

Détecter les ondes gravitationnelles

La prouesse expérimentale dont Einstein n'avait même pas rêvé

Frédérique Marion

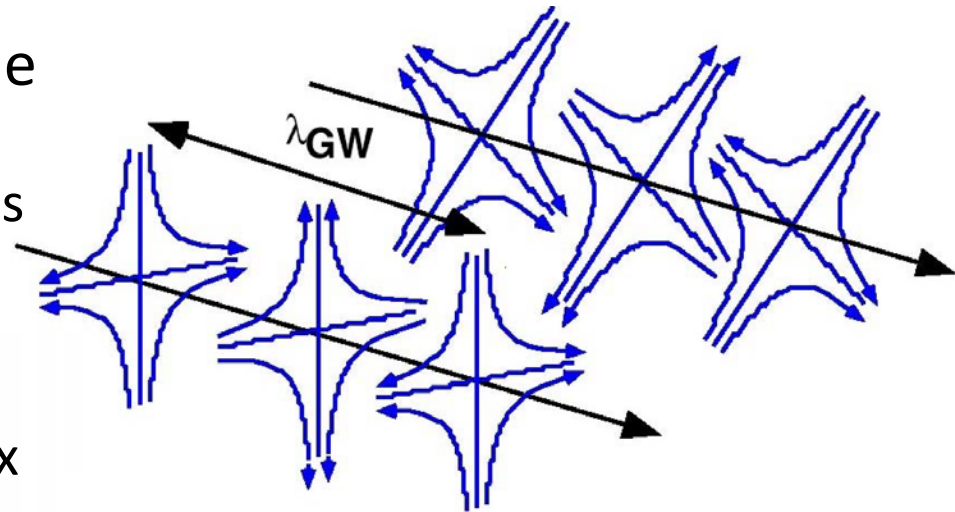


24^e CONGRÈS
GÉNÉRAL de la
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DE PHYSIQUE 



Ondes gravitationnelles

- ❑ Prédiction de la **Relativité Générale** (Einstein, 1916)
- ❑ Perturbations de la métrique de l'espace-temps
 - Engendrées par des accélérations de masses
 - Se propagent à la vitesse de la lumière
 - Transverses, quadripolaires, deux polarisations orthogonales
- ❑ **Luminosité** d'une source



$$\frac{c^5}{G} \epsilon^2 \left(\frac{R_S}{R} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6$$

source asymétrique source compacte source relativiste

➔ Sources **astrophysiques**

Enjeux scientifiques

Gravitation

Sources

Univers

- ❑ Les ondes gravitationnelles témoignent des **phénomènes les plus violents** de l'Univers
 - Sondent directement la **dynamique** des événements
- ❑ Les ondes gravitationnelles permettent de **sonder la gravitation** dans un **régime inédit**
 - Gravitation au cœur des grandes énigmes de la physique contemporaine

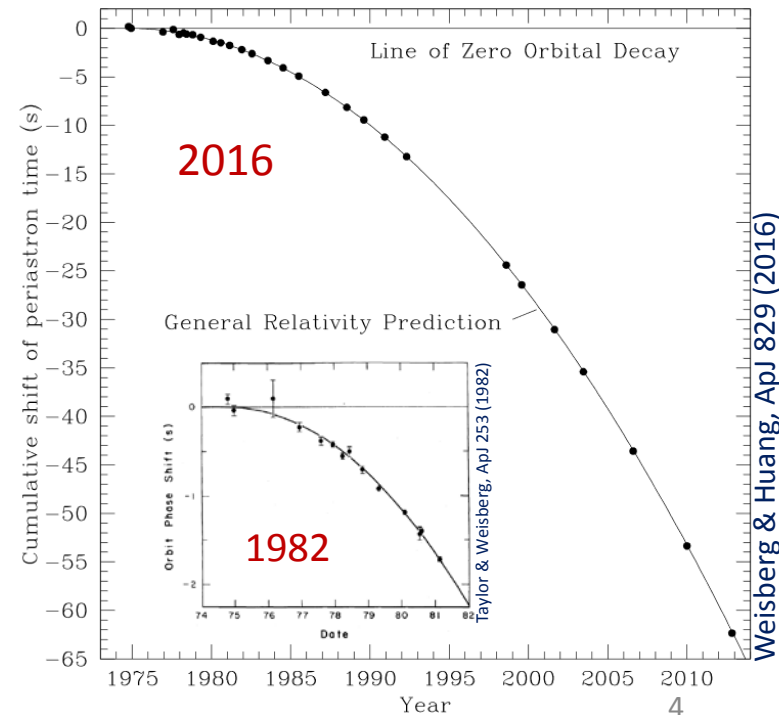
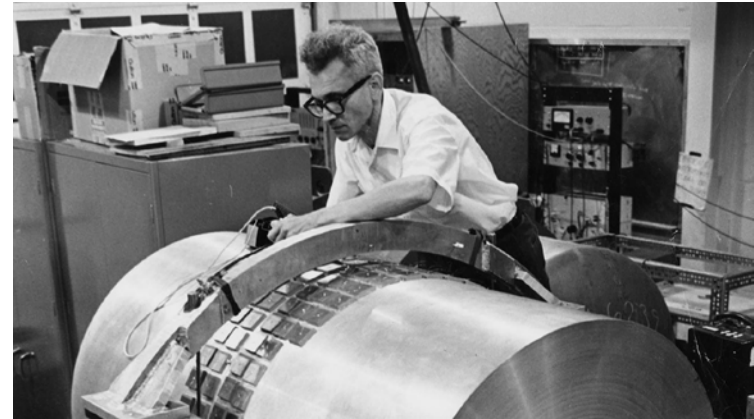
Relativité
Générale

Astrophysique

Cosmologie

Les débuts de l'histoire

- ❑ Années 1960
 - Conception et construction des premiers détecteurs résonnants (J. Weber)
 - « Découverte » annoncée en 1969
- ❑ Années 1970
 - Essor des « barres »
 - Etude théorique des sources
 - Recherche de méthodes de détection alternatives
 - Première étude détaillée d'un détecteur interférométrique réaliste (R. Weiss, 1972)
 - Premiers prototypes
- ❑ Années 1980
 - Les ondes gravitationnelles existent !
 - Décroissance orbitale de PSR 1913+16
 - Conception des grands interféromètres
 - LIGO (US) – R. Drever, K. Thorne, R. Weiss
 - Virgo (France-Italie) – A. Brillet, A. Giazotto
- ❑ Années 1990
 - Les agences de financement font le pari
 - Construction d'instruments de 1^{ère} génération
 - Destinés à évoluer



Interféromètres terrestres

□ 1^{ère} génération de détecteurs

- LIGO, Virgo, GEO600



- Enhanced LIGO, Virgo+



□ 2^{ème} génération

- Advanced LIGO, Advanced Virgo, GEO-HF, KAGRA



□ 3^{ème} génération

- Einstein Telescope, Cosmic Explorer

Sensibilité insuffisante pour une détection

Premières périodes d'observation
Premières limites supérieures
Fonctionnement en réseau

Sensibilité en progrès

Débuts de l'astronomie multi-messager

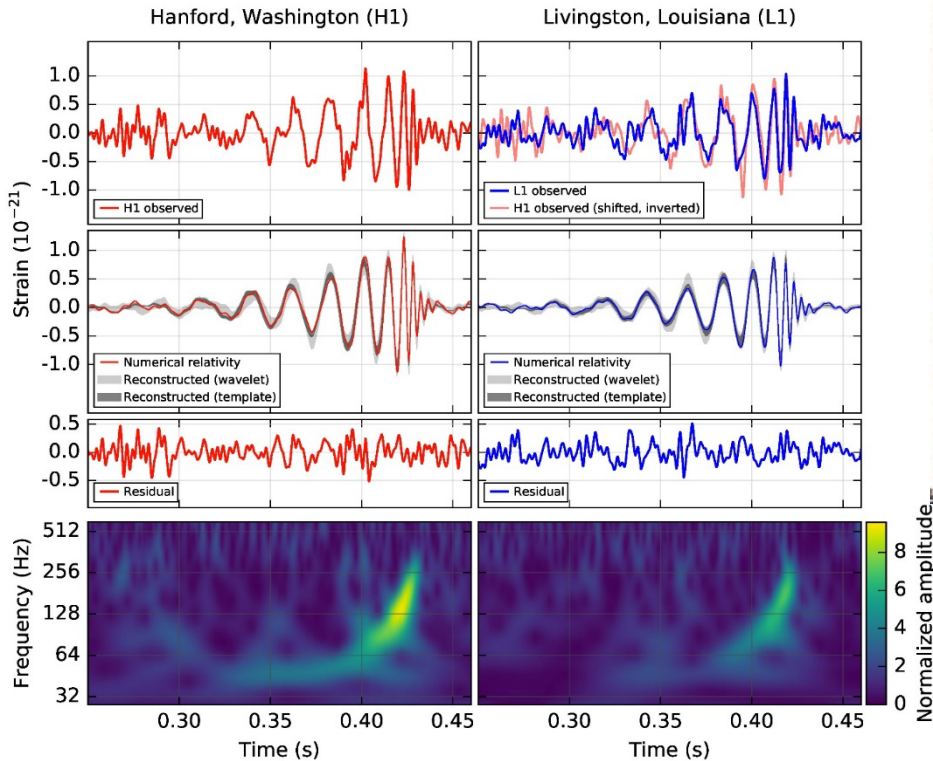
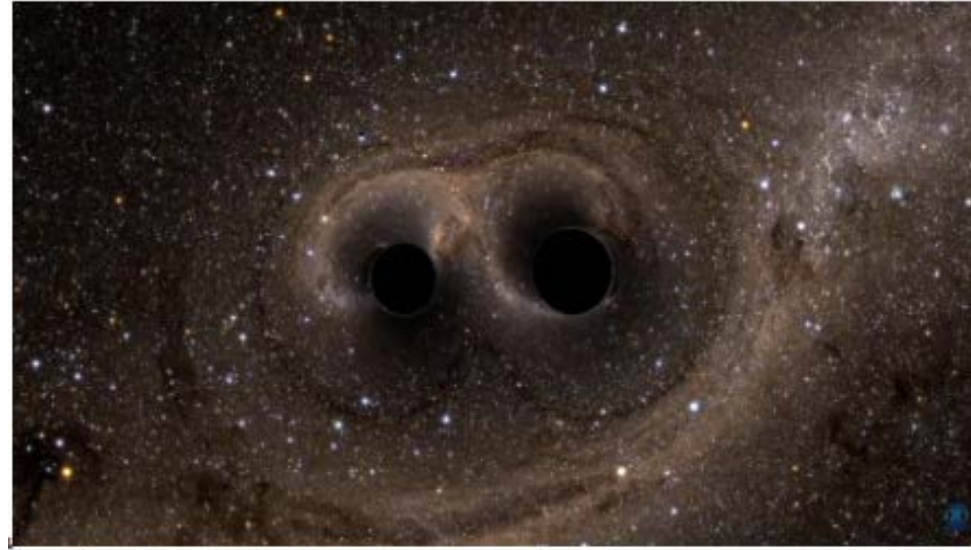


Premières détections

Essor de l'astronomie des OG

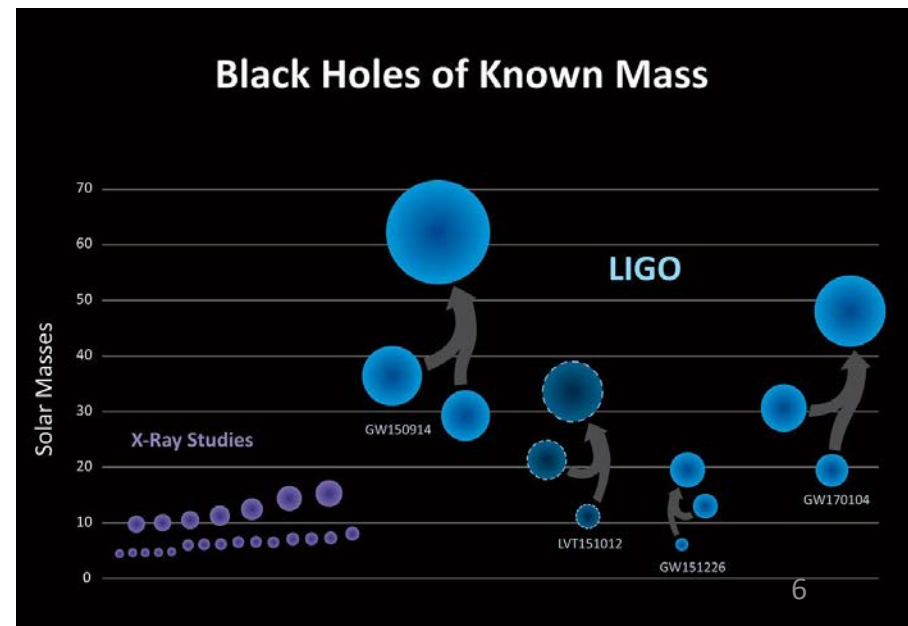
Sonder l'Univers en profondeur avec les OG

Premières détections



GW150914

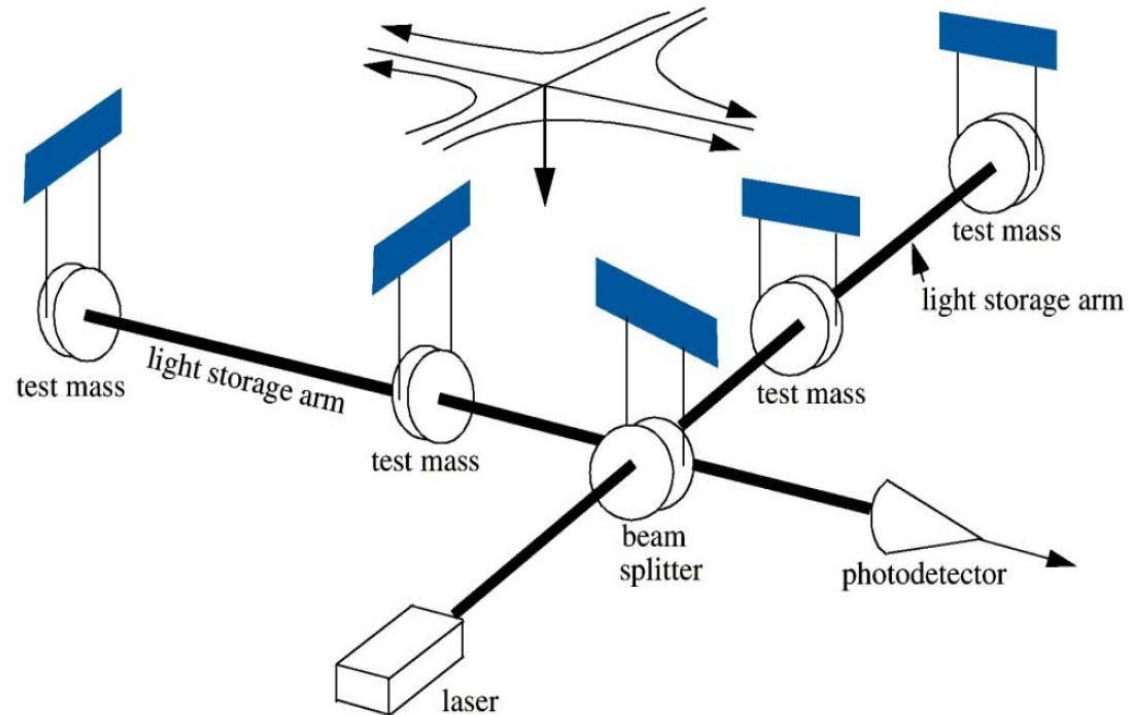
- Energie radiée $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$
- Luminosité au pic $200^{+30}_{-20} M_{\odot} c^2 / s$
- Au pic $h \sim 10^{-21} \delta L_{4km} \sim 4 \cdot 10^{-18} m$



Détecteurs interférométriques

- Miroirs suspendus \equiv masses en chute libre dans le plan horizontal, pour $f \gg f_{\text{pendule}}$
- Envergure de plusieurs kilomètres nécessaire
 - $h \sim 10^{-22} - 10^{-21}$
 - ➔ $\delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$
- Détecteurs large bande
 - 10 Hz – 10 kHz sur Terre

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



Configuration standard

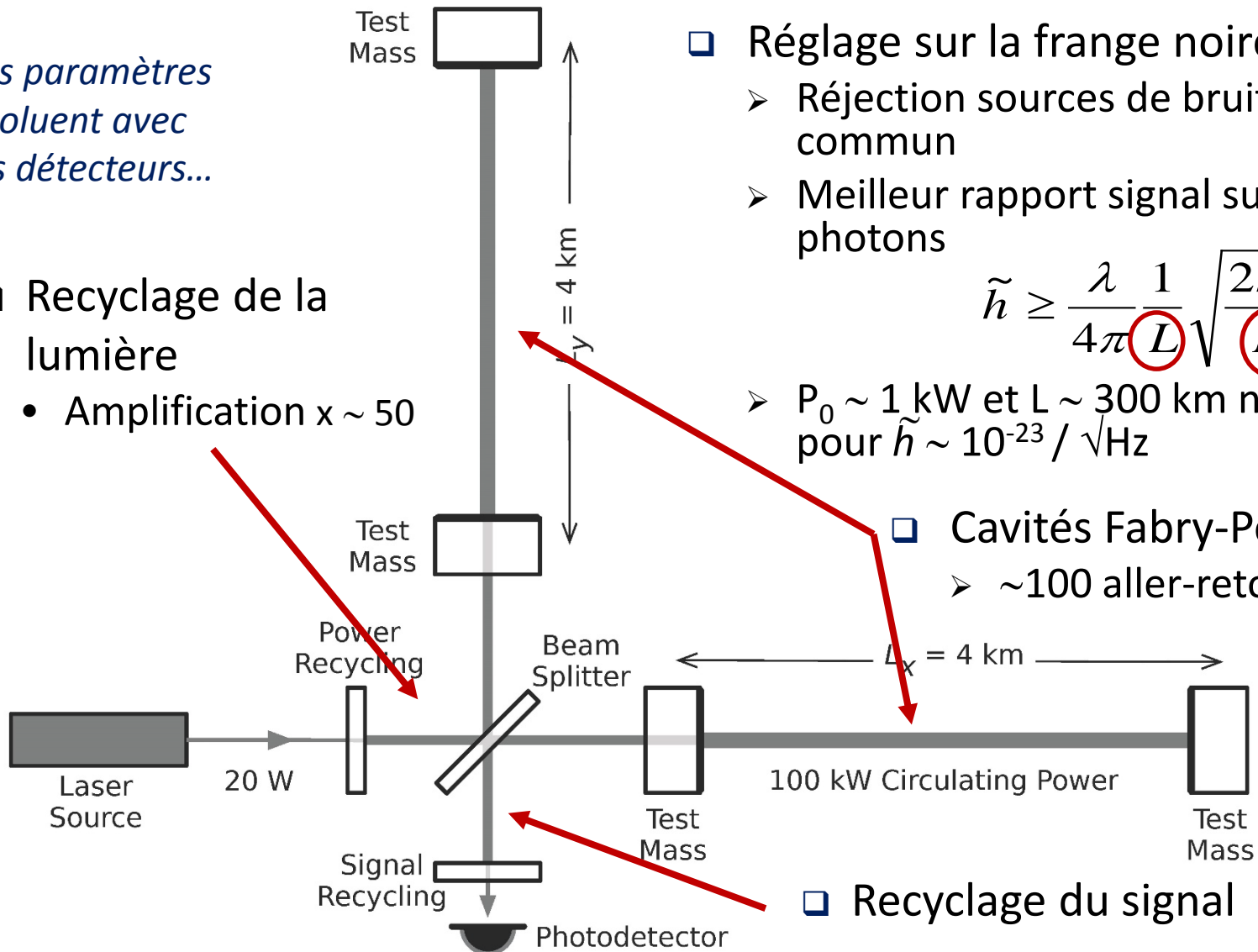
Les paramètres évoluent avec les détecteurs...

- Recyclage de la lumière
 - Amplification $x \sim 50$

- Réglage sur la frange noire
 - Réjection sources de bruit du mode commun
 - Meilleur rapport signal sur bruit de photons

$$\tilde{h} \geq \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2h\nu}{P_0}}$$

- $P_0 \sim 1 \text{ kW}$ et $L \sim 300 \text{ km}$ nécessaires pour $\tilde{h} \sim 10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}}$



- Cavités Fabry-Perot
 - ~ 100 aller-retour

- Recyclage du signal

Les détecteurs actuels

LIGO Hanford, 4 km (USA)



LIGO Livingston, 4 km (USA)



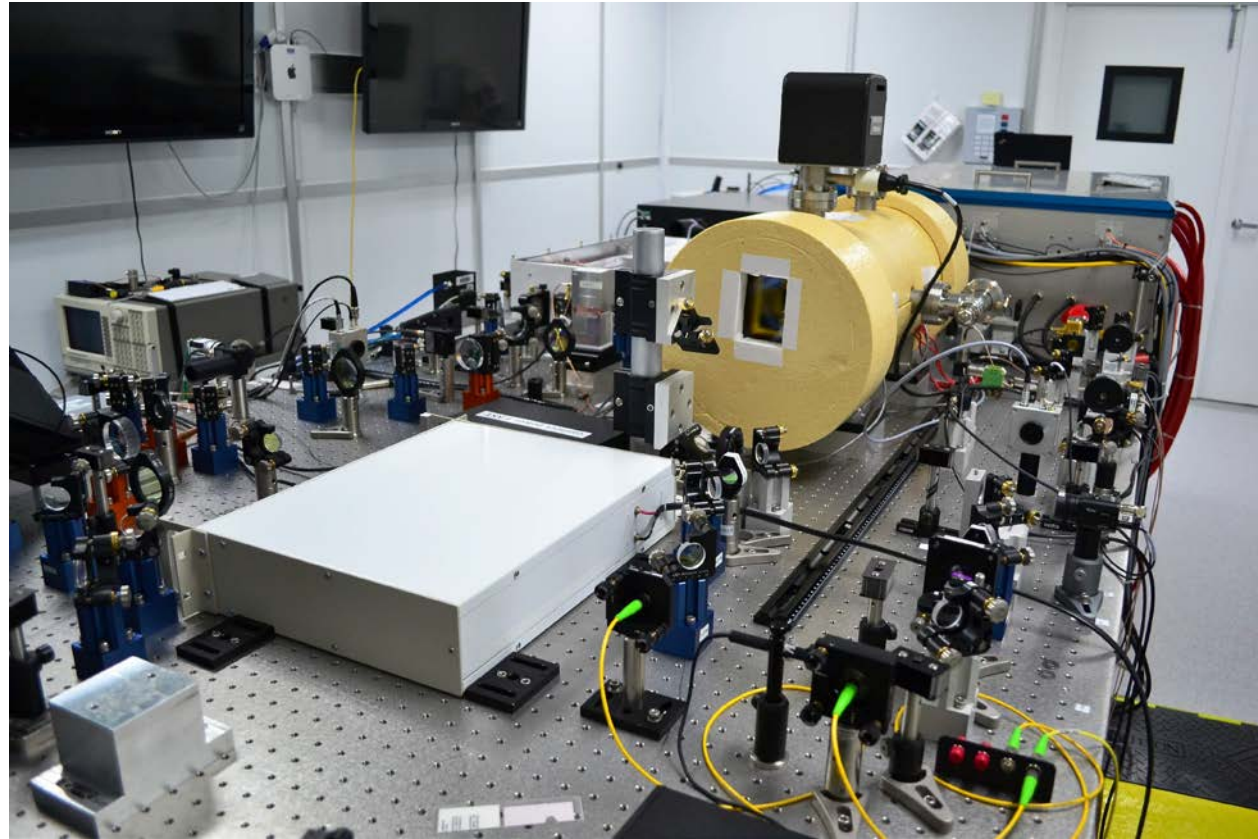
Virgo, 3 km (Italie)



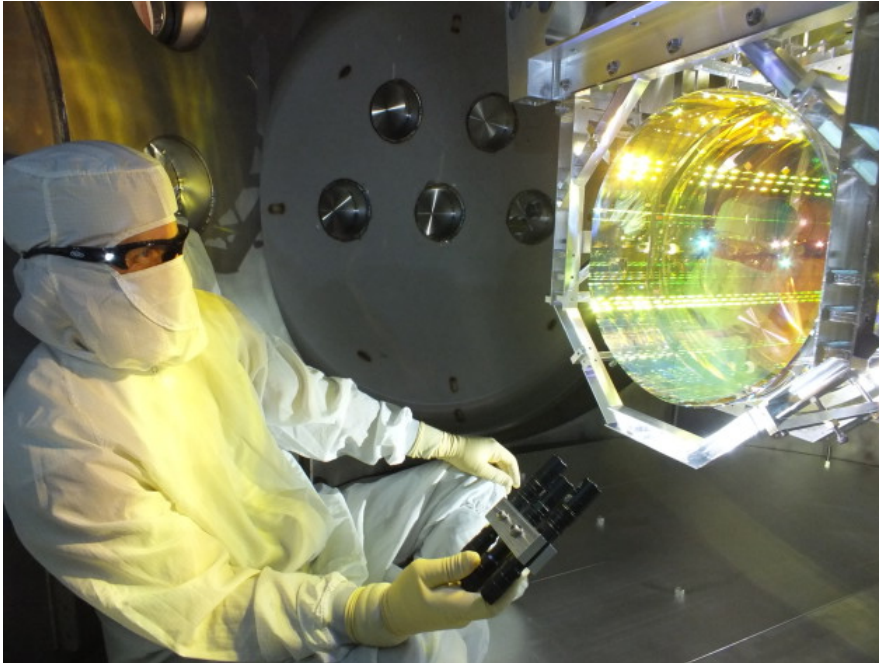
Laser

□ Laser stabilisé

- Nd:YAG
- Mono-mode
- Jusqu'à 200 W
- Intensité
 - $\delta I/I \sim 10^{-8}$
- Fréquence
 - $\delta f \sim 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Pointage du faisceau
- Stabilisation active et passive



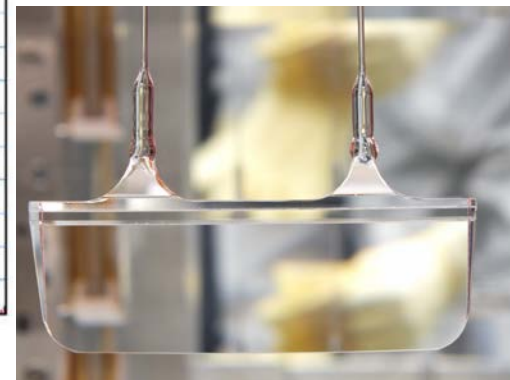
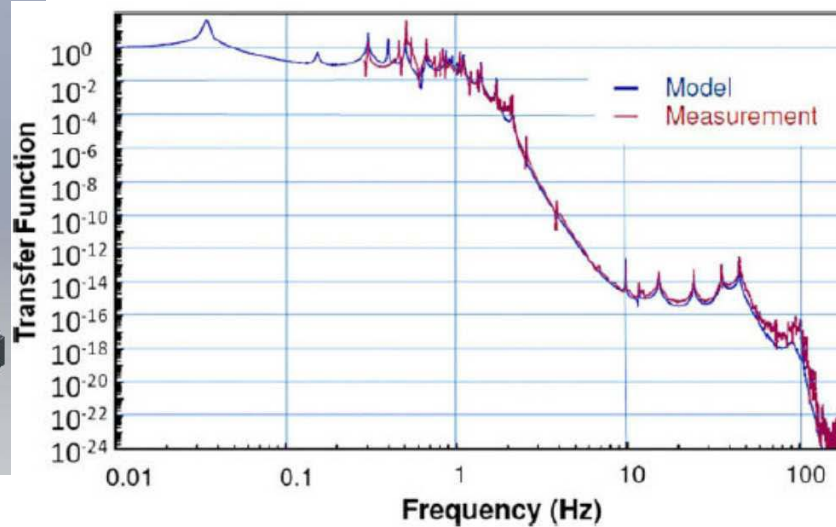
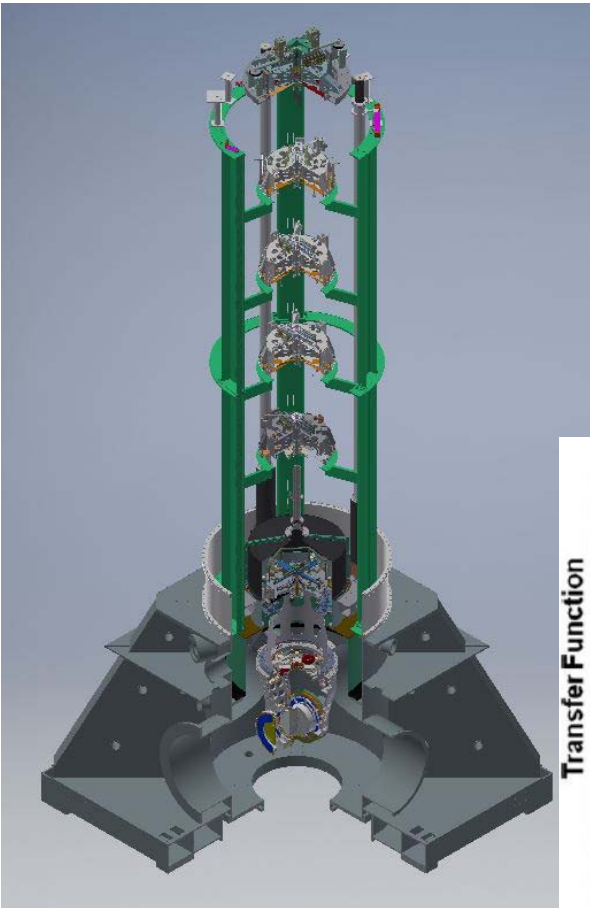
Miroirs



- ❑ Diamètre ~ 35 cm, 40 kg
- ❑ Silice ultra-pure
- ❑ Qualité de surface $\lambda/1000$
- ❑ Absorption < 1 ppm
- ❑ Diffusion ~10 ppm
- ❑ Uniformité des couches minces réfléchissantes 0.1 nm
- ❑ Traitement de surface et métrologie au LMA (Villeurbanne)

Suspensions

- ❑ Déplacement du sol typiquement $1 \mu\text{m}$ à 1 Hz
- ❑ Atténuation $\propto 1/f^2$ pour un étage \rightarrow multi-étages
- ❑ Enjeu de bruit thermique pour le dernier étage
 - Suspensions monolithiques

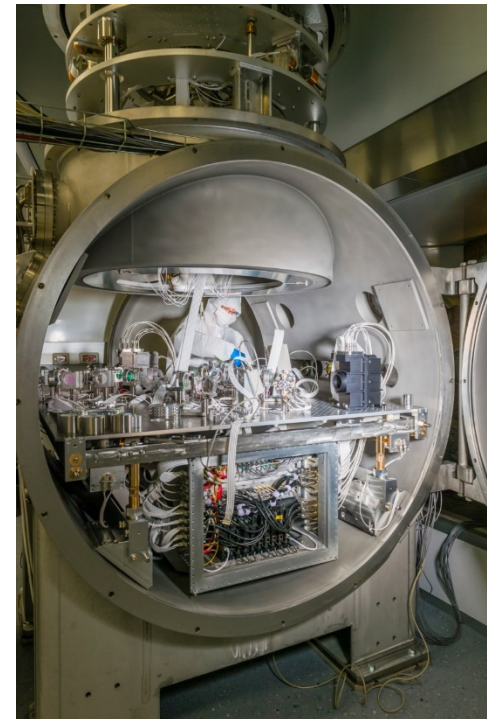
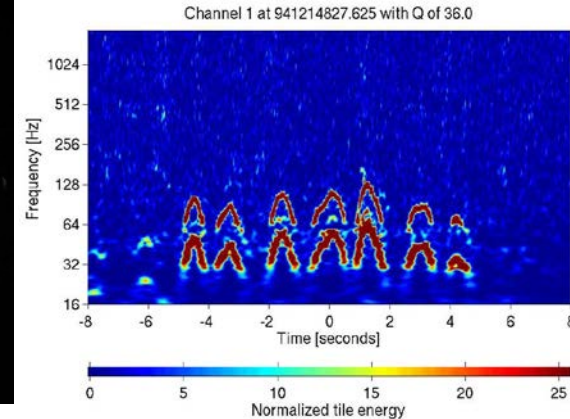


Contrôles et étalonnage

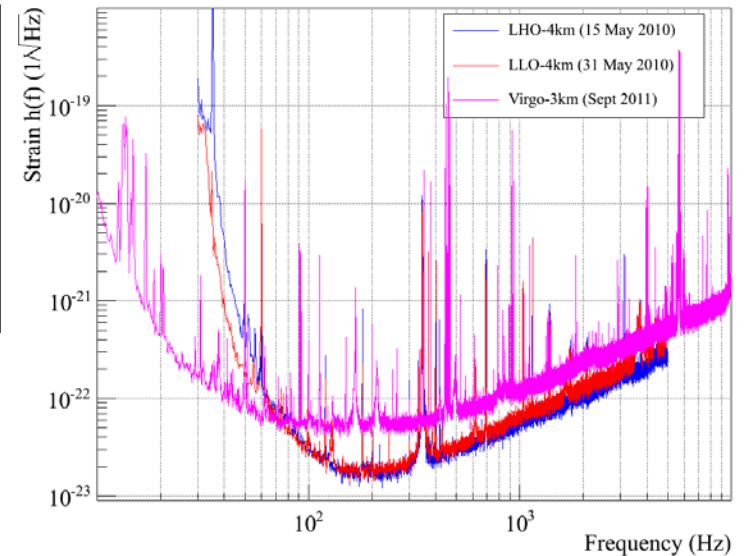
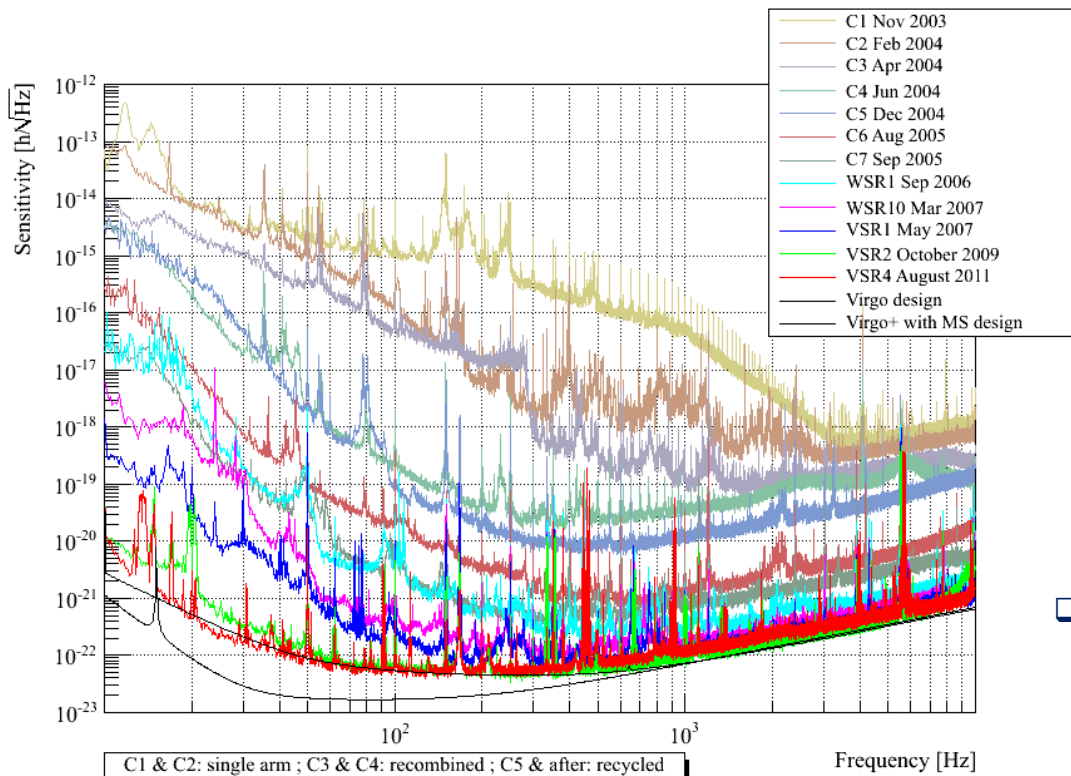
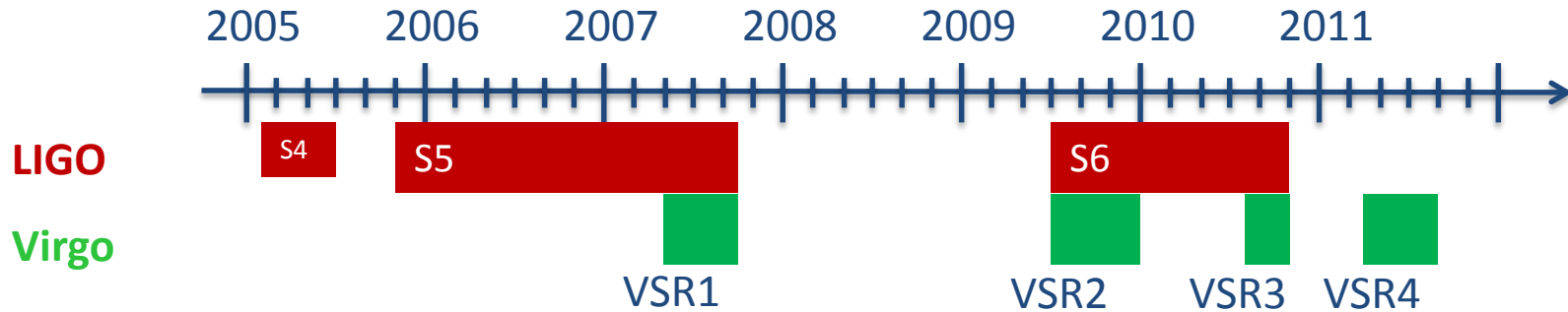
- ❑ Détecteur **contrôlé en temps réel** par un ensemble de boucles de rétroaction
 - Maintien de l'interféromètre à son point de fonctionnement
 - Frange noire, cavités à résonance...
 - ➔ Reconstruction de $h(t)$ basée aussi sur les signaux de contrôle
- ❑ Réponse de l'interféromètre calibrée par rapport à des déplacements connus
 - Référence de la **longueur d'onde** du laser
 - **Pression de radiation** de lasers auxiliaires sur les miroirs
- ❑ Cohérence de l'estampillage temporel de LIGO et Virgo
- ❑ Précision typique $\sim 10\%$ en amplitude, 10 deg en phase
 - A améliorer pour accompagner les progrès de la sensibilité

Un exemple de bruit technique

- **Lumière diffusée** peut polluer faisceau principal
 - Phase modulée par le mouvement de la surface diffusante
 - Couplage non-linéaire si déplacement > longueur d'onde, conversion à haute fréquence
 - Excès de bruit large bande
 - Phénomènes transitoires
- **Minimiser** la lumière diffusée
 - Modélisation et absorption des faisceaux parasites
 - Dimension et qualité des optiques
 - Pièges à lumière
- Minimiser le **couplage**
 - Isoler sismiquement et acoustiquement les éléments sensibles
 - Bancs optiques suspendus sous vide

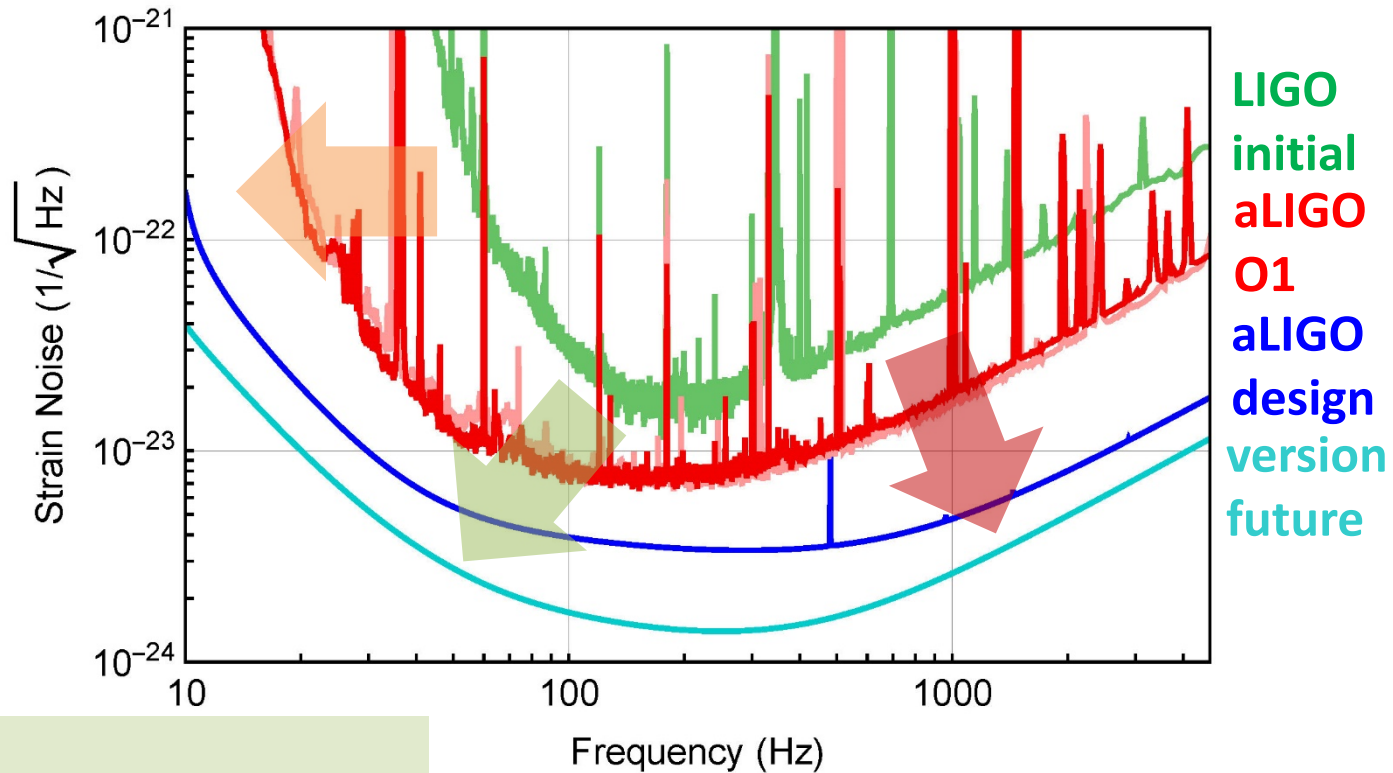


1G : Succès expérimental sans détection



- Nombre d'événements attendu $\propto \text{horizon}^3 T_{\text{observation}}$
Si horizon $\times 4$
➔ 1 jour après = 2 mois avant

De la 1^{ère} à la 2^{ème} génération



Bruit sismique
Meilleure isolation

Bruit thermique
Suspensions monolithiques
Traitement de surface des miroirs amélioré
Faisceau plus large

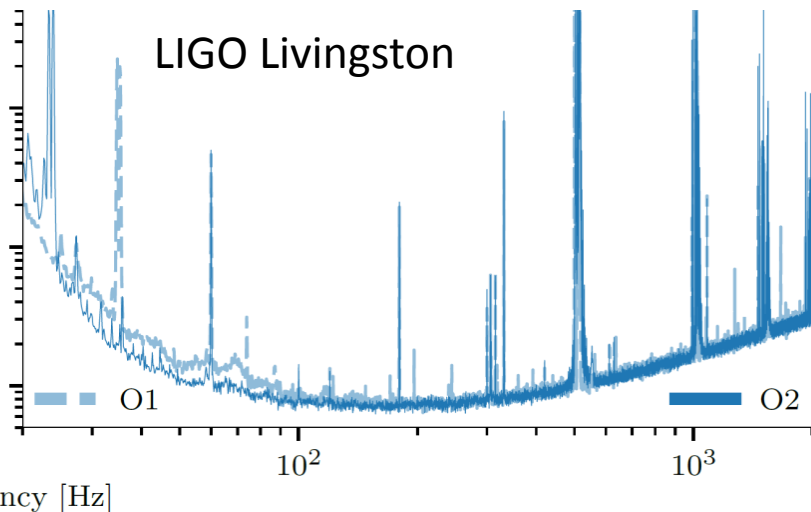
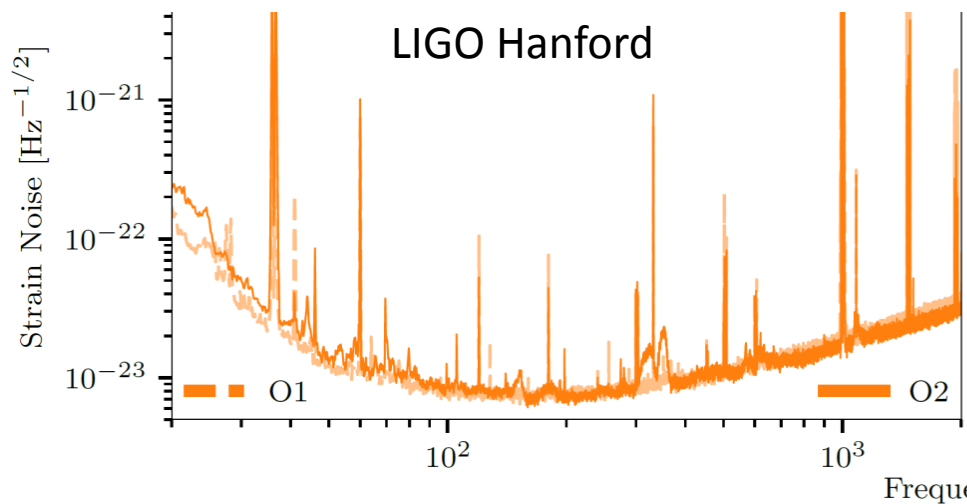
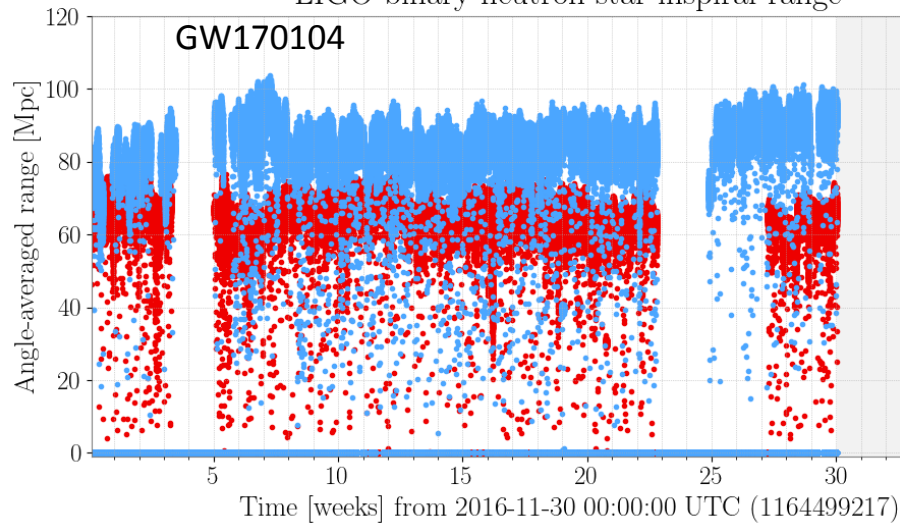
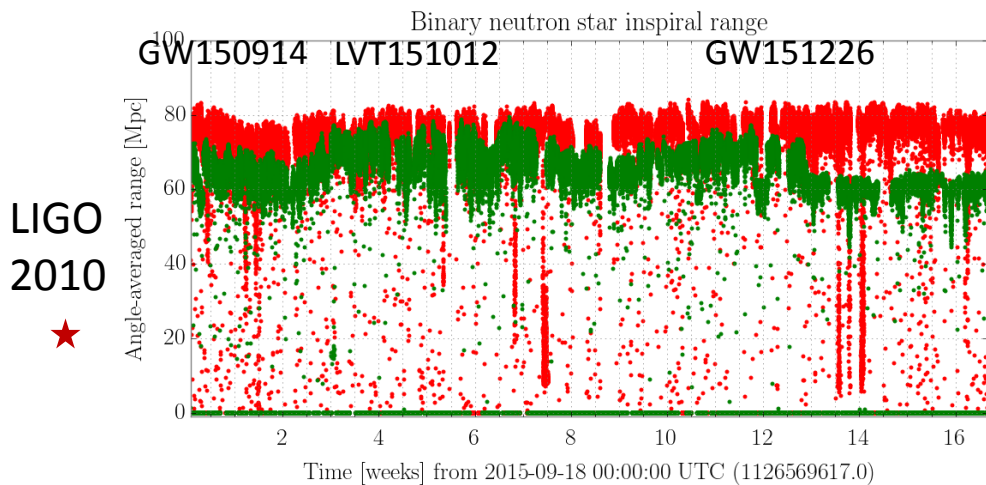
Bruit quantique
Puissance laser plus élevée
Compensation thermique des aberrations
Recyclage du signal
Détection homodyne

L'avènement des détecteurs avancés

Advanced LIGO, run O1

Advanced LIGO, run O2

LIGO binary neutron star inspiral range

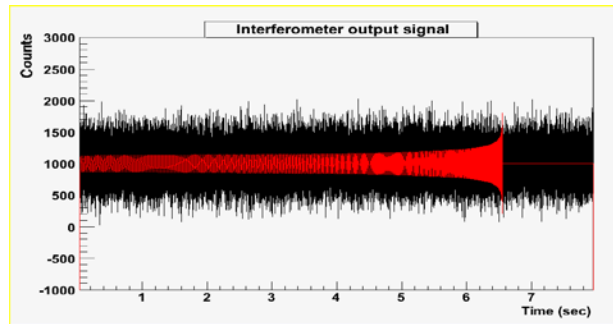
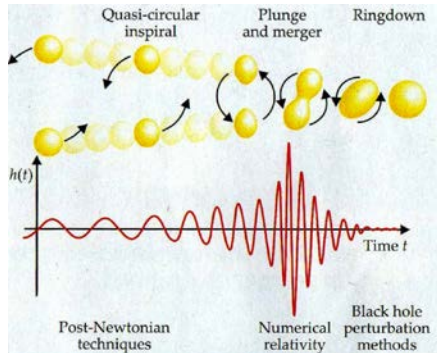


Le réseau LIGO-Virgo

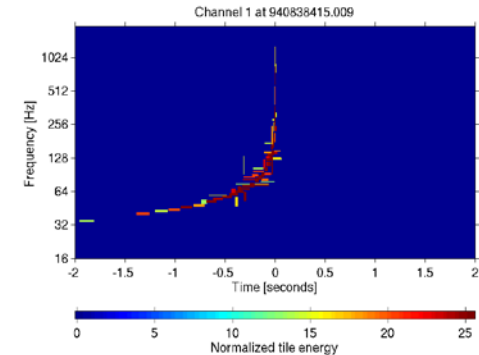
- ❑ LIGO et Virgo ont démarré comme des projets indépendants et concurrents...
- ❑ ... tout en anticipant la nécessité d'une coopération internationale
 - Années 1990 : Proposition et adoption d'un format de données commun
- ❑ Années 2000 : Préparation de la fusion des structures d'analyse des données, négociation d'une convention de collaboration
- ❑ 2007 : Entrée en vigueur de l'accord de **partage des données** et de leur **analyse conjointe**
- ❑ Des collaborations techniques
 - Exemple emblématique : les miroirs

L'analyse des données en bref

- Filtrage adapté pour les signaux bien modélisés

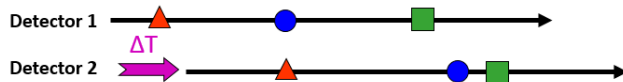


- Recherche d'énergie en excès

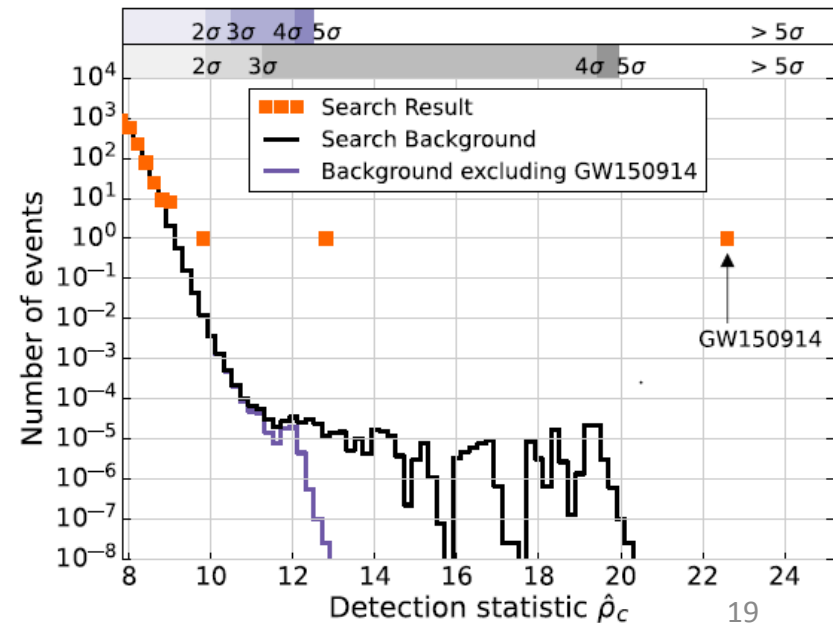


- Le bruit des détecteurs d'OG est non-Gaussien et non-stationnaire

- Recherche de signaux coïncidents / cohérents entre plusieurs détecteurs
- Bruit de fond mesuré à partir des données, grâce à des décalages temporels



- Etat des détecteurs et de leur environnement monitoré pour caractériser la qualité des données



Extraire la science

- Dès aujourd'hui
 - Mesure des paramètres
 - Etudes de population, abondance et scénarios de formation des sources
 - Résidus (données – modèle)
 - Tests de la Relativité Générale en champ fort, contraintes sur les déviations possibles
- A l'avenir
 - Perspectives pour la cosmologie
 - Sirènes standard ouvrant la voie à une mesure indépendante de l'expansion locale de l'Univers
 - Des pistes pour la matière sombre ?
 - Perspectives pour l'astrophysique
 - Comprendre la dynamique des supernovæ à effondrement de cœur
 - Confirmer l'origine des sursauts gamma courts
 - Comprendre l'origine des métaux dans l'Univers
 - Perspectives pour la physique fondamentale
 - Equation d'état de la matière nucléaire dans les étoiles à neutrons
 - Contraintes sur les masses des neutrinos, graviton
- Notre compréhension progressera grâce :
 - Aux événements exceptionnels à fort SNR qui domineront l'échantillon
 - A l'accumulation de statistique



Le futur

- Etendre le **réseau**

- Plus de détecteurs

- Etendre le **spectre**

- Des détecteurs de types différents



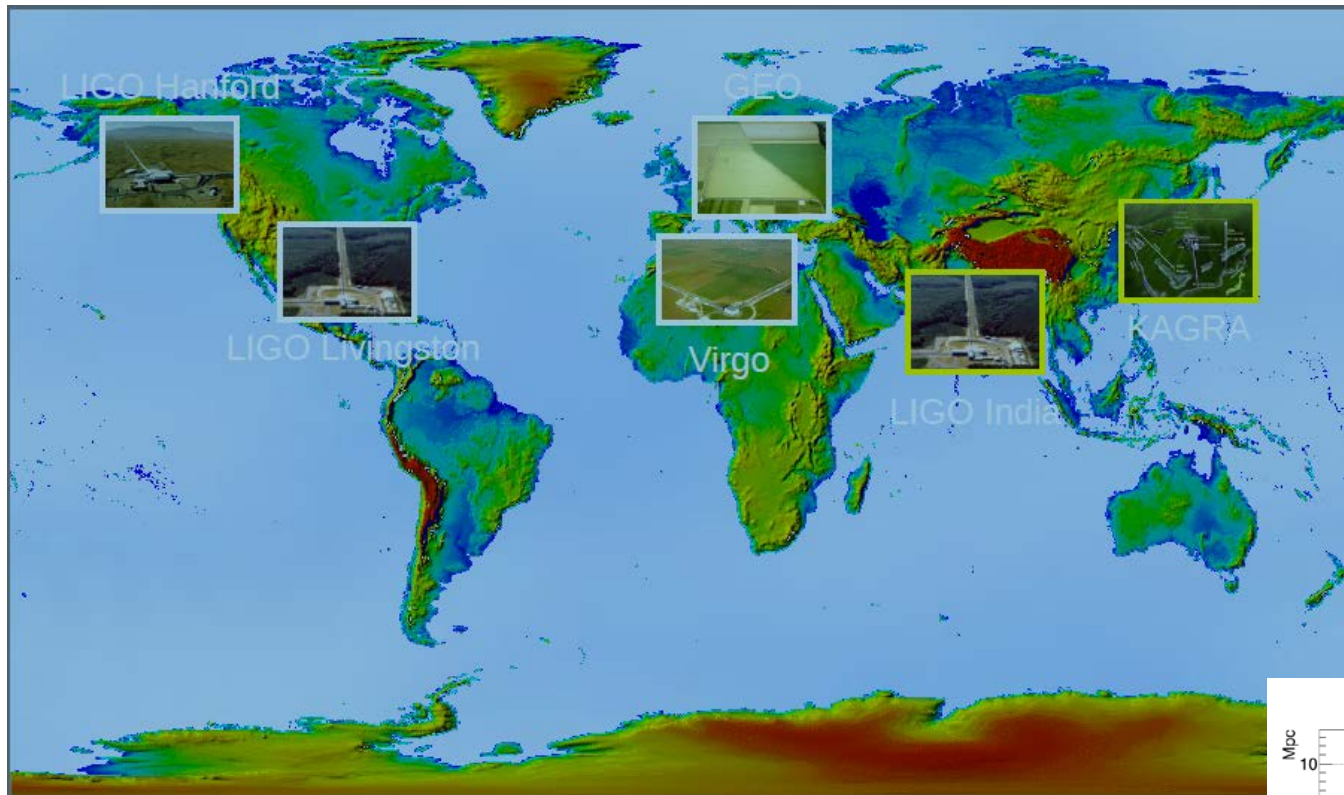
- Repousser l'**horizon**

- Des détecteurs plus sensibles

- Poursuivre l'approche **multi-messenger**

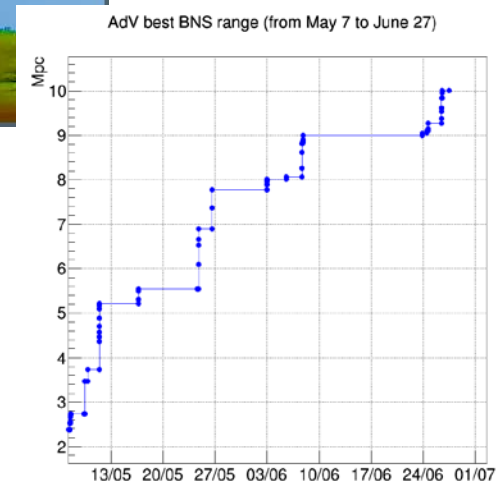
- Avec l'astronomie traditionnelle et neutrino

Etendre le réseau



- ❑ Un détecteur en construction au Japon - KAGRA
- ❑ Un futur détecteur LIGO en Inde

- ❑ La construction d'Advanced Virgo est achevée
 - Le détecteur fonctionne, la sensibilité progresse
 - Objectif : Démarrer les observations dans les semaines qui viennent

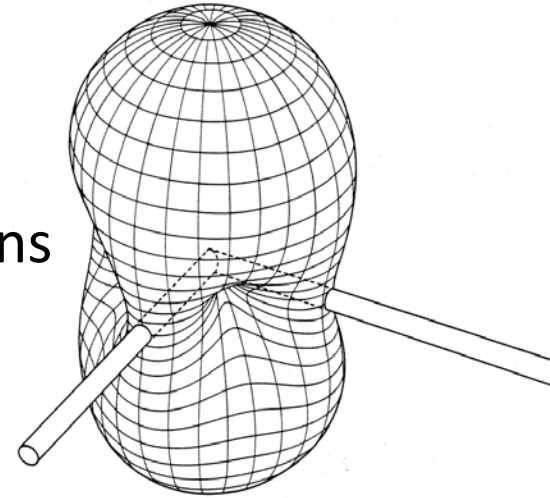


Bénéfices d'un réseau étendu

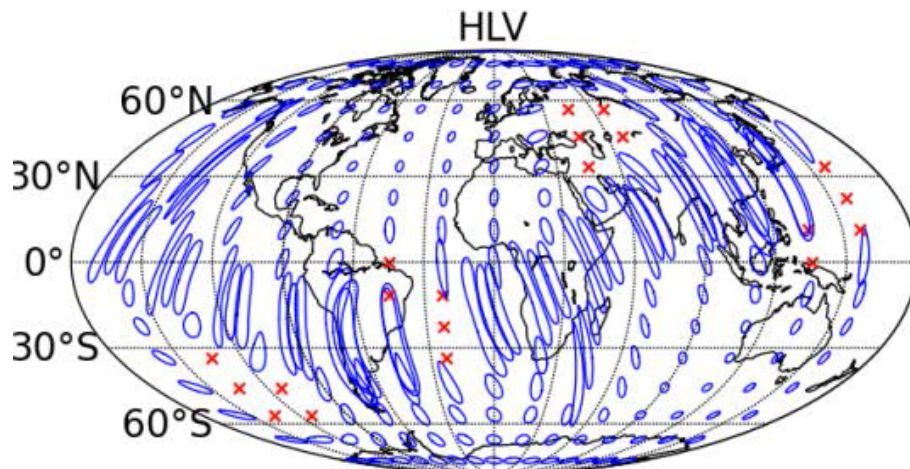
- ❑ **Cycle utile**

- 85-90% au mieux par détecteur, souvent moins

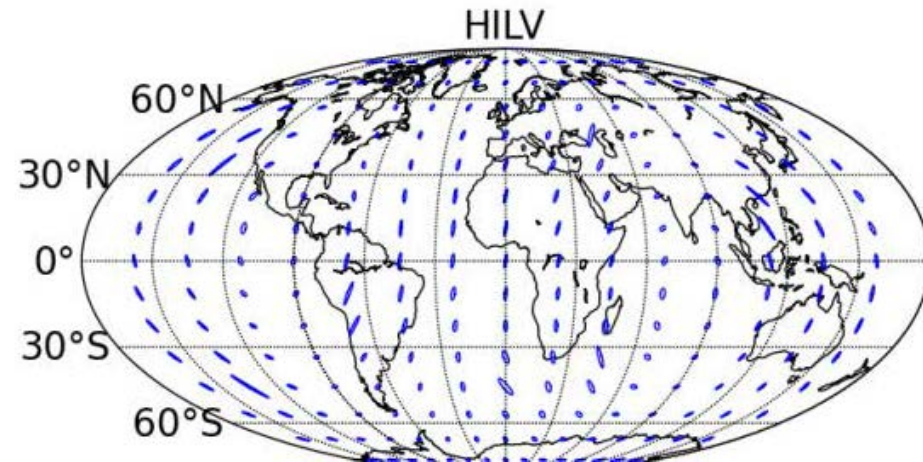
- ❑ **Localisation** des sources dans le ciel



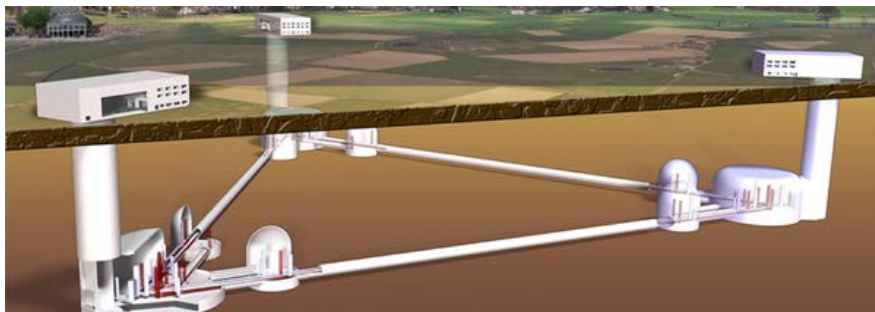
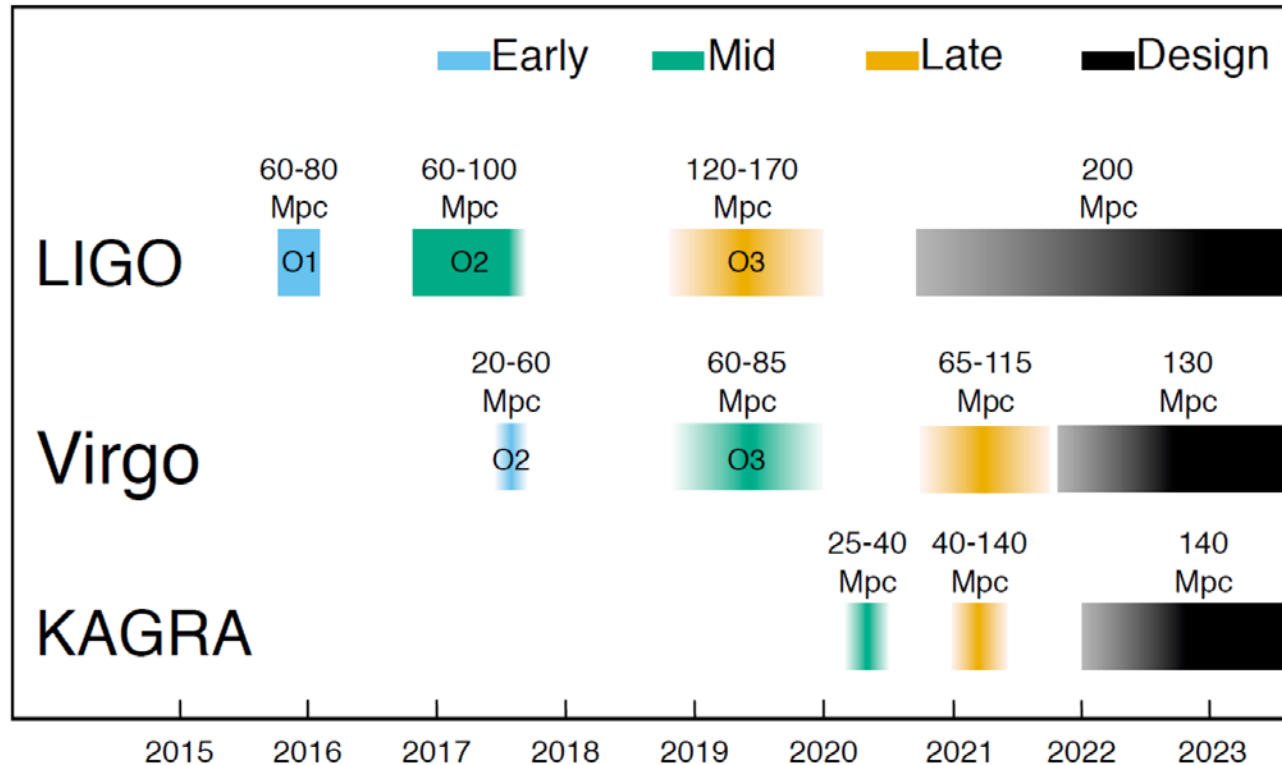
Face-on BNS @ 80 Mpc



Face-on BNS @ 160 Mpc



Repousser l'horizon

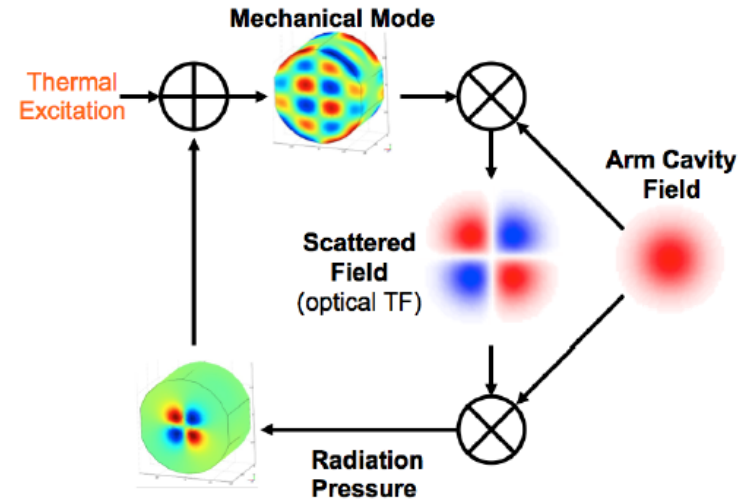


- Vers des détecteurs 3G à l'horizon 2030+
 - ~10 km, large bande, sous terre, cryogénie

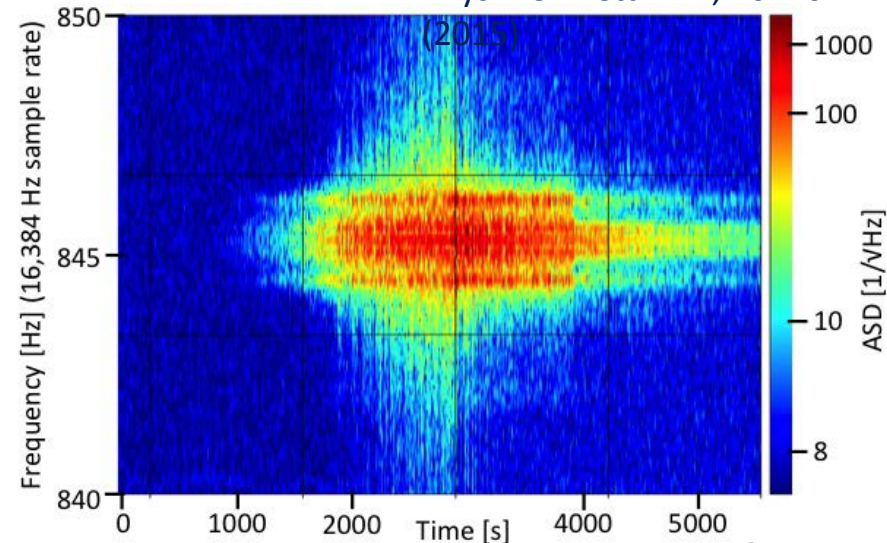
Un défi parmi d'autres

□ Instabilités opto-mécaniques

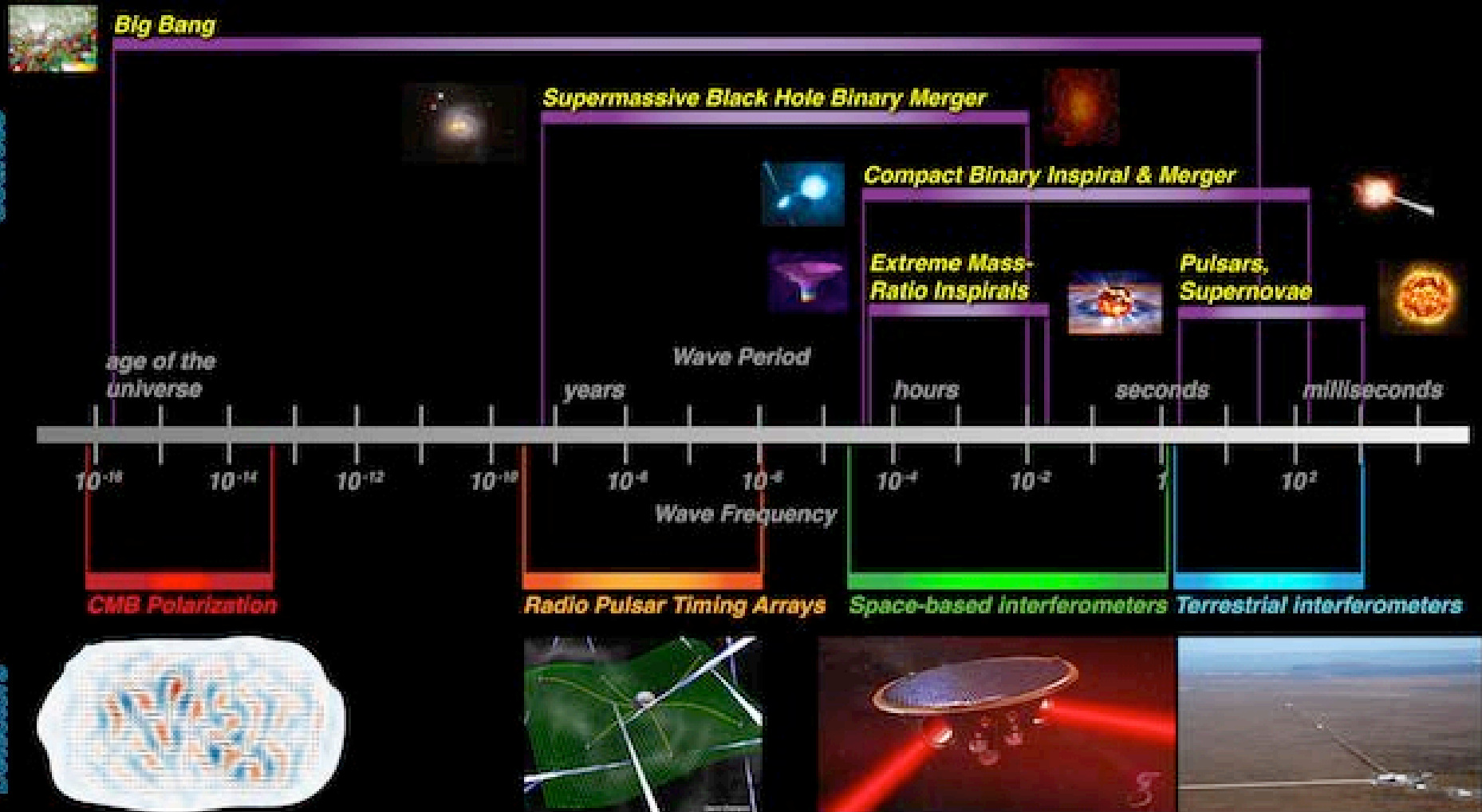
- Transfert d'énergie du mode optique fondamental vers un mode de résonance d'un miroir par pression de radiation
- Risque d'instabilité croît avec la puissance du faisceau
- Observées dans aLIGO
- Stratégies d'évitement et d'amortissement nécessaires pour permettre un fonctionnement à puissance nominale



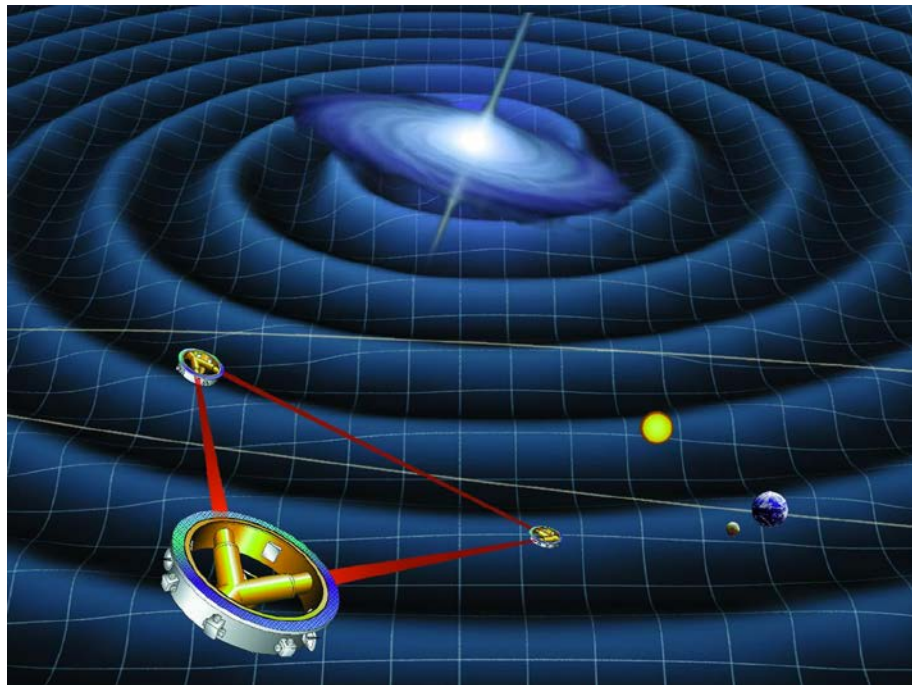
Phys. Rev. Lett. 114, 161102



Etendre le spectre

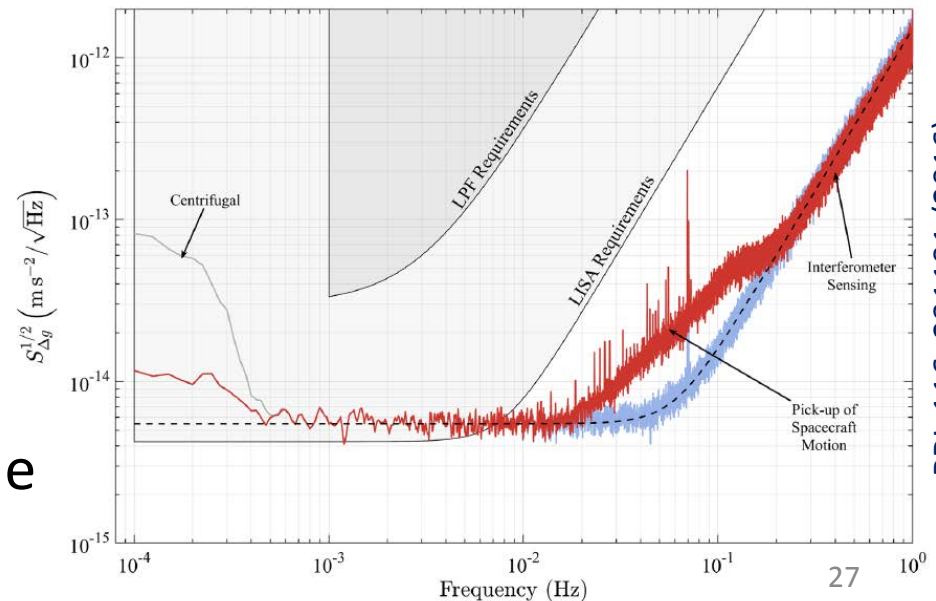


Interférométrie spatiale



□ LISA

- Triangle de 3 satellites séparés de $2.5 \cdot 10^6$ km
 - 0.1 mHz – 1 Hz
- Sélectionné par l'ESA pour mission L3
 - Lancement en 2034



□ Plein succès pour LISA Pathfinder

- 2 masses test en chute libre avec une accélération résiduelle $(0.54 \pm 0.01) \times 10^{-15} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$

Chronométrie de pulsars

- Des “détecteurs” à l’échelle de la galaxie
 - Pulsars = horloges cosmiques
 - Bande du nano-Hz
- Défis
 - Identifier des pulsars ultra-stables
 - Précision TOA ~ 100 ns
 - Les observer fréquemment sur de longues durées

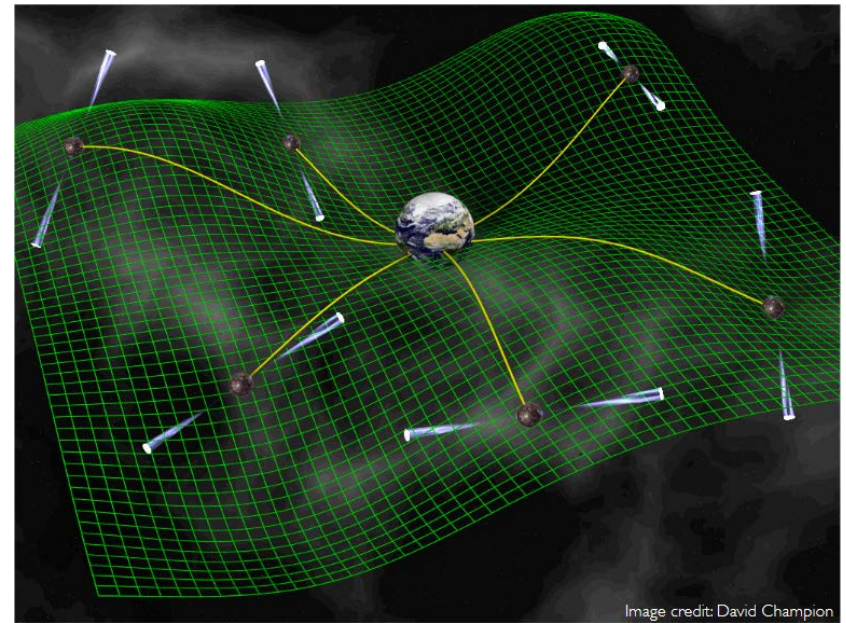
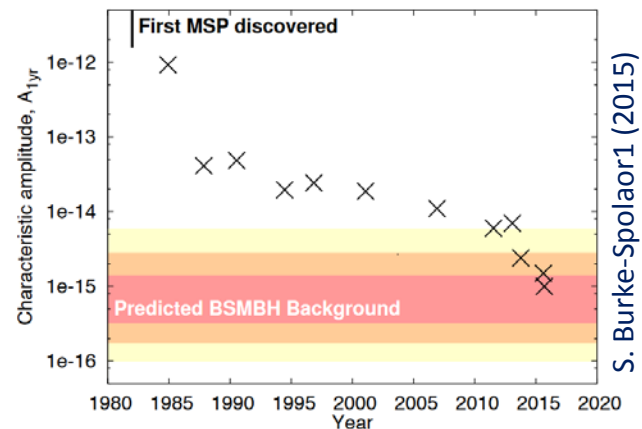


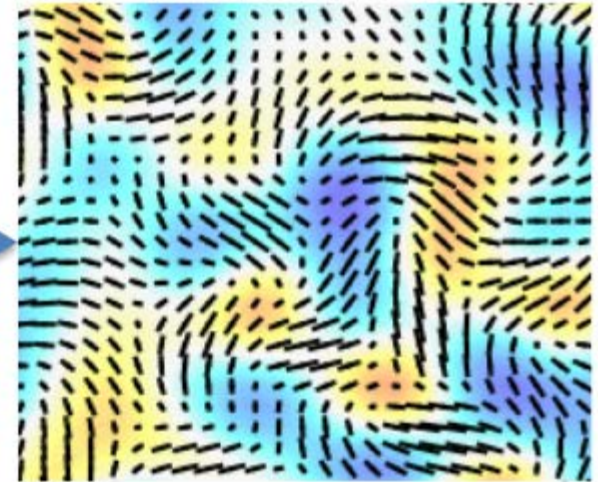
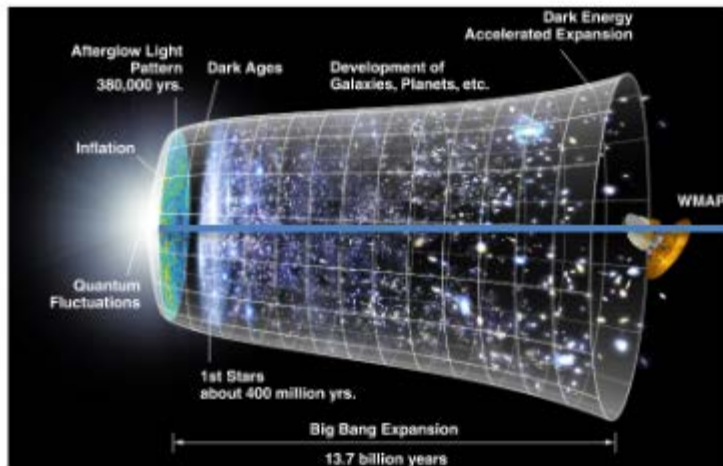
Image credit: David Champion

- Sonde le fond stochastique des binaires de trous noirs super-massifs



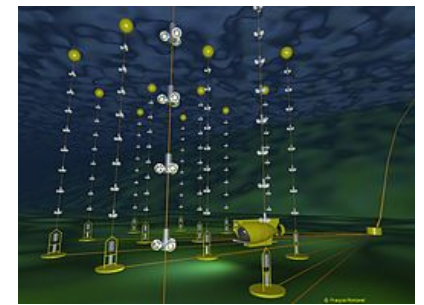
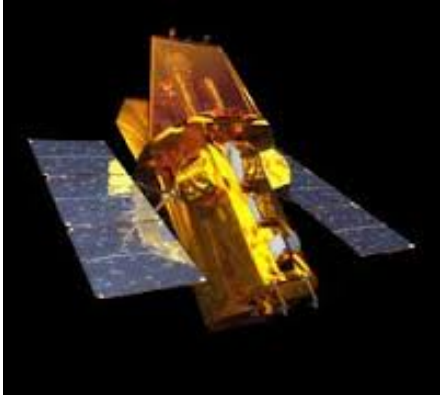
Polarisation du fond diffus cosmologique

- Sonde les ondes gravitationnelles primordiales émises lors de la phase d'inflation de l'Univers

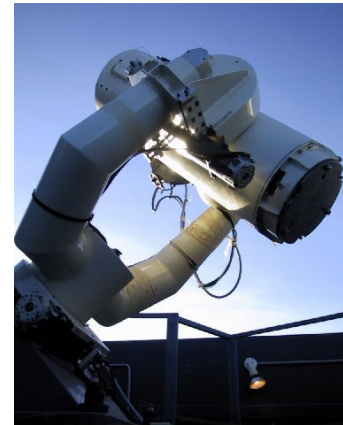


- Un défi expérimental
 - Sensibilité, soustraction des avant-plans...

Poursuivre l'approche multi-messager



- ❑ Recherches de **contreparties** électromagnétiques / neutrino aux signaux transitoires d'ondes gravitationnelles
 - Placer les sources dans leur **contexte astrophysique**
 - Evoluer des alertes privées à des alertes publiques



Conclusion

- ❑ Mesurer des déformations de l'espace à une échelle $< 10^{-21}$ est une prouesse instrumentale qui a demandé des décennies d'effort et d'innovation
- ❑ Le succès des premières observations de coalescences de trous noirs avec LIGO ouvre deux voies nouvelles...
 - Tests inédits de la gravitation
 - Astronomie des ondes gravitationnelles
- ❑ ... qui seront explorées par un réseau étendu de détecteurs de plus en plus sensibles
 - Impatience de voir Advanced Virgo rejoindre Advanced LIGO !
- ❑ S'inscrit dans un contexte plus large
 - Approche multi-messager
 - Exploration de l'ensemble du spectre des ondes gravitationnelles