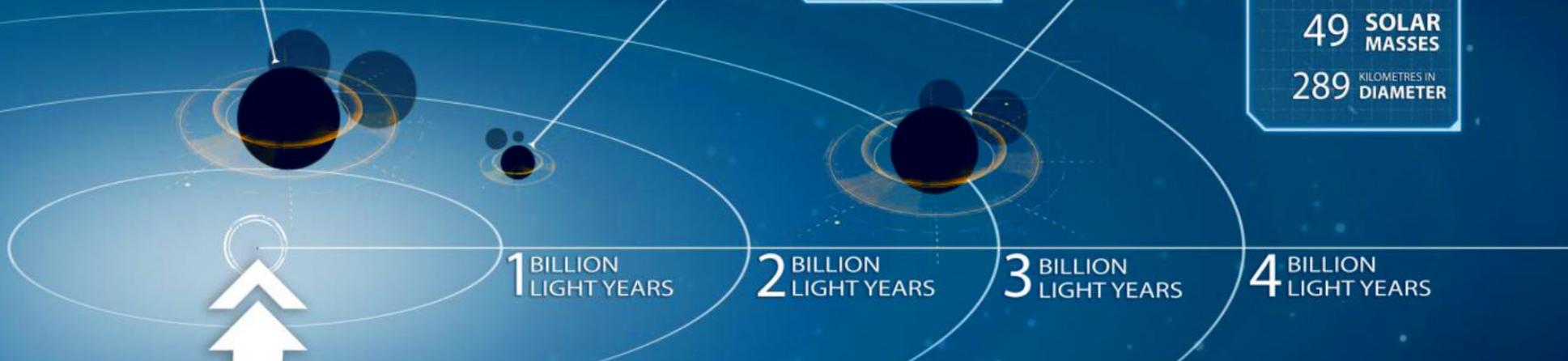


LIGO'S GRAVITATIONAL-WAVE DETECTIONS

GW150914
 DISCOVERED:
14.09.2015
1.3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY
62 SOLAR MASSES
366 KILOMETRES IN DIAMETER

GW151226
 DISCOVERED:
26.12.2015
1.4 BILLION LIGHT-YEARS AWAY
21 SOLAR MASSES
124 KILOMETRES IN DIAMETER

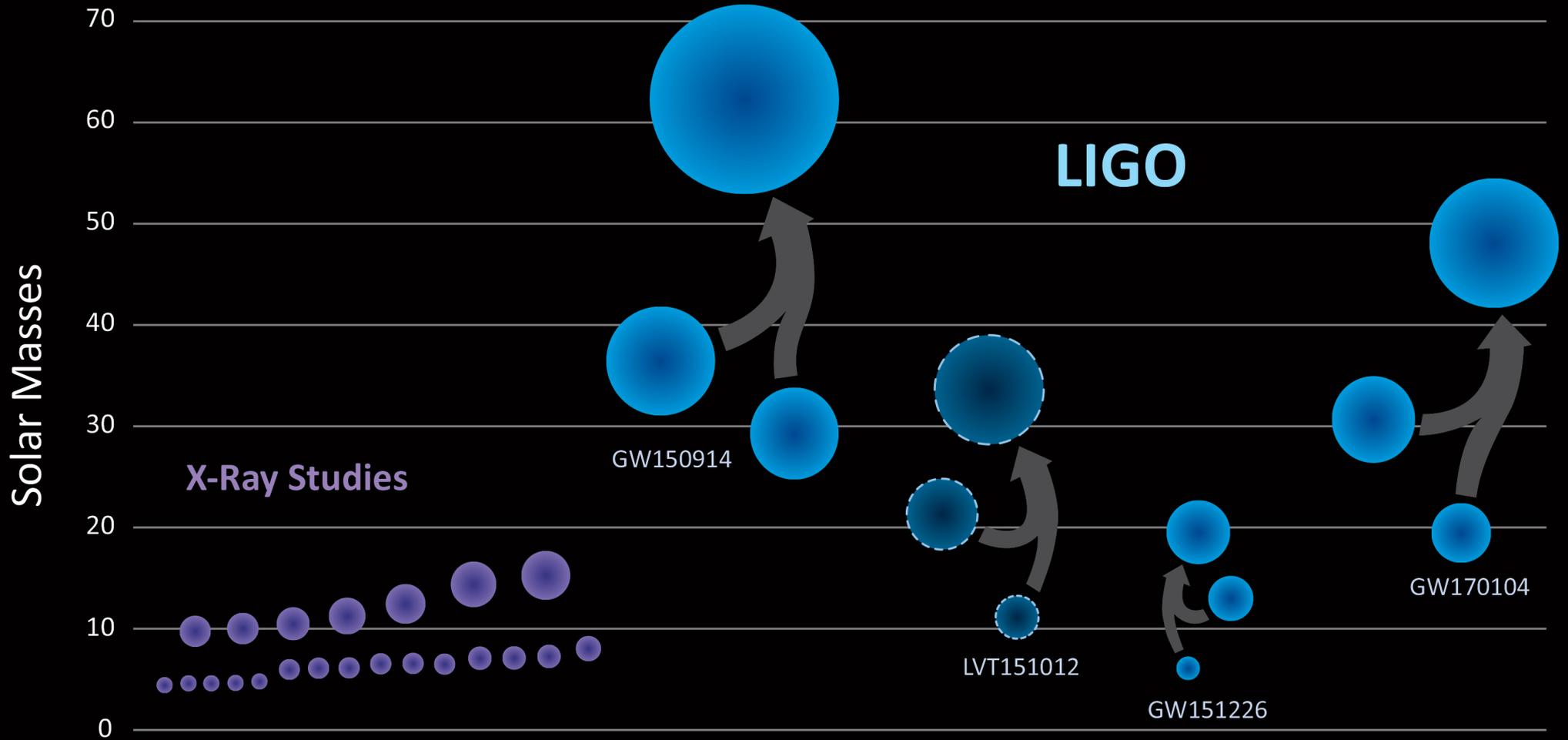
GW170104
 DISCOVERED:
04.01.2017
3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY
49 SOLAR MASSES
289 KILOMETRES IN DIAMETER



**YOU ARE
HERE**

DID YOU KNOW ?
 THE SOLAR MASS IS
 A STANDARD UNIT OF MASS
 IN ASTRONOMY
 IT IS EQUAL TO
 THE MASS OF THE SUN
 EQUAL TO APPROXIMATELY
 1.99×10^{30} KG

Black Holes of Known Mass

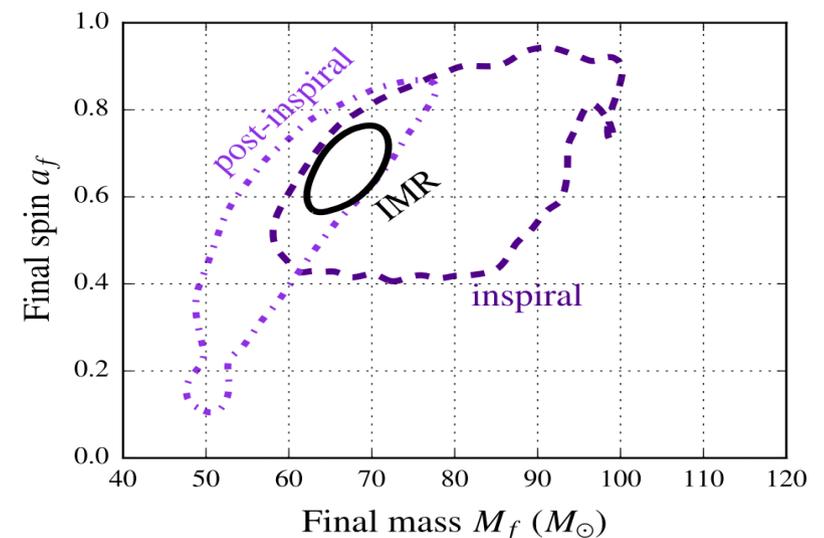


Impact en astrophysique

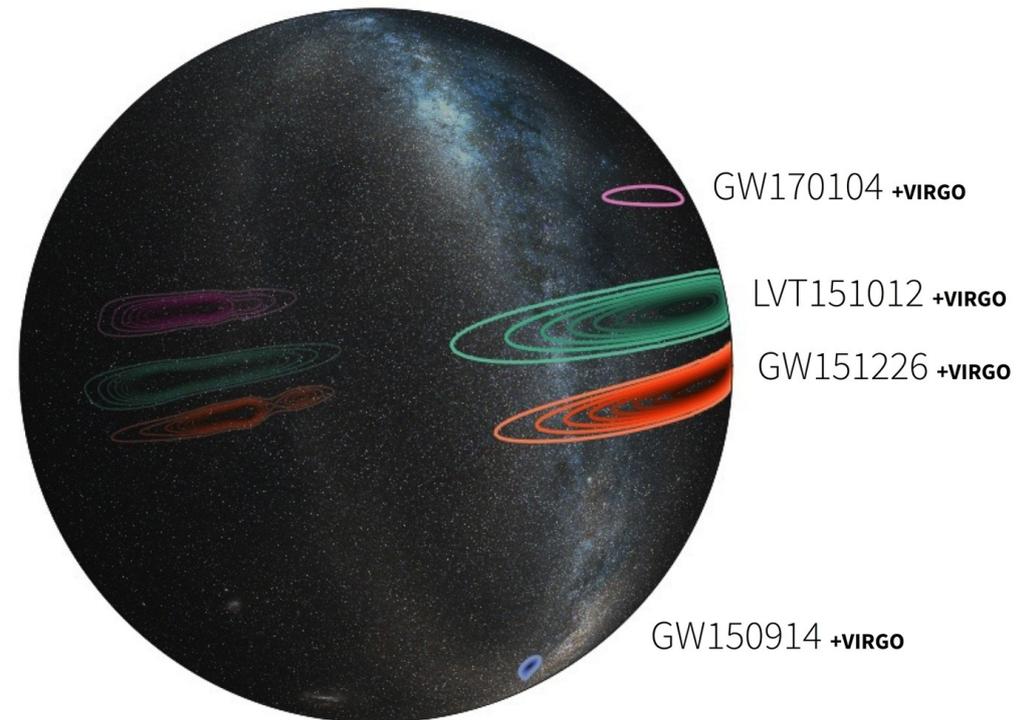
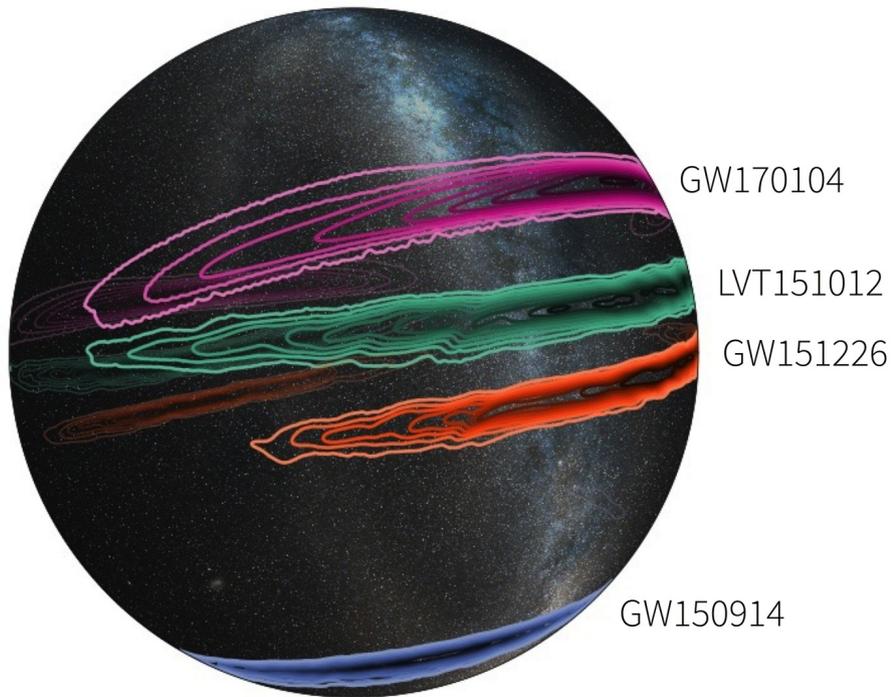
- Population plus lourde que celle observé en rayons X
- Populations d'objets qui n'était pas (vraiment) prévu par les modèles
- Mécanisme de formation est encore incertain :
 - Capture dans des environnements stellaires denses
 - Formation du système isolé
 - Taux d'occurrence → encore un ordre de grandeur d'incertitude
- Favorise des étoiles ayant peu d'éléments lourds

Tests de la Relativité Générale

- Pour la première fois nous observons un système dans un champ intense de gravitation et à des vitesses relativistes
- Quand on enlève la forme d'onde des données : résidus sont inférieurs à 4 %
- On peut aussi vérifier que les paramètres sont compatibles en utilisant la phase de coalescence et la phase de désexcitation

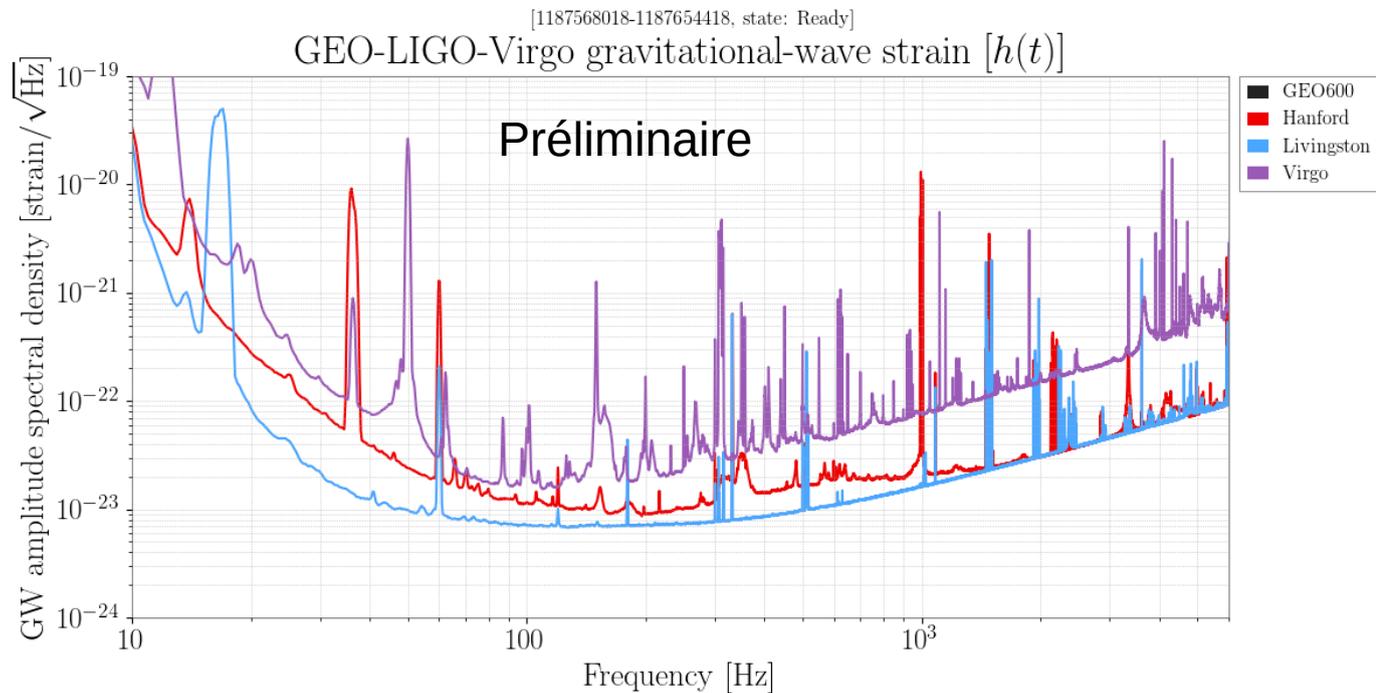


Ajoutons un troisième instrument



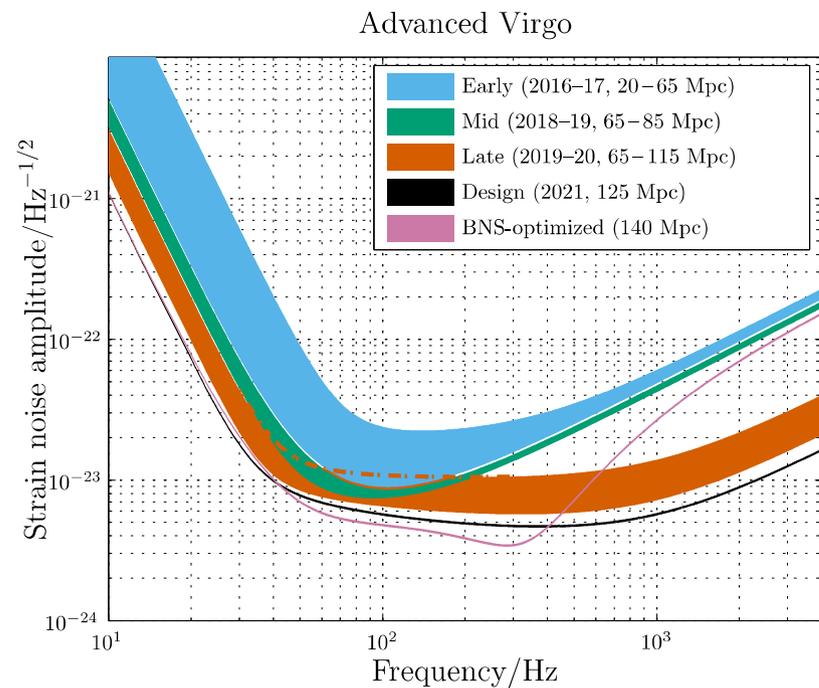
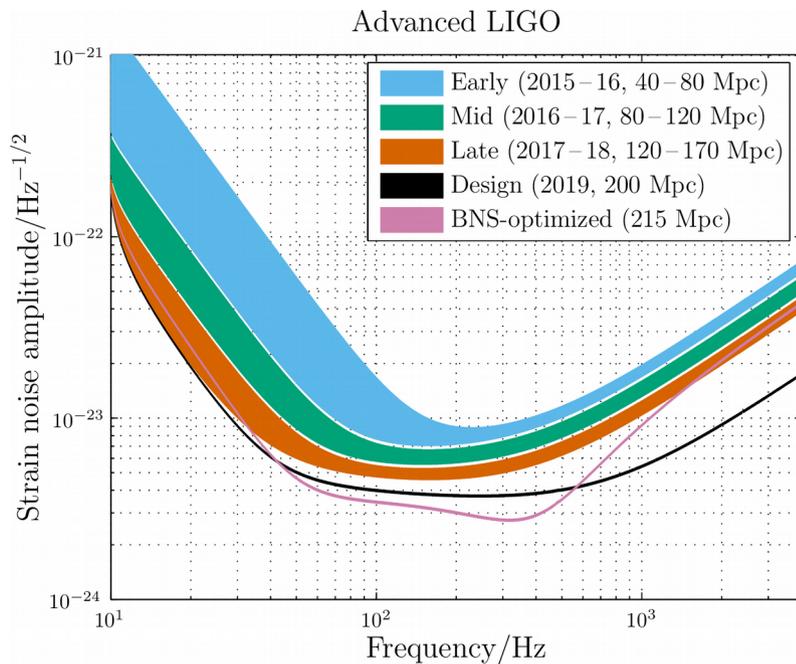
Prise de données O2

- Les deux interféromètres LIGO ont commencé à reprendre des données le 30 novembre 2016
- Virgo, après plusieurs mois de mise au point, a rejoint le réseau le 1 août 2017
- Nous venons de conclure la prise de données (25 août)



Comment cela va évoluer ?

- Nouvelles améliorations en cours d'installation sur les trois détecteurs
- Prochaine prise de données : fin 2018, début 2019 – pour un an



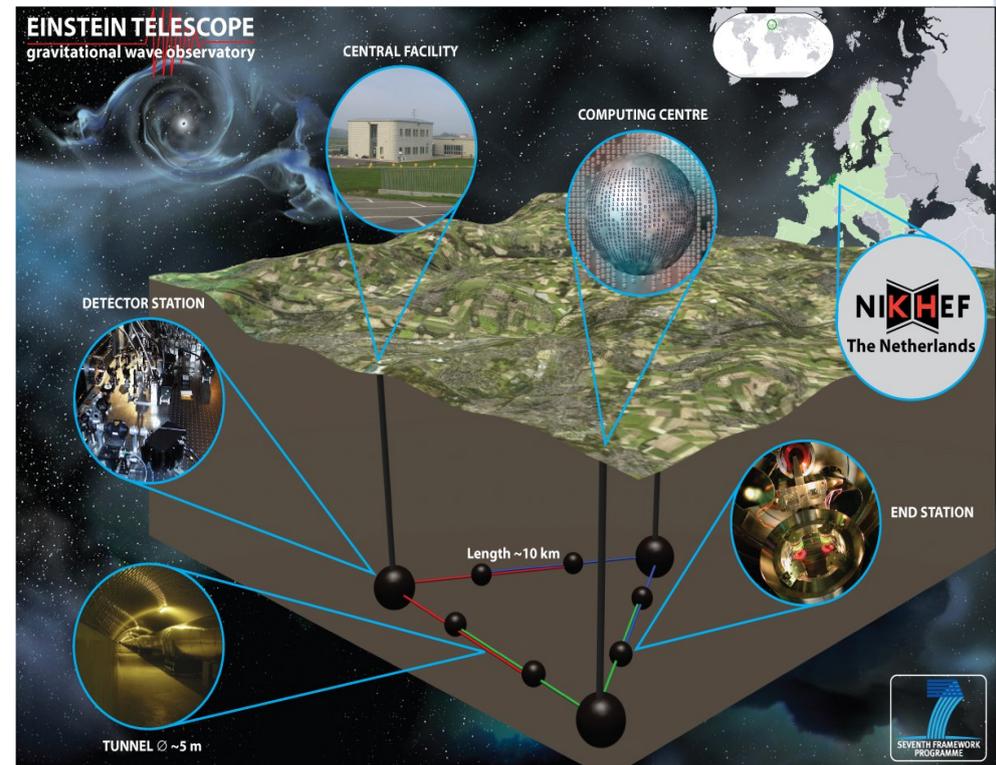
Si l'on regarde encore plus loin dans le temps

- La communauté commence à réfléchir à la génération suivante, projet le plus avancé : Einstein telescope – 2030 ?

Points forts :

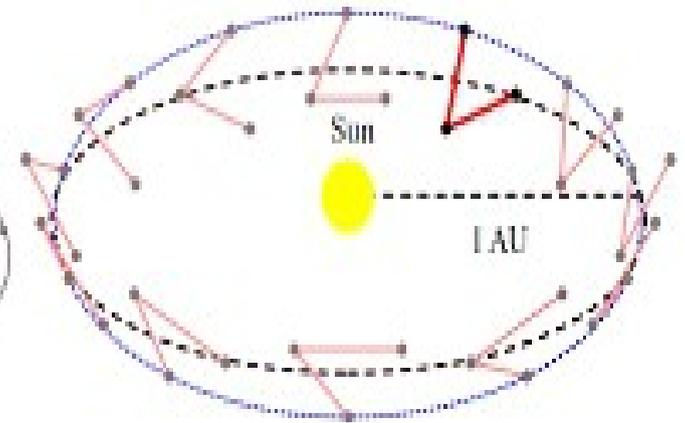
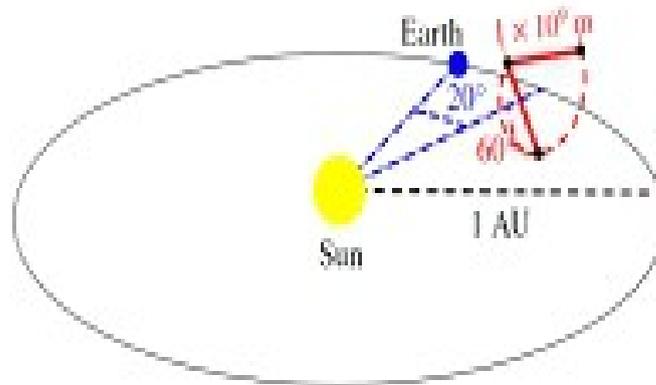
- Souterrain – moins de bruit sismique
- Cryogénique
- Bras de 10 km
- 3 instruments redondants
- Reconstruction de la position de la source

Gain d'un facteur 10 par rapport à la génération en cours de construction

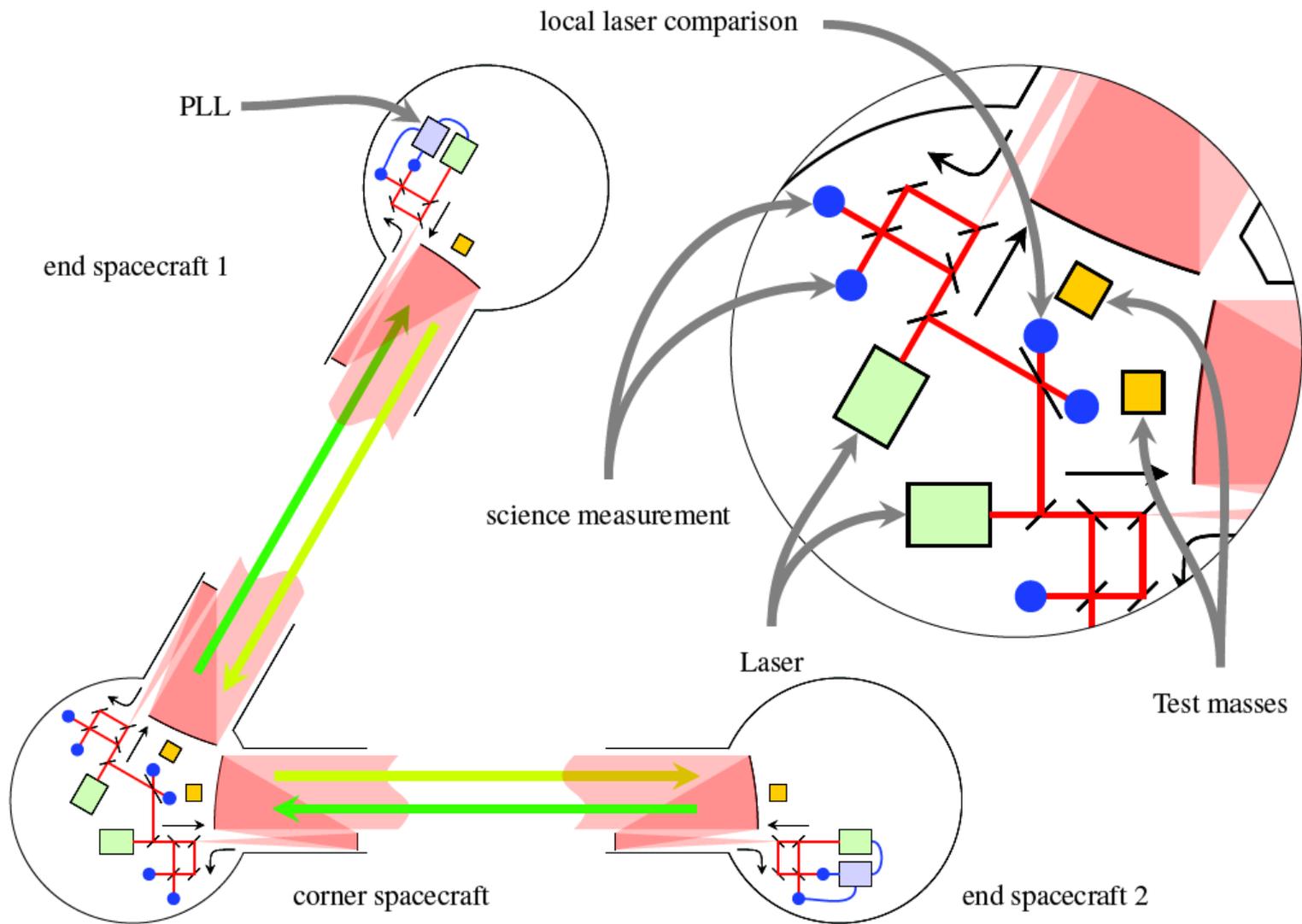


Changeons de taille ...

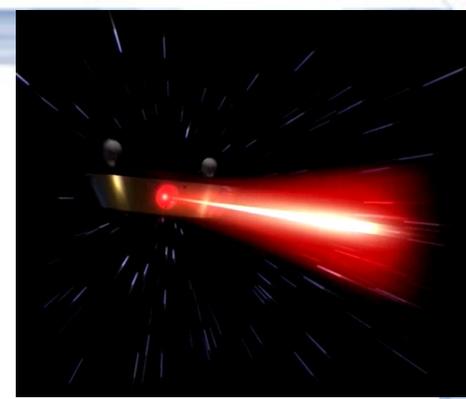
- Essayons-nous au spatial avec eLISA 2030-2034
- Objectif : observer les OG entre 10^{-4} et 0.1 Hz
 - Trous noirs supermassifs
 - Début de la coalescence des binaires galactiques
- Utiliser des bras de 1 **million** de km avec 3 satellites



Configuration optique



Le principe de base



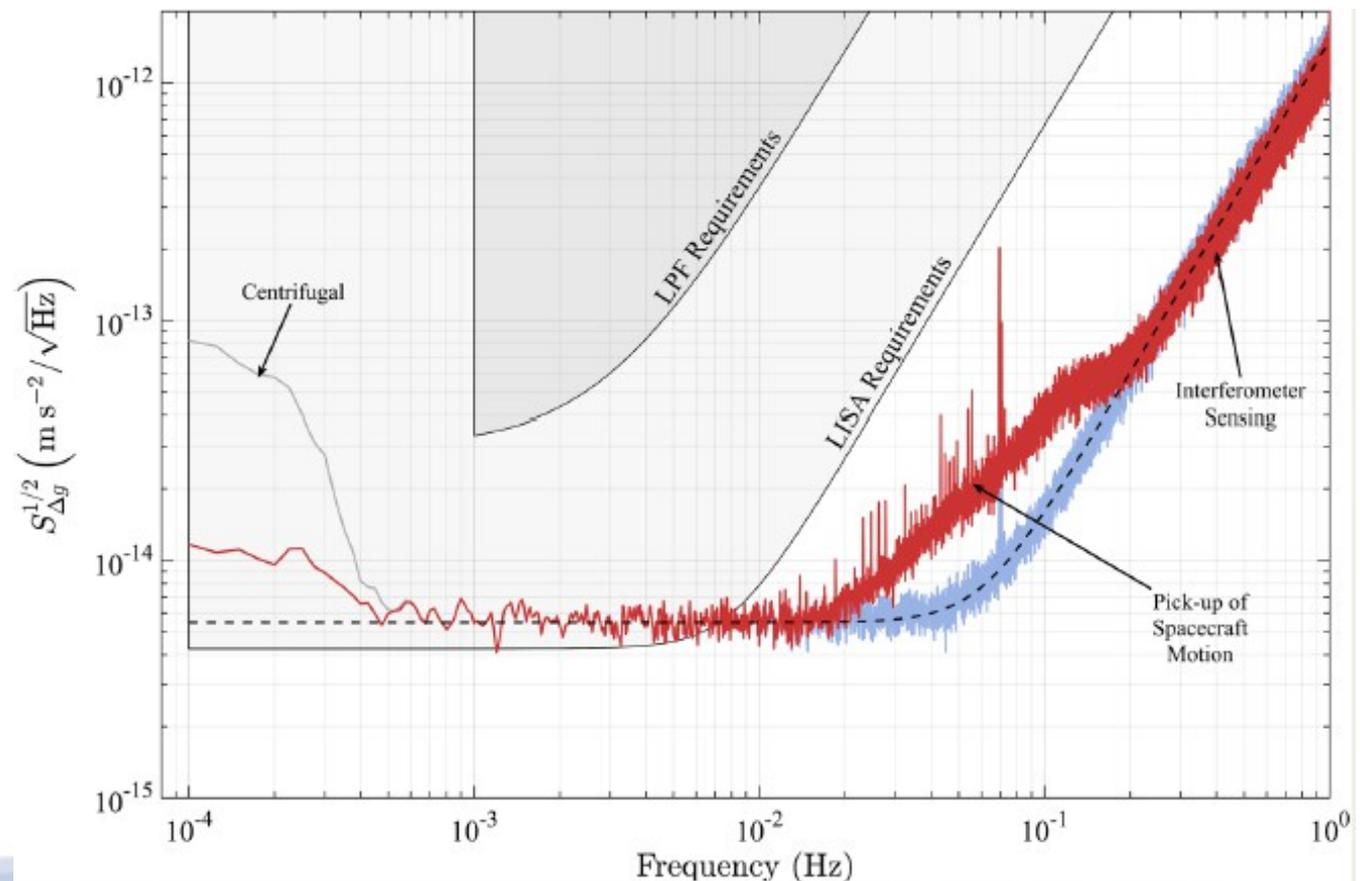
- Avoir entre 1 et 3 interféromètres
- Toutefois vu les distances et les puissances des lasers (1W)
 - On utilise un système de masse de référence pour la mesure de distance
 - 1 satellite récolte la lumière des 2 autres et renvoie un faisceau en phase (comme un miroir)
- Chaque satellite se comportera comme un point suivant une géodésique
 - Le satellite compensera en permanence ses mouvements (vent solaire, perturbations, ...) pour que la masse de référence soit toujours en chute libre

Les « quelques » problèmes à résoudre

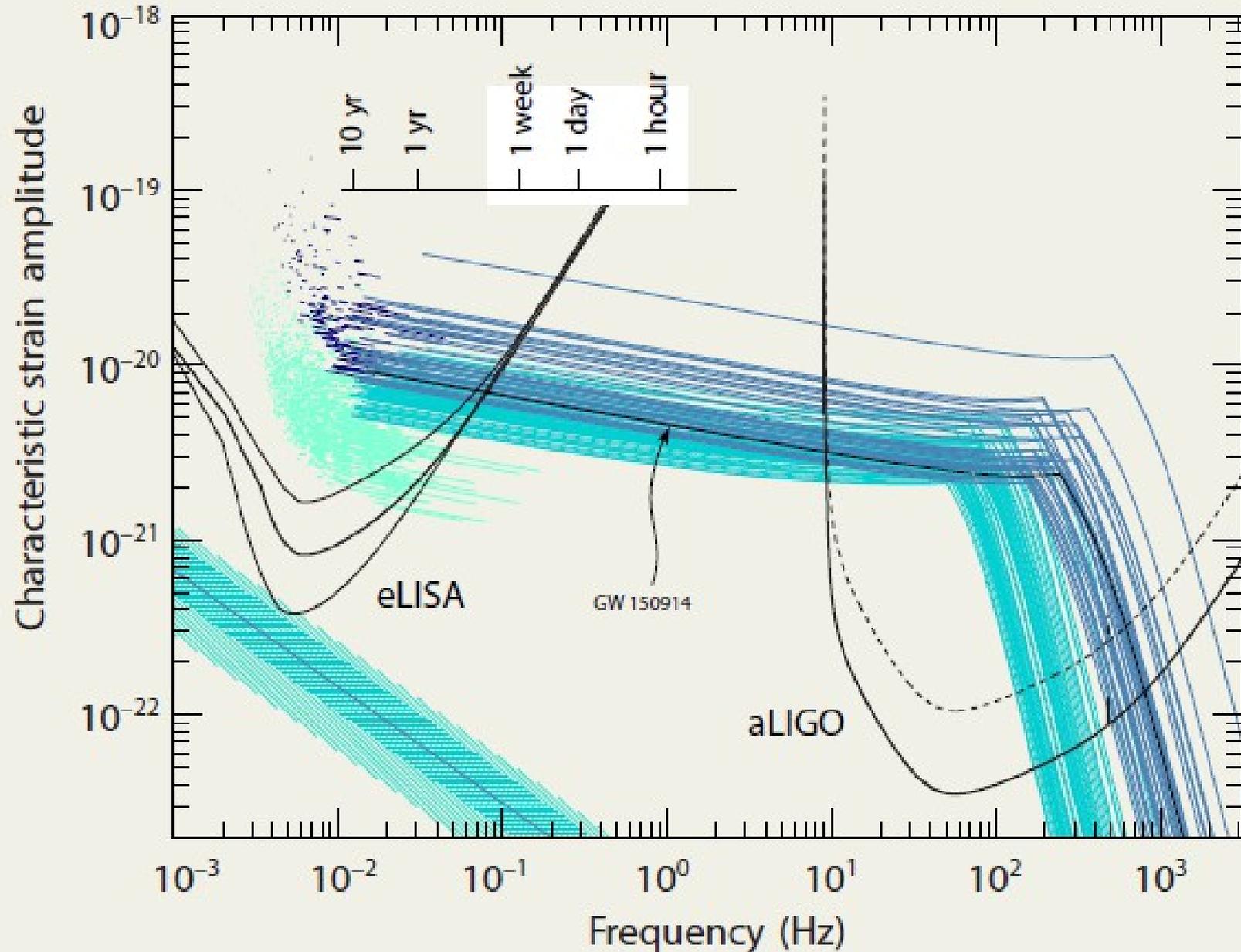
- Il faudra être capable de reconstruire avec précision la géométrie du système en permanence
- Chaque satellite va recevoir 10^{-12} W
 - Caractériser entièrement les faisceaux
 - Faire la mesure d'interférométrie
- S'assurer que l'on garde une masse de référence en chute libre
- eLISA sera limitée par des bruits instrumentaux mais aussi (et essentiellement) par des signaux provenant de sources non résolues

LISA Pathfinder

- Tester les technologies et montrer la faisabilité du projet
- Lancé en 2015 – résultats très encourageants !



Complémentarité LISA-LIGO/Viro



Principaux résultats

- Première détection d'événements astrophysiques via les ondes gravitationnelles
- Premières détections directes 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

La recherche des OG

La recherche des OG nous oblige à travailler à la croisée d'un grand nombre de domaines

Relativité générale

- objets relativistes et compacts
- gravitation en champ intense

Détecteurs

- distance kilométrique au sol
- vol en formation dans l'espace
- très haute précision de mesure nécessaire
- limites technologiques
- analyse des données non triviale : beaucoup de non stationnarité, espace des paramètres de recherche important



Un nouveau champ de recherches s'est ouvert !

Cosmologie

- avec la prochaine génération, accès à de grandes distances et estimation de paramètres pour les modèles
- accès aux tous premiers instants après le big bang ?

Astrophysique

- première détection de trous noirs !
- impact important dans différents domaines : matière des étoiles à neutrons, origines des sursauts gamma
- accès à des régions uniques des objets compacts

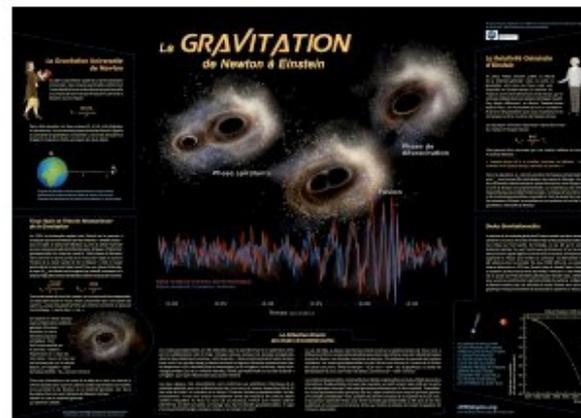
Quelques ressources intéressantes

- Site Virgo – ressources pédagogiques : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques/>
- Email générique : outreach@ego-gw.it

RESSOURCES PÉDAGOGIQUES

Home / Ressources pédagogiques

- Septembre 2016 : Des ressources pour les enseignants du secondaire et leurs élèves, en partenariat avec le CNRS/IN2P3 et le dispositif d'initiative ministérielle « Sciences à l'École ».
- Novembre 2016 : Conférence pour les professeurs de physique au congrès de l'UdPPC
- Janvier 2017 : vidéo « Les miroirs les plus parfait du monde »
- Février 2017 : traduction en français d'un poster CPEP sur la gravitation et la découverte des ondes gravitationnelles.
 - Poster sur fond blanc :
 - Autre format disponible : pdf
 - Poster sur fond noir :



Merci de votre attention



Main parameters

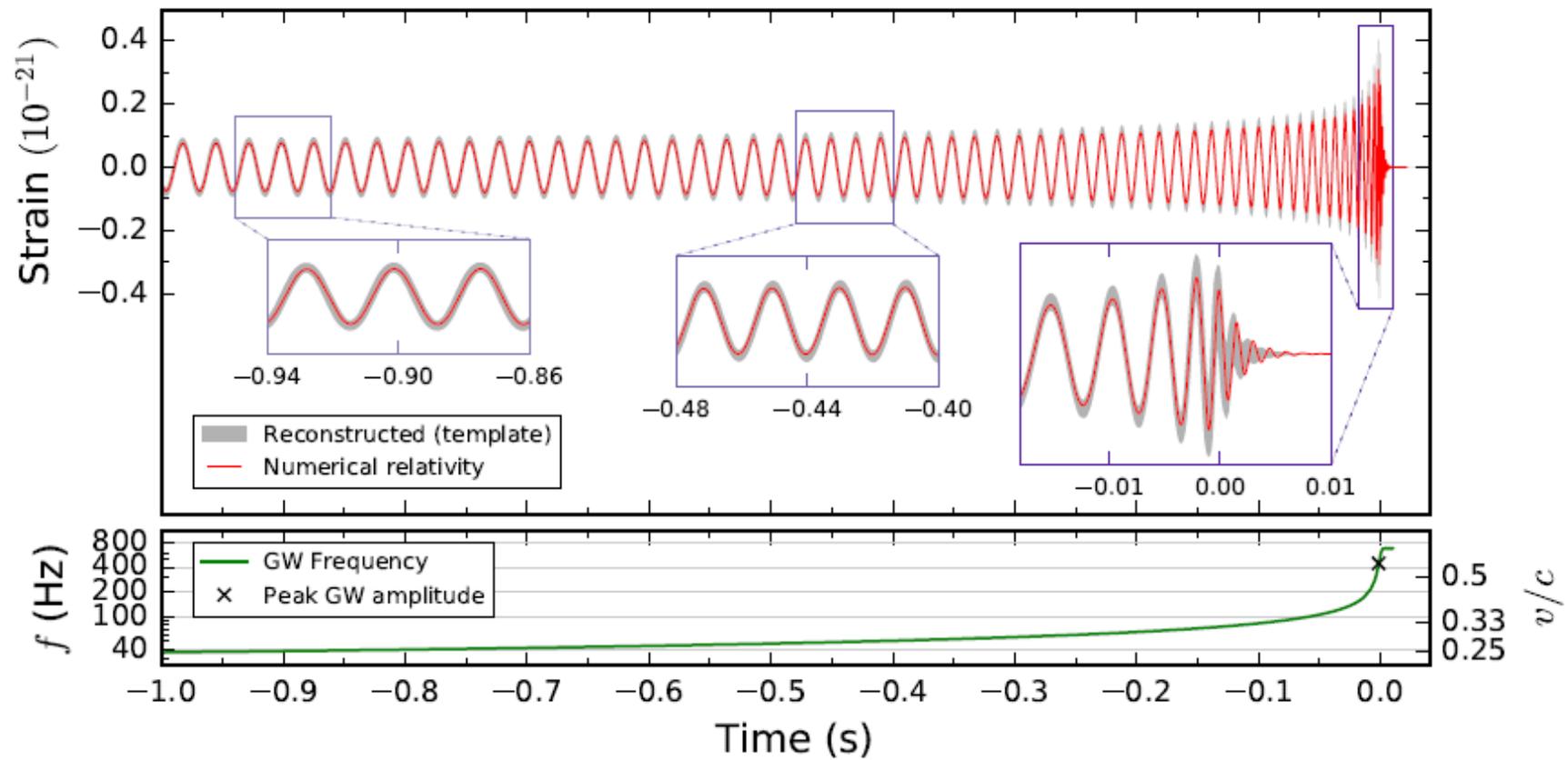
Abbott et al, PRX 6 041015

Abbott *et al.* PRL 118, 221101

Event	GW150914	GW151226	GW170104
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$31.2^{+8.4}_{-6.0}M_\odot$
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$19.4^{+5.3}_{-5.9}M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$21.1^{+2.4}_{-2.7}M_\odot$
Total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	$50.7^{+5.9}_{-5.0}M_\odot$
Effective inspiral spin χ_{eff}	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$-0.12^{+0.21}_{-0.30}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	$48.7^{+5.7}_{-4.6}M_\odot$
Final spin a_f	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.64^{+0.09}_{-0.20}$

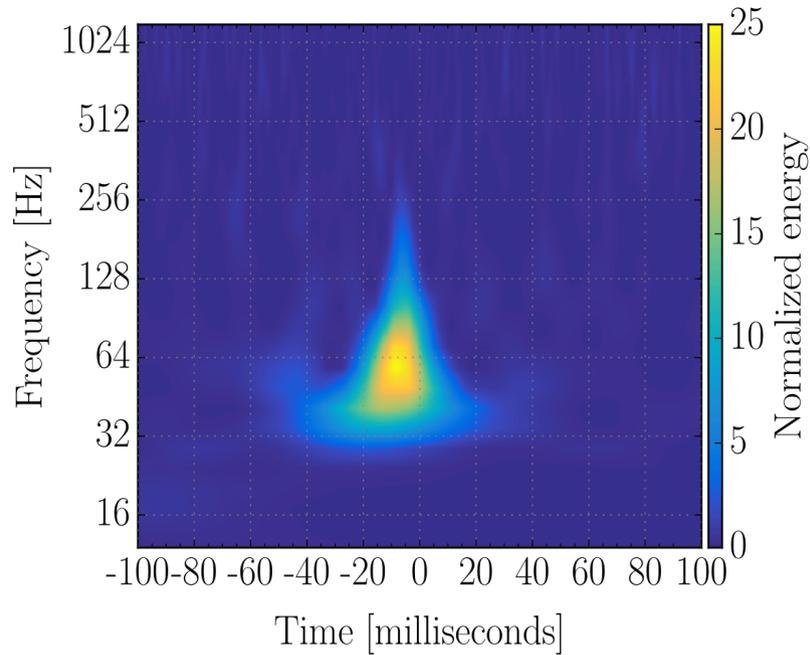
Event	GW150914	GW151226	GW170104
Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$2.0^{+0.6}_{-0.7}M_\odot c^2$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.7}_{-1.3} \times 10^{56}$
Luminosity distance D_L/Mpc	420^{+150}_{-180}	440^{+180}_{-190}	880^{+450}_{-390}
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.18^{+0.08}_{-0.07}$

- GW150914 is compatible with a coalescence of 2 black holes with similar mass, more asymmetries for the others
- GW150914 : $3 M_\odot$ in energy were radiated through GW emission – highest luminosity ever observed
- Final object is compatible with a Kerr black hole

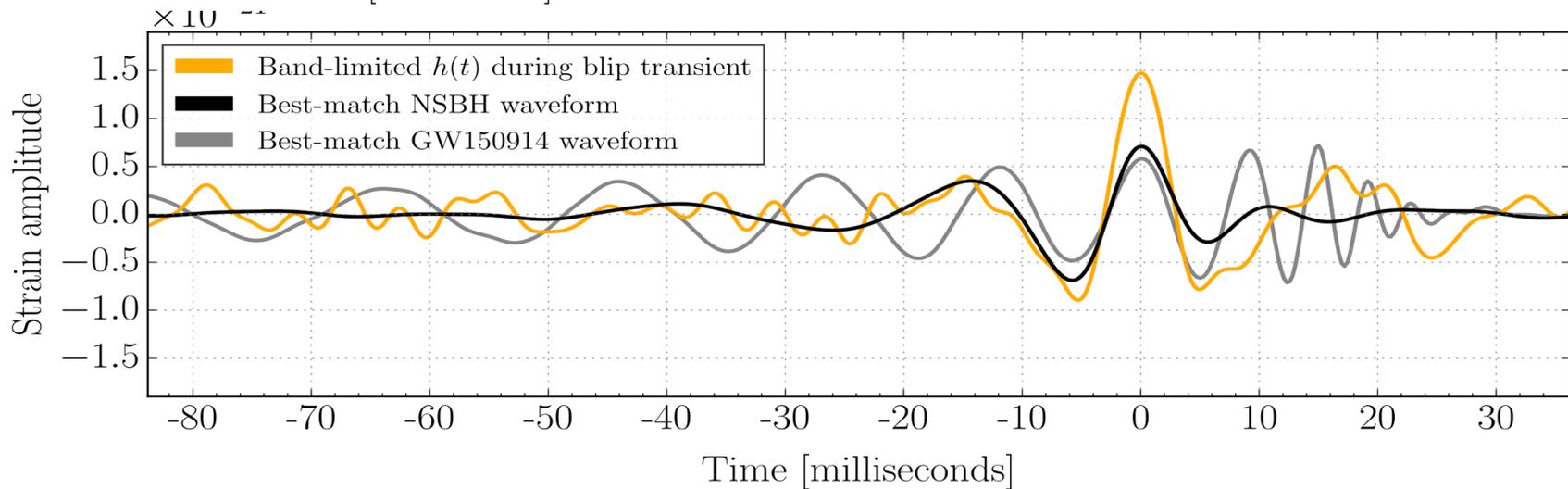
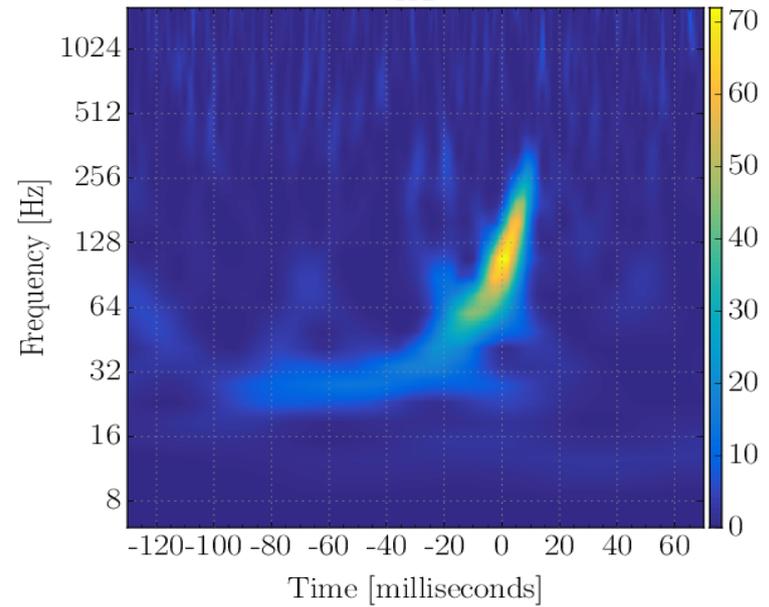


Artefact ?

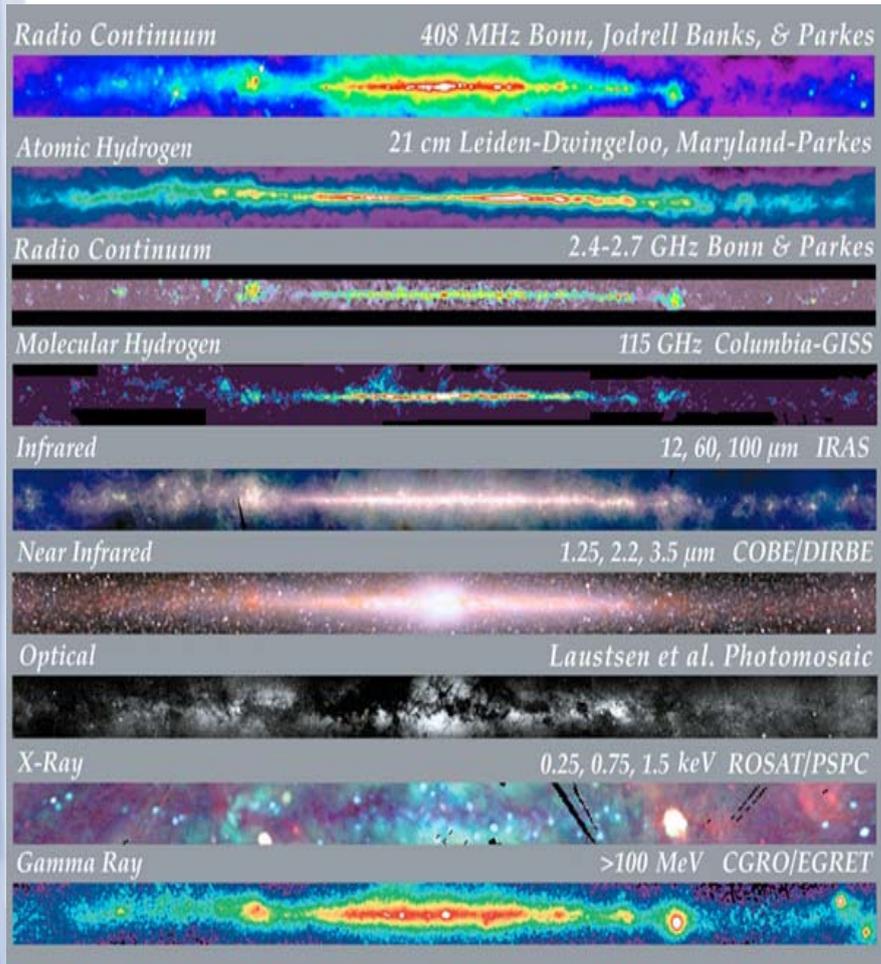
Pb instru dans L1



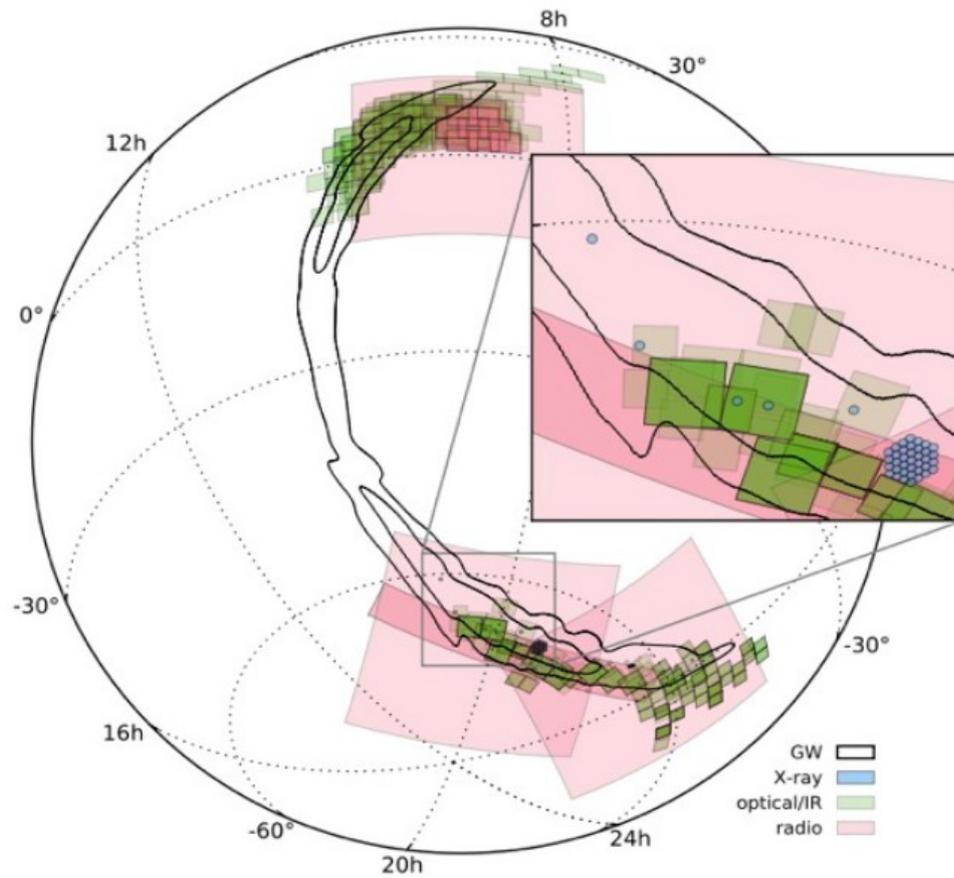
Signal dans H1



Comment a-t-on des informations sur l'Univers ?



- Ce qui nous tombe dessus
- En allant sur place
- En regardant la lumière sur l'ensemble du spectre électromagnétique
 - Régions très denses restent inaccessibles
- Idée : utiliser d'autres messagers:
 - Neutrinos
 - Ondes gravitationnelles



cWB sky map

γ / X-ray observations

Optical observations

Radio Observations

GW 

X-ray 

optical/IR 

radio 