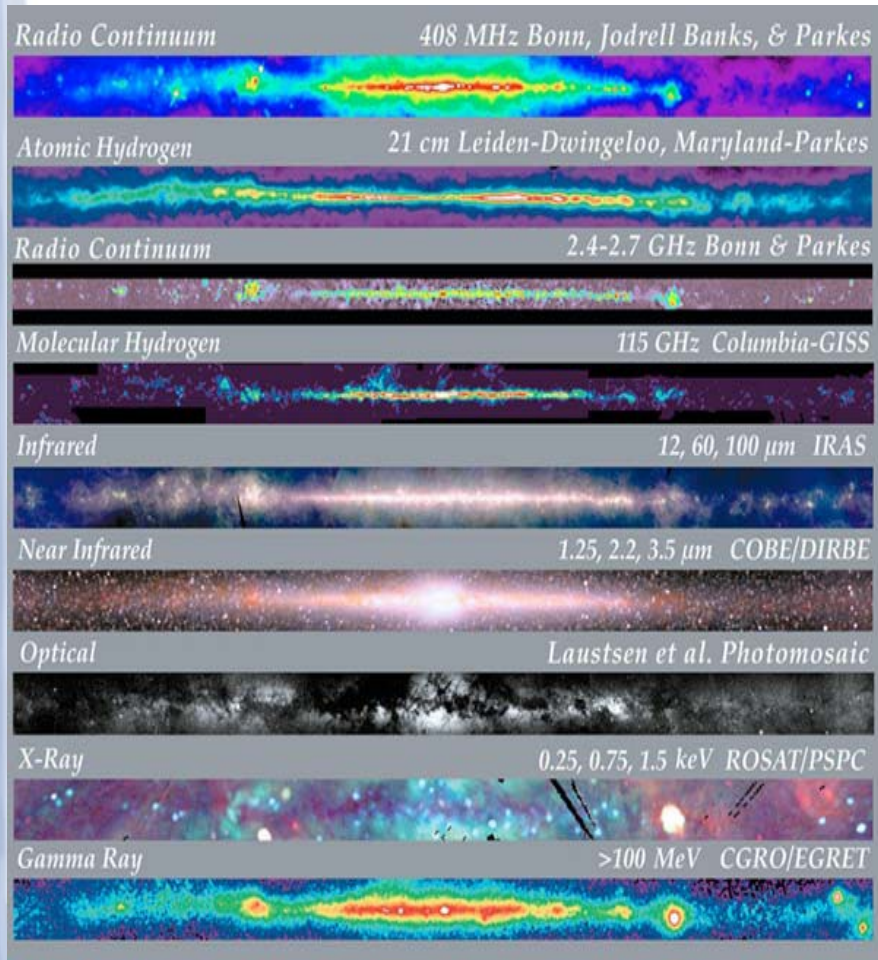


# Les ondes gravitationnelles

## *Écouter l'Univers*

Nicolas Leroy  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

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

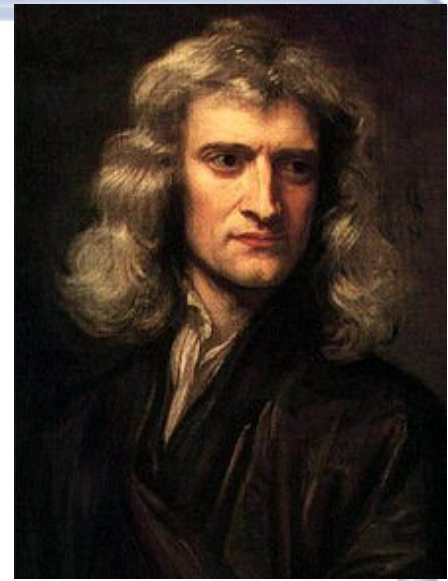


- Ce qui nous tombe dessus
- En allant sur place
- En regardant la lumière sur l'ensemble du spectre électromagnétique
  - Régions très denses restent inaccessibles
- Idée : utiliser d'autres messagers:
  - Neutrinos
  - Ondes gravitationnelles

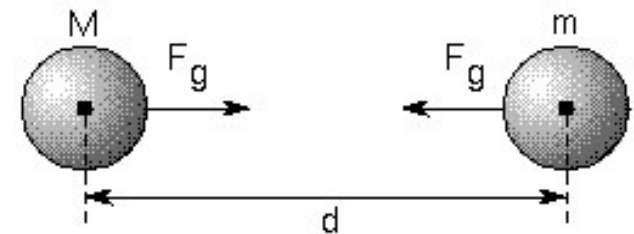
# Commençons ...

- Expliquer ce que sont les OG
  - Un peu de gravitation
  - Comment les créer
  - Comment les détecter
- Détecteurs au sol : LIGO – Virgo
- L'espace proche : eLISA
- L'espace lointain : PTA

# De Newton (1687)

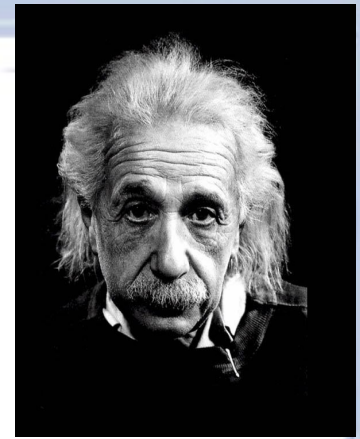


- La gravitation est universelle : même force entre la pomme et la Terre qu'entre le Soleil et la Terre
- Action à distance
  - Explication naturelle pour la forme des orbites des planètes
  - N'explique pas l'origine de la gravitation
  - Effet instantané du moindre changement
- Coordonnées galiléenne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



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

# À Einstein (1915)

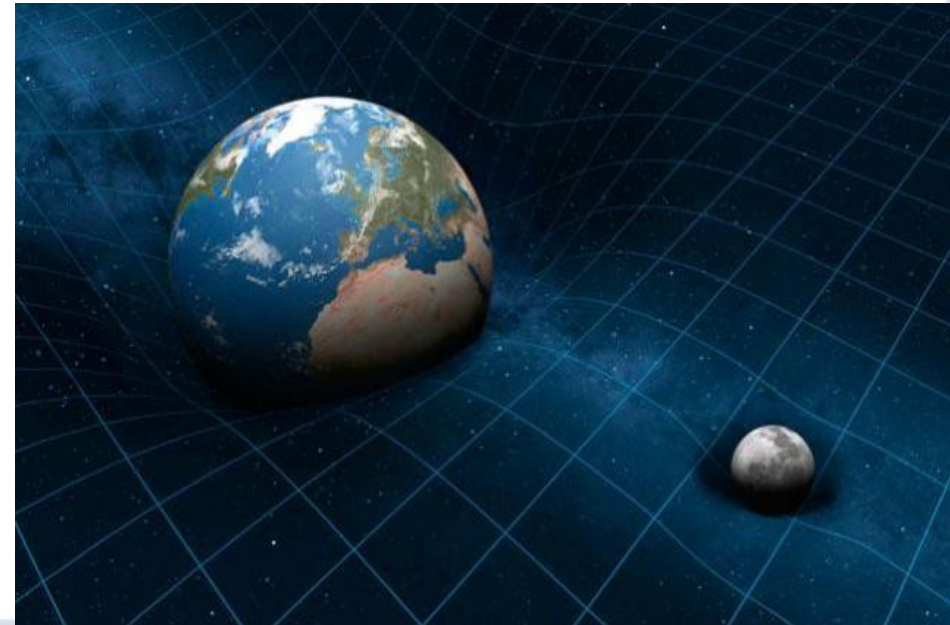


- La gravité ne résulte pas d'une force mais d'une déformation de l'espace temps
- Tout objet déforme l'espace-temps



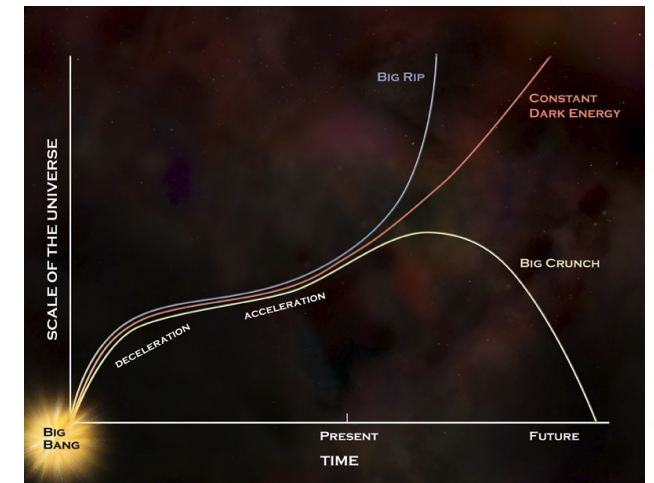
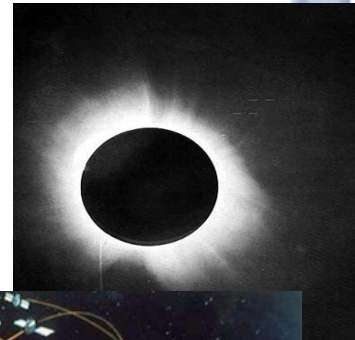
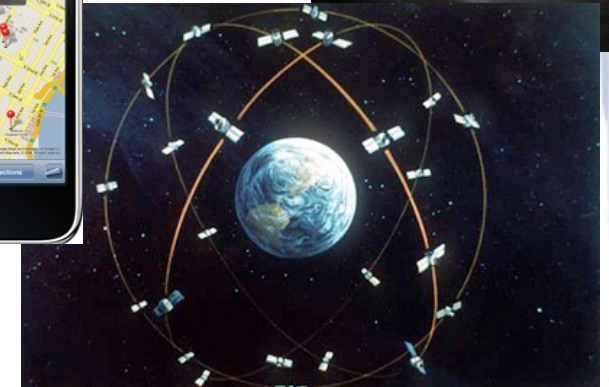
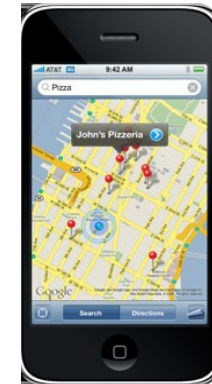
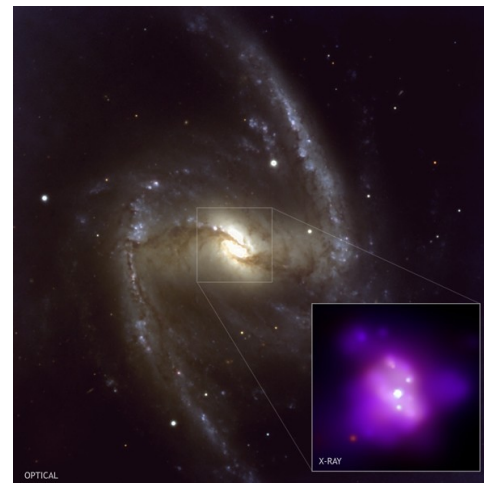
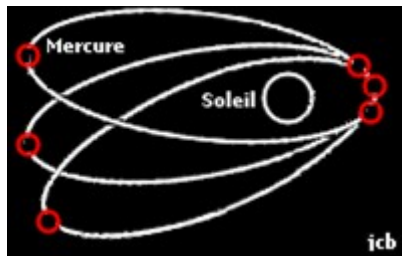
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

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



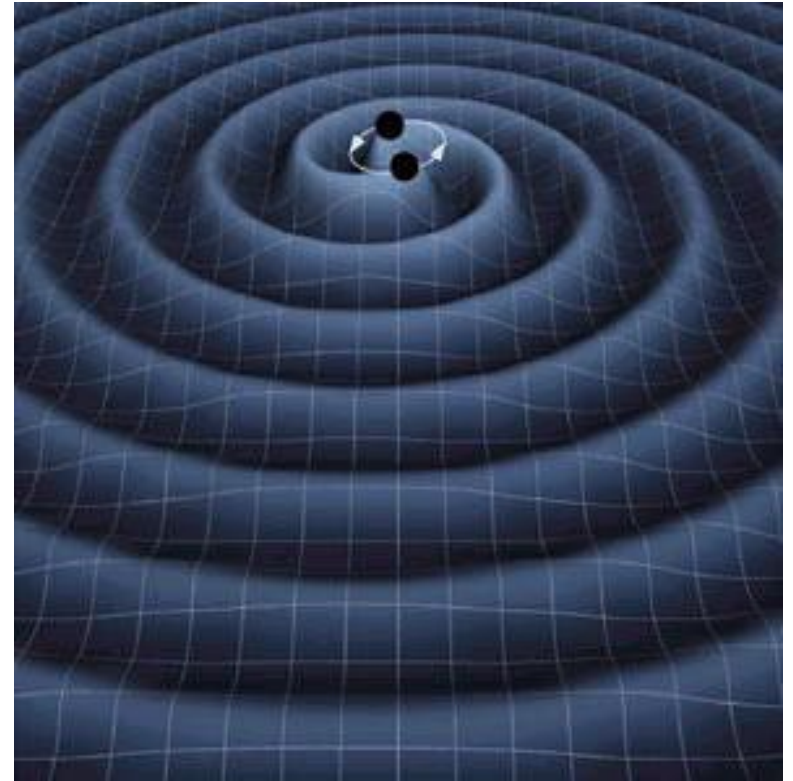
# Les succès de la relativité générale

- 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 mouvement :
  - 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  $c$ )***

# 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	$2 \times 10^{-34}$	$10^{-29}$
Bombe H, 1 mégatonne Asymétrie 10%	10 km	$2 \times 10^{-39}$	$10^{-11}$



# Allons voir plus loin, plus compact

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

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

$\epsilon$  : asymétrie

R : rayon de la source

M : masse de la source

$\omega$  : 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

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

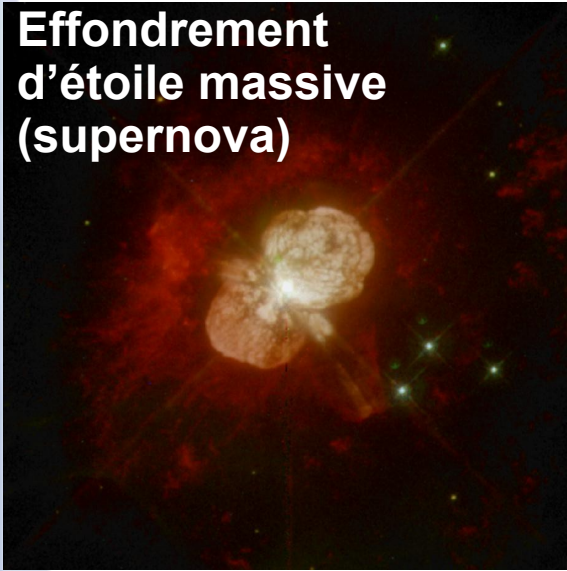
NS-NS @ 10 Mpc

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

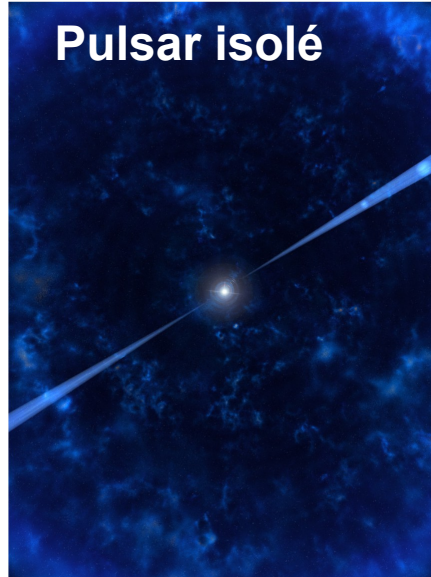
$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ al} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

# Sources possibles

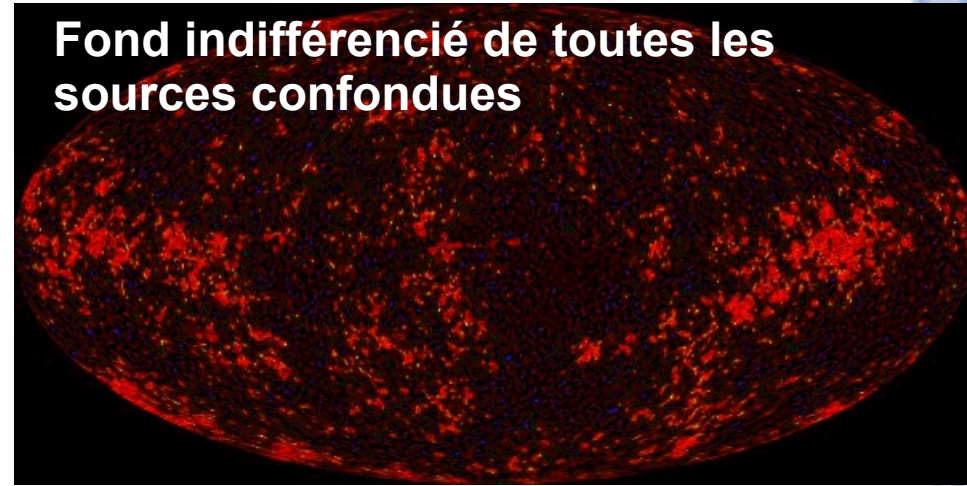
**Effondrement  
d'étoile massive  
(supernova)**



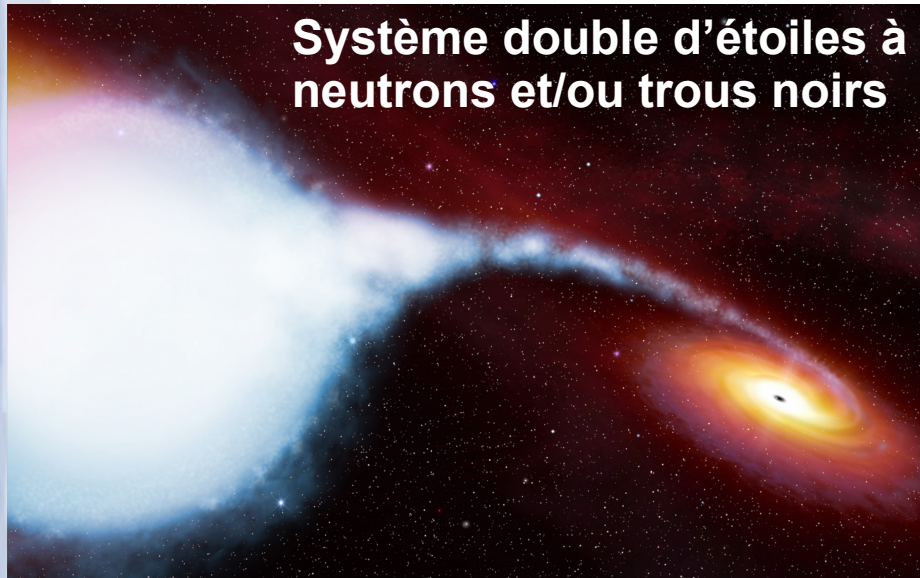
**Pulsar isolé**



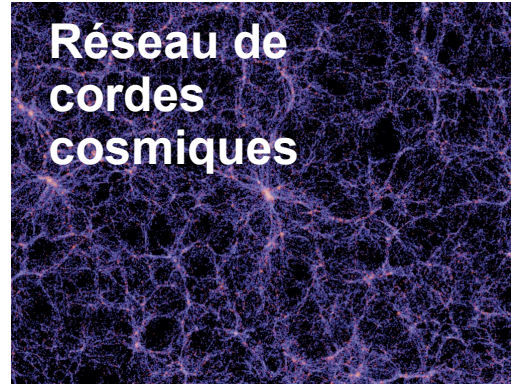
**Fond indifférencié de toutes les  
sources confondues**



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

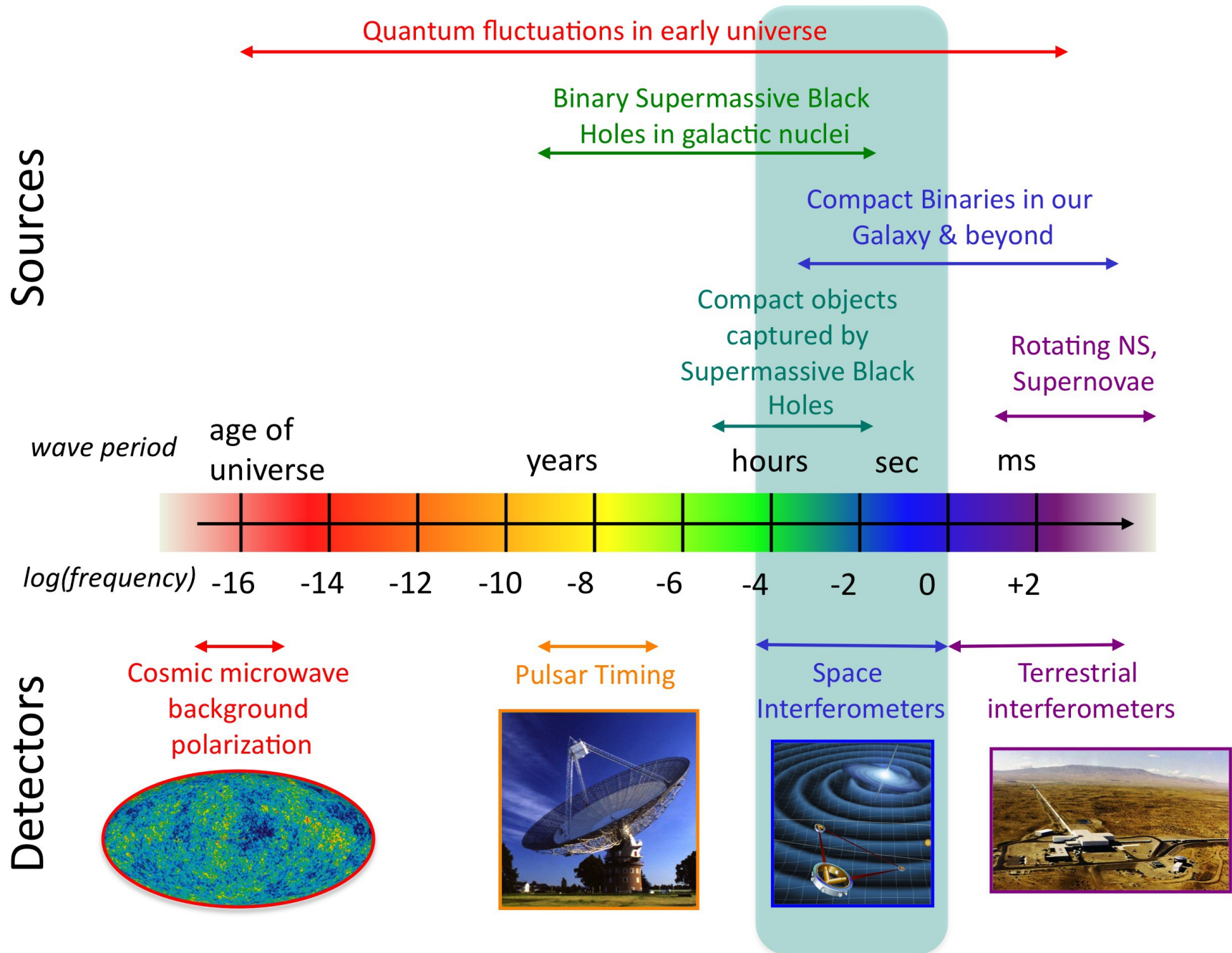


**Réseau de  
cordes  
cosmiques**



**Surprise !**

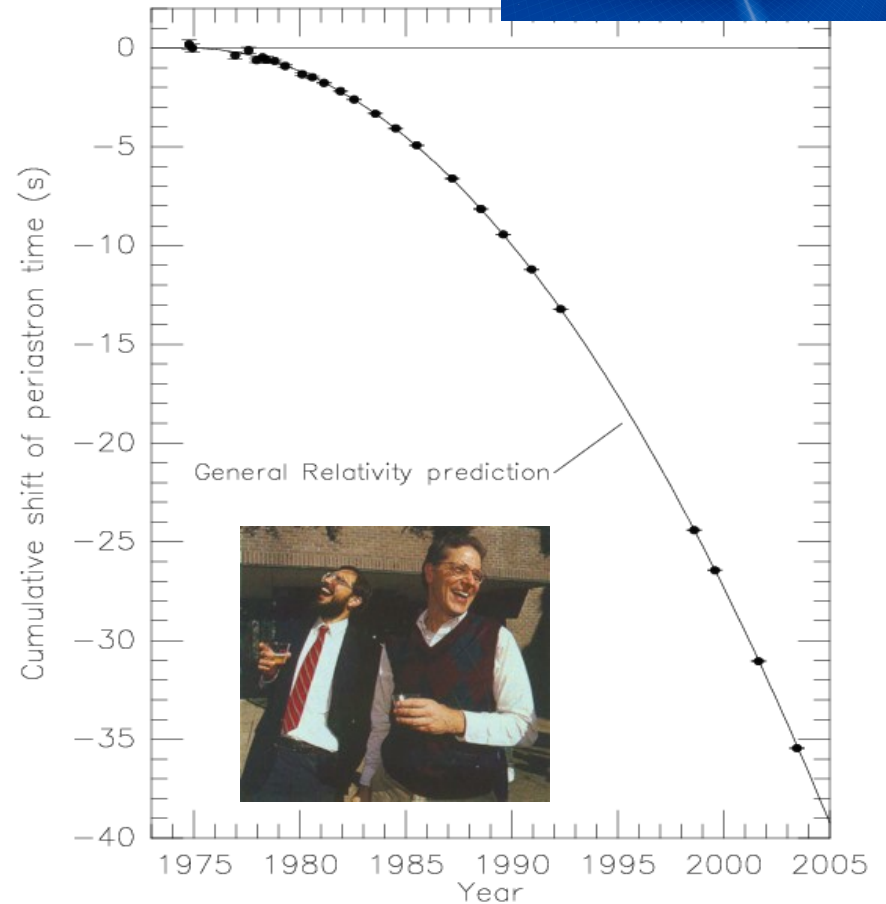
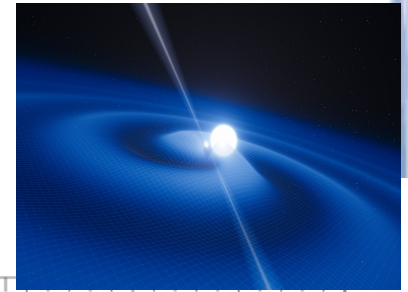
# The Gravitational Wave Spectrum



# Preuves d'existence ?

@ESO/Caleda

- La première preuve expérimentale existe !
  - 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

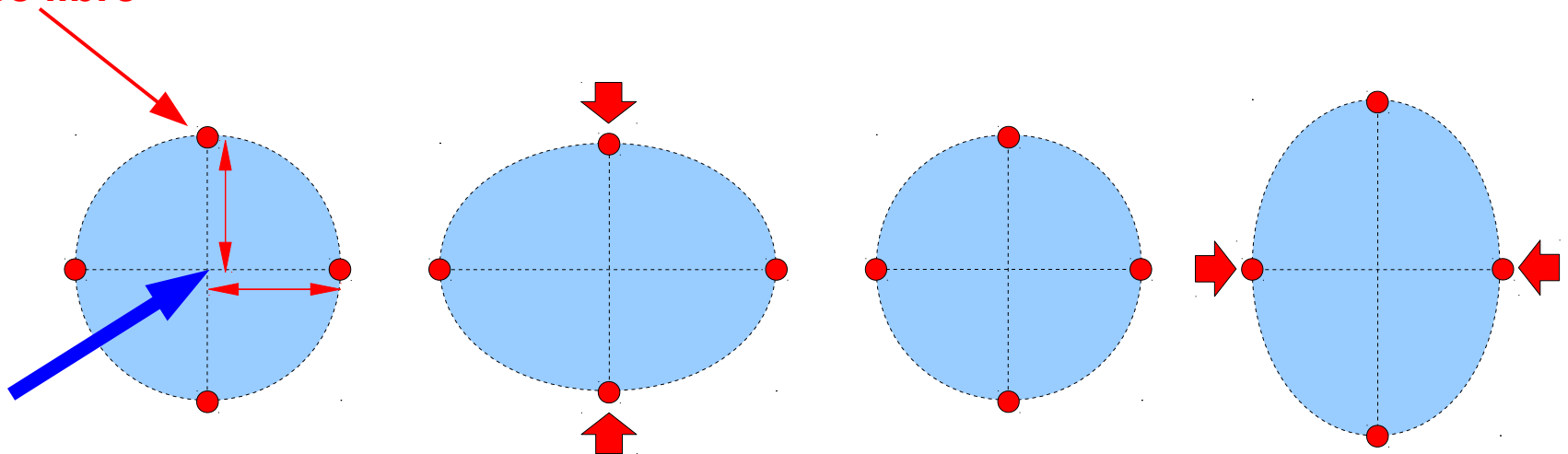


Prix Nobel Hulse et Taylor en 1993

# 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

# Comment les détecter ?

## Les problèmes :

- Amplitudes très faible
- Peu/pas de couplage avec la matière

## Première solution :

- Mesurer l'impact sur un solide :  
détecteurs de type barres
- premières expériences par Weber dans les années 60

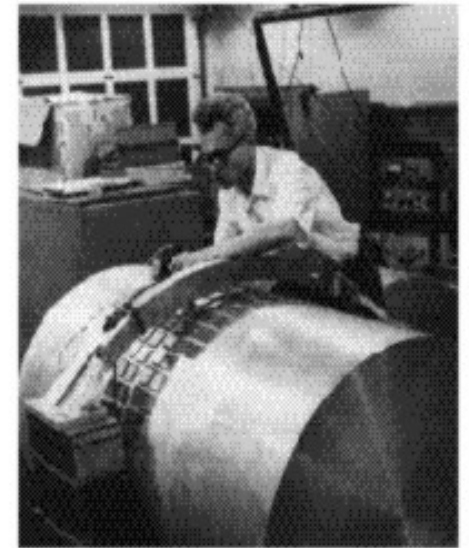
J.Weber: "When I decided to search for gravitational waves some 14 years ago, most physicists applauded our courage, but felt that success – detection of gravitational radiation – would require a century of experimental work." (Popular Science May1972)

# Les barres de Weber

- Barre d'Aluminium – 2m long., 1m Ø
- Détection longueur via piézoélectriques
- Sensibilité dictée par la forme de la barre
- Fausses détections dans les années 80
- Détecteurs les plus récents étaient cryogéniques et suspendus

## Conclusions :

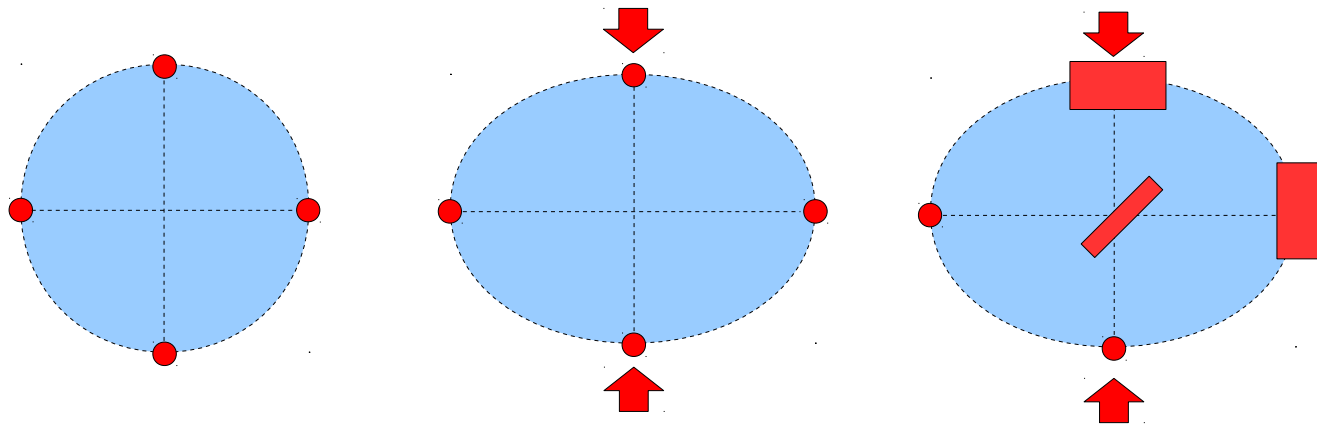
- Difficile à mettre en place
- Détecteurs bruyants
- Sensible à une seule fréquence



# Comment les détecter ?

## Seconde solution :

- Utiliser l'effet différentiel : idées d'utiliser les interféromètres de Michelson-Morley (non détection de l'ether) dans les années 70



- Mise au point du concept complet sur la décade suivante
- Technique aujourd'hui la plus sensible



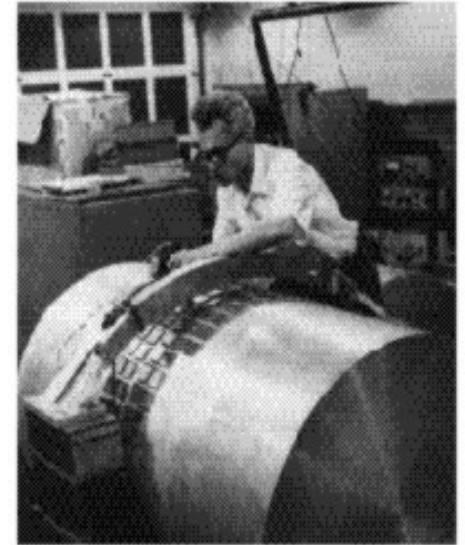
# Interféromètre de Michelson



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

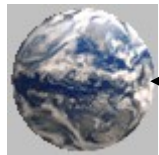
# Une histoire déjà longue

- 1960 Premier détecteur(Weber)
- 1963 Idée d'un détecteur ITF(Gersenshtein&Pustovoit, Weber)
- 1969 Première fausse alarme (Weber)
- 197X Age d'or des détecteurs type Weber
- 1972 Faisabilité de l'ITF (Weiss) et premier prototype (Forward)
- 1974 PSR1913+16 (Hulse&Taylor)
- Fin 70s Barres à 4K, prototypes ITF(Glasgow, Garching, Caltech)
- 1980 Premières activités in France
- 1986 Naissance de la collaboration VIRGO (France+Italie)
- 1989 **proposal VIRGO**, proposal LIGO (USA)
- 1992 VIRGO FCD **Approbation Française**. LIGO approuvé
- 1993 VIRGO approuvé en Italie
- 1996 **Début Construction** VIRGO et LIGO
- 2001-2002 VIRGO CITF. LIGO : engineering runs
- Fin 2005 **LIGO à sa sensibilité nominale**
- 2007 **Premier run commun LIGO/Virgo**
- 2009 **Virgo ~ à sa sensibilité nominale**
- 2012 -13 **Début de construction d'Advanced LIGO**  
et Advanced Virgo
- 2014 **Début du commissioning d'Advanced LIGO**
- 2015 **Début du commissioning d'Advanced LIGO**



# 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 :

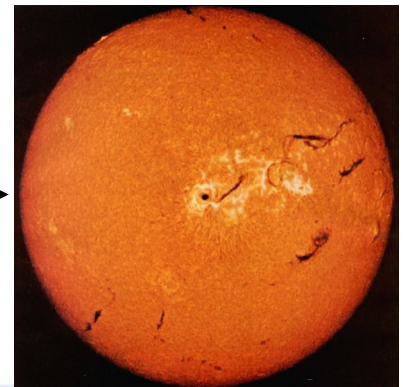


Terre

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

à un atome près

Soleil



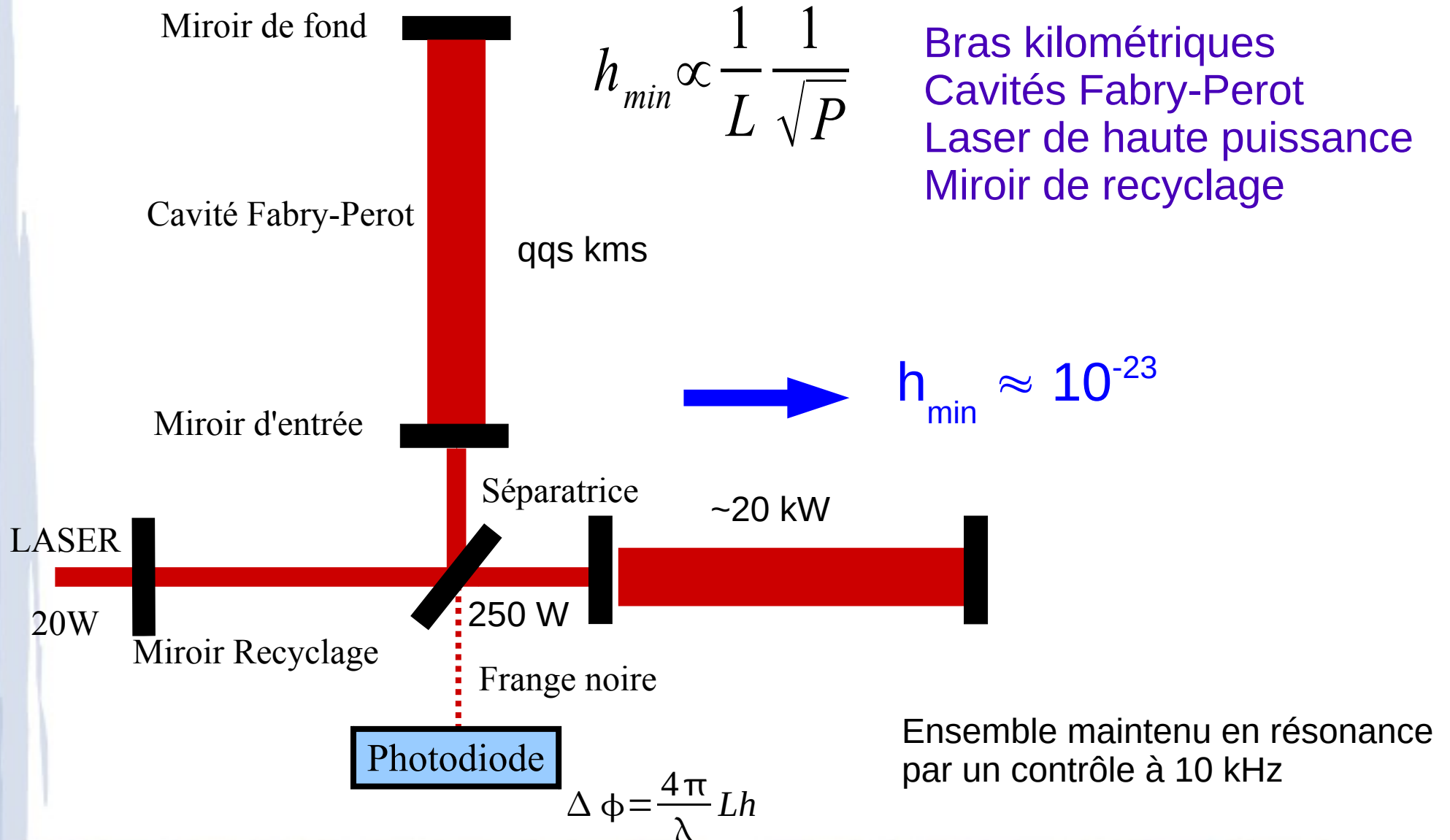
# Détecteurs interférométriques



Bras kilométriques  
Cavités Fabry-Perot

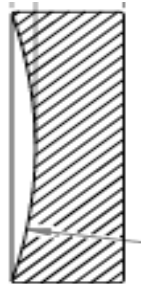
$$h_{min} \propto \frac{1}{L} \frac{1}{\sqrt{P}}$$

# Détecteurs interférométriques



# Détection sur notre bonne veille Terre

- Avoir une masse de référence de la métrique en s'isolant du sol
  - Système d'isolation sismique (limite basse en fréquence)
- Avoir un laser de haute puissance (20/200 W) stable en puissance et en fréquence 24h/24
- Avoir des miroirs de qualité optique à la limite des techniques actuelles
  - Réflectivité de 99.9999 %
  - Courbure de 3-4 km sur 30 cm (flèche de 1  $\mu\text{m}$ )
  - Matériau pour avoir le moins de bruit thermique
- Mettre l'ensemble du système sous-vide ( $\sim 7000 \text{ m}^3$  à  $10^{-9}$  mbar)
- Contrôler en permanence le système (à 10 kHz) pour le garder à son point de fonctionnement optimal



# Un premier réseau mondial de détecteurs

**Virgo (3 km)**



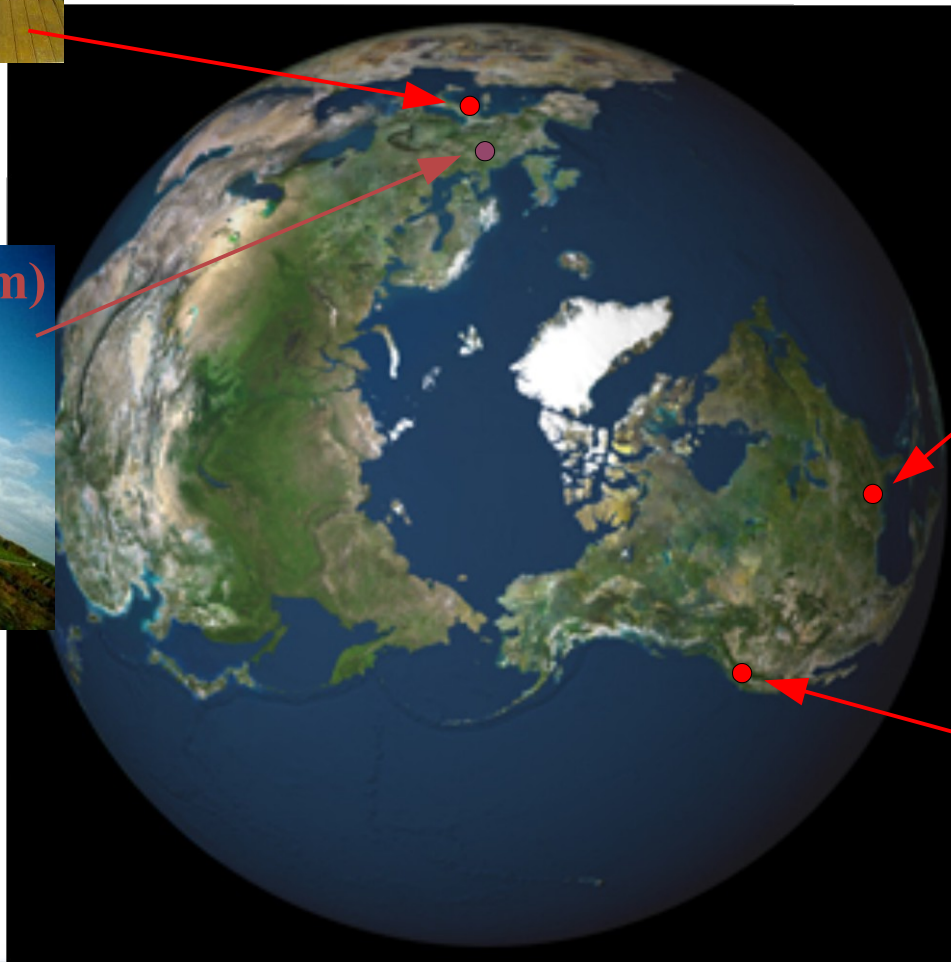
**Livingston (4 km)**



**Geo (600 m)**



**Hanford (2 - 4 km)**



# Et dans quelques années

H1: 4 km



G1: 600 m



V1: 3 km



L1: 4 km

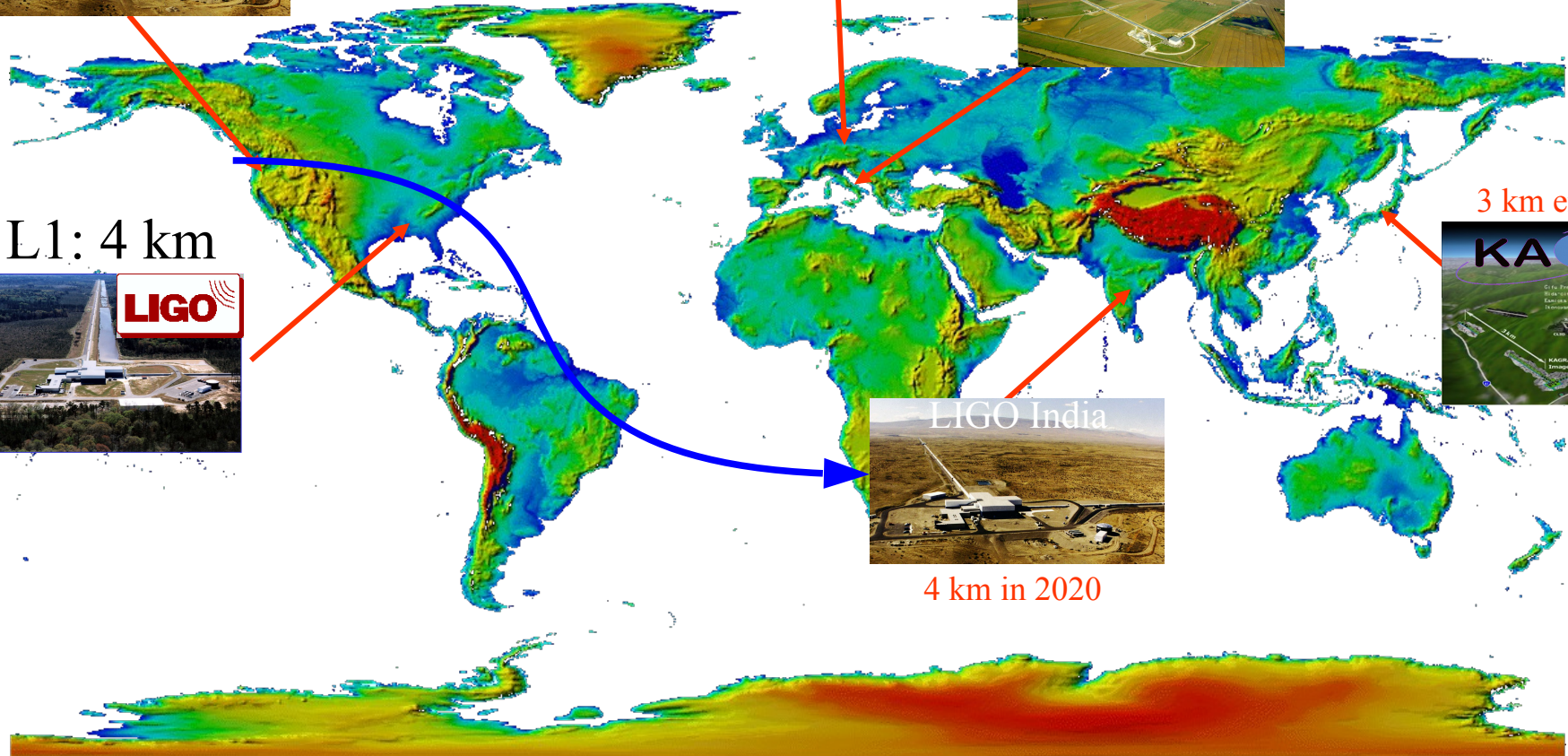


LIGO India



4 km in 2020

3 km en 2017





# 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  
5 filtres passifs intermédiaires

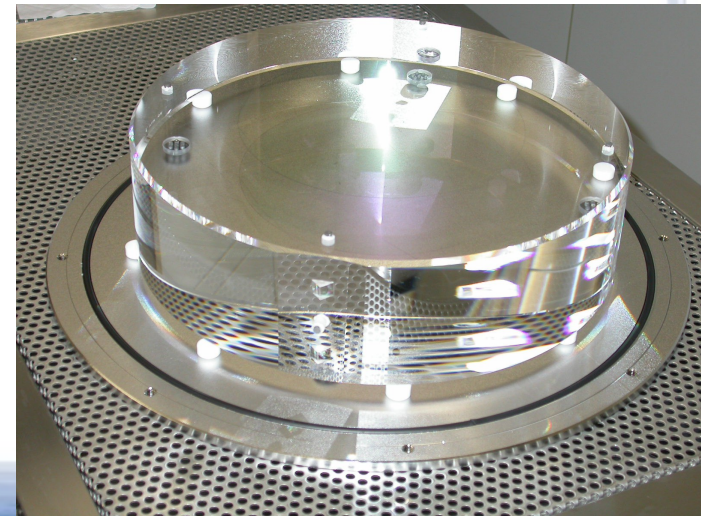
Atténuation sismique:  
~  $10^{14}$  à 10 Hz

# Miroir, mon beau miroir

- A température ambiante la surface du miroir peut bouger  
    —→ masse de + de 10 kg
- Réflectivité définie à mieux que 0.01 % : 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 :

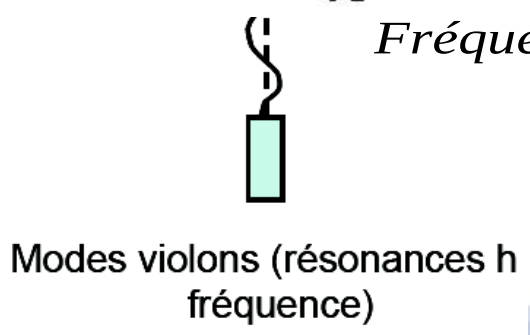
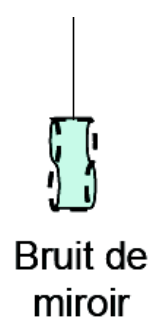
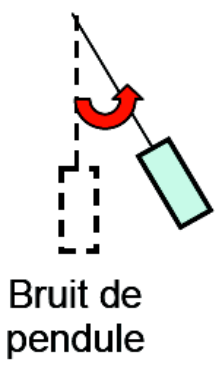
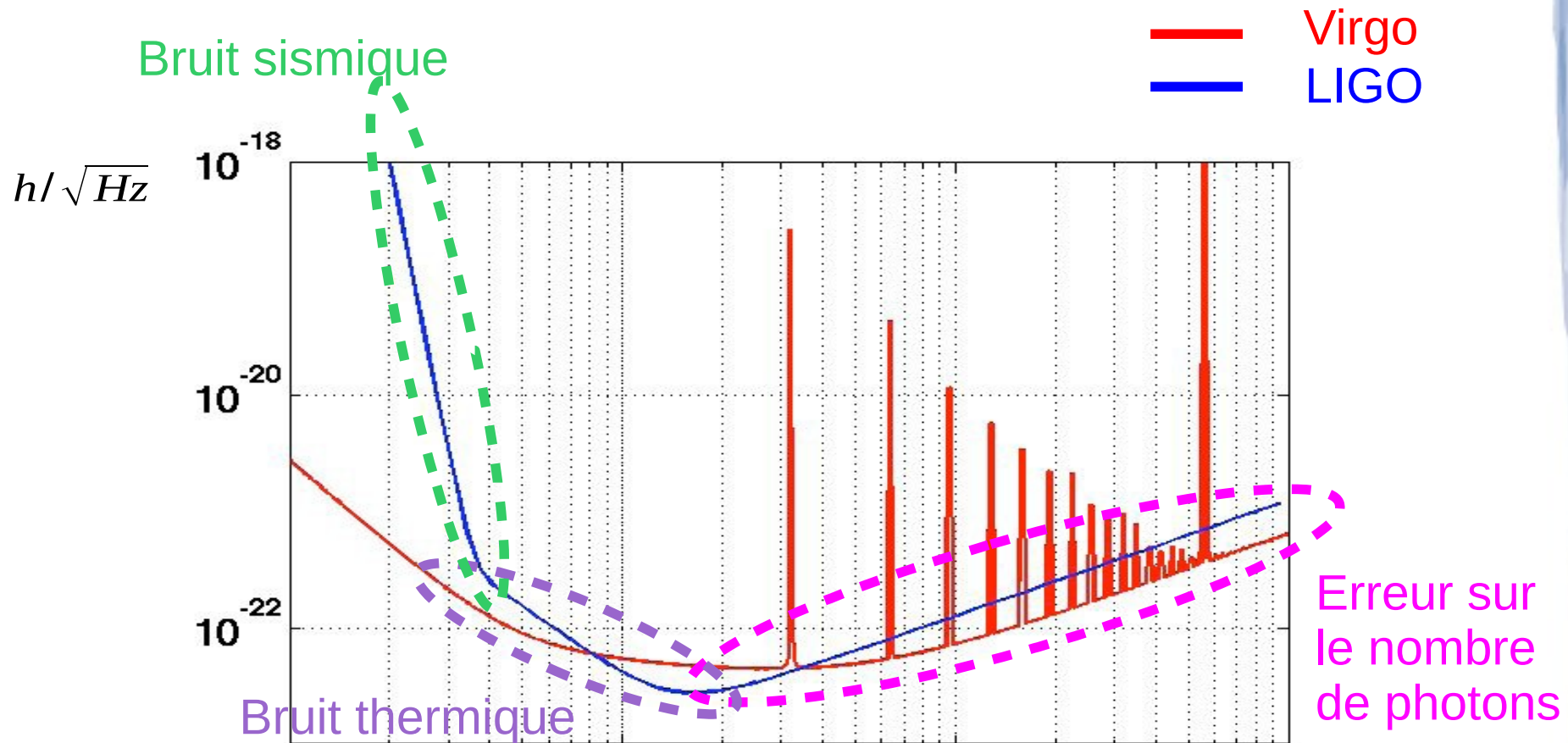
- miroir en silice ( $\text{SiO}_2$ )
- diamètre : 35 cm
- épaisseur : 10 – 20 cm
- masse : 20-30 kg
- dépôt en couches monoatomiques



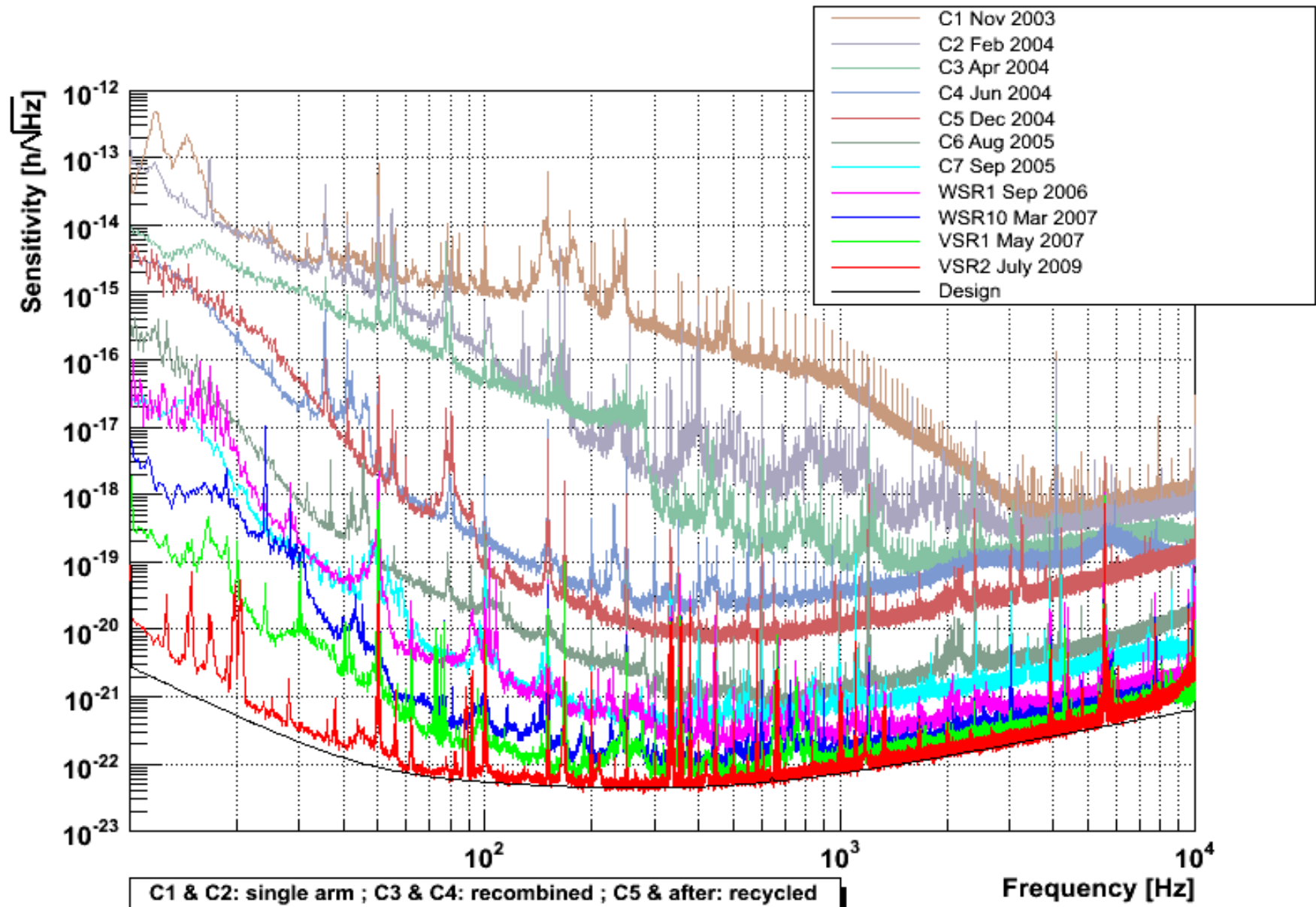
# Autres problèmes possibles

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

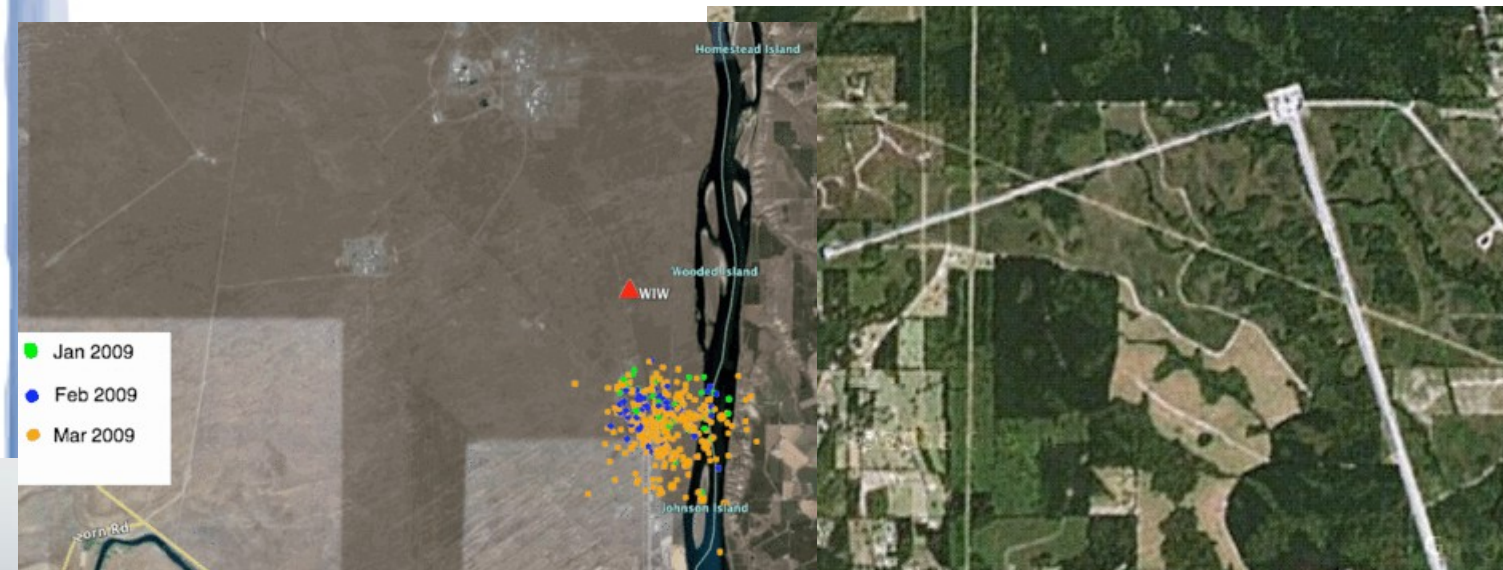
# Sensibilité de l'expérience



# Cela ne se fait pas tout seul



# Expériences dans la vie réelle



Exemples de LIGO  
@ Sam Waldman



# Performances malgré tout ça

- Record de la plus longue durée de lock : 143 hrs (juillet 2009 – Virgo)
- Temps utile pour faire des recherches d'ondes gravitationnelles : 80 % / instrument → 50 % en triple coïncidence
- Si le système perd le contrôle et que le mouvement des miroirs est excité : 30 minutes pour revenir en mode scientifique
- Longueurs:
  - Meilleur contrôle :  $8 \cdot 10^{-16}$  m
  - Au moins un facteur 100 sous la valeur de référence
- Suspension des miroirs avec de la silice (verre) sans aucun problème sur plus d'un an

# Réseau mondial : quelques chiffres

- Nombre de collaborateurs : 190 Virgo / 690 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 1000 canaux pour le comprendre
- Espace disque : 410 000 Go / site / an

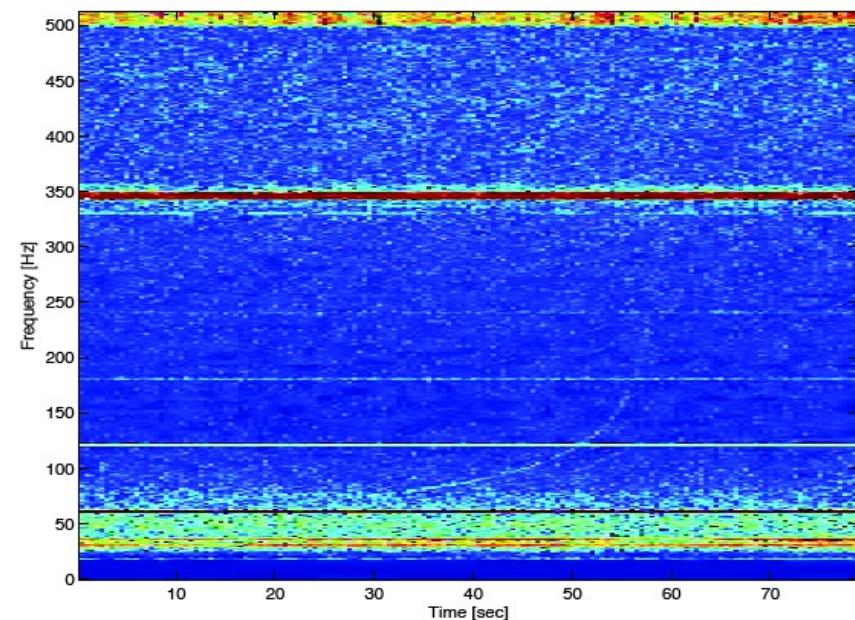
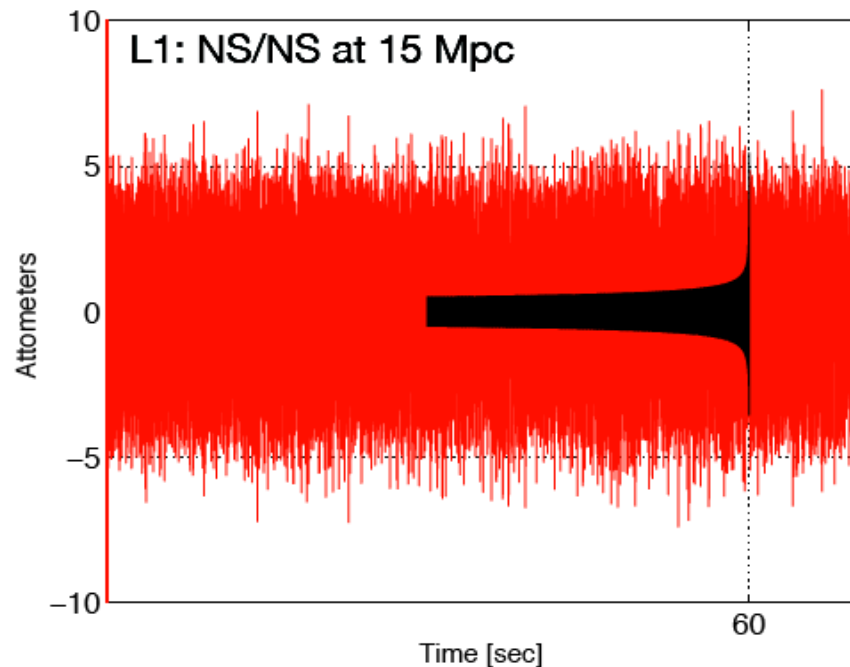


# Analyse des données

- Tenir compte de la nature des objets astrophysiques recherchés
- Différents types d'analyse selon le type de signal
- Savoir reconnaître un problème du/des détecteurs par rapport à un vrai événement
  - taux d'événements en sortie d'analyse ( $\sim 10/s$ )
  - taux attendu d'OG : au mieux 1 sur trois ans de données (pour la première génération)
  - Rapport 1 / 100 000 000
- Reconstruire les caractéristiques de cet événement

# D'autres difficultés

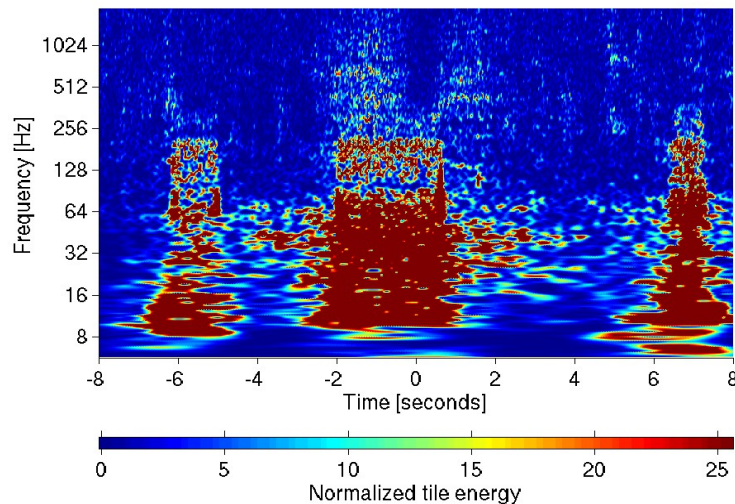
- Pas de déclenchement de l'expérience, ni de conditions expérimentales connues
- Rapport signal sur bruit et très faible comparé aux observatoires électromagnétiques



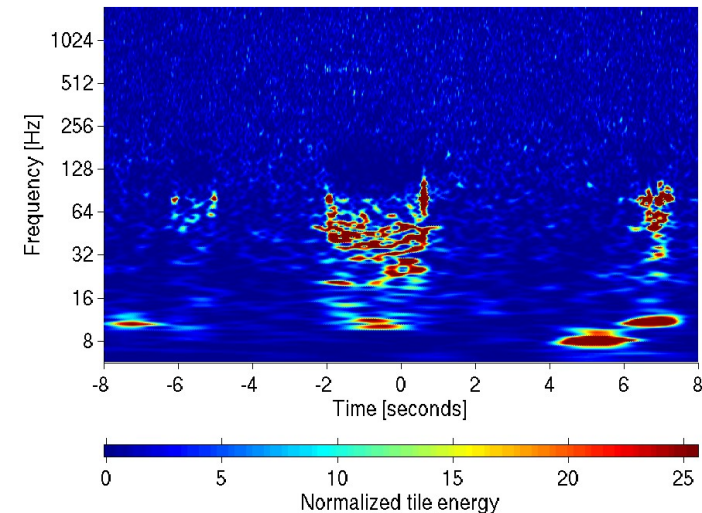
# Nettoyer les données

- 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



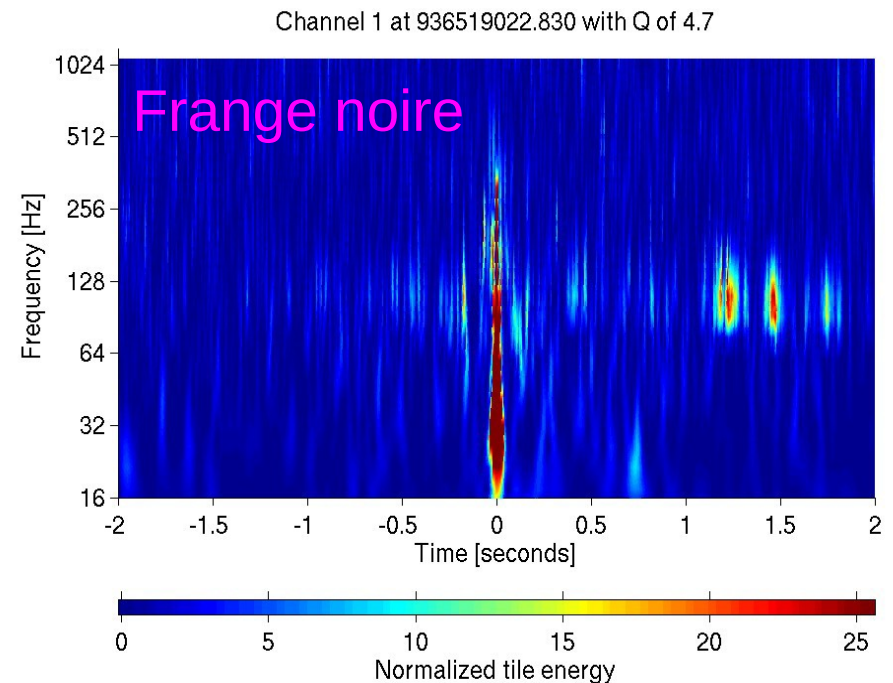
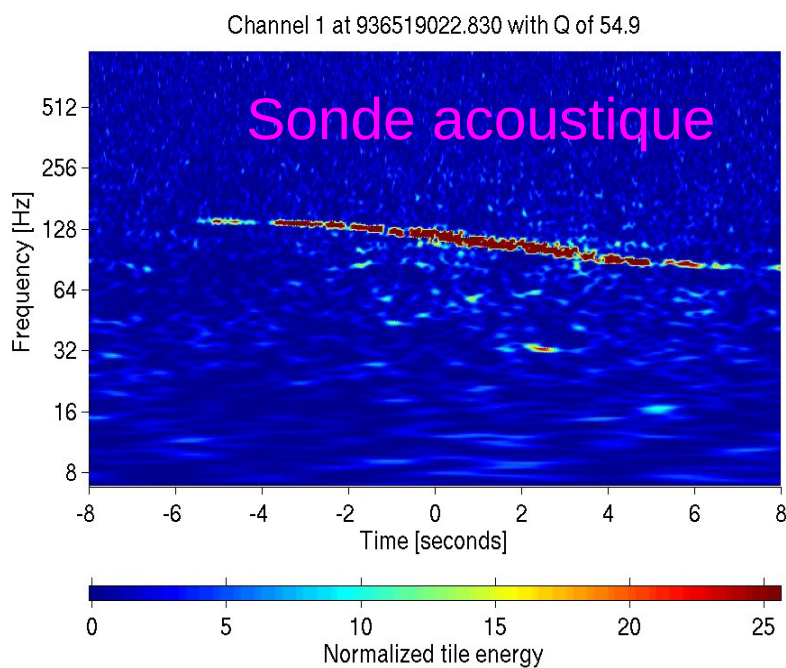
Courant envoyé sur une bobine



- Travail important sur la compréhension des bruits du détecteur

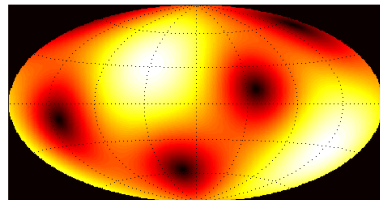
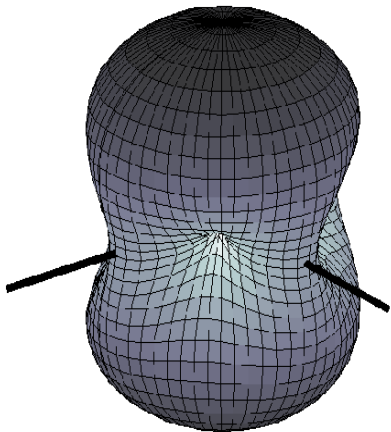
# D'autres problèmes ....

- Système de climatisation – couplage magnétique avec les aimants
- Avions

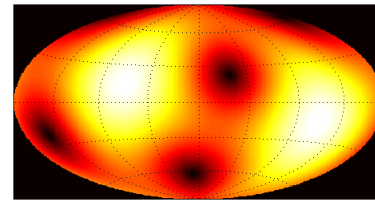


# Analyse en réseau

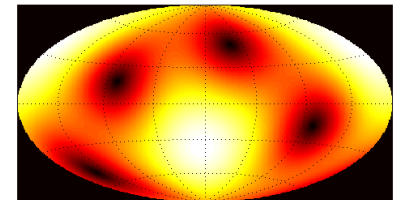
- Beaucoup d'avantages:
  - Meilleure discrimination des faux événements
  - Les ITFs ne sont pas directionnels mais n'ont pas la même couverture sur l'ensemble du ciel
  - 3 sites permet de reconstruire l'événement
    - Position de la source, précision  $< 1^\circ$
    - Reconstruction de la forme d'onde



Hanford



Livingston

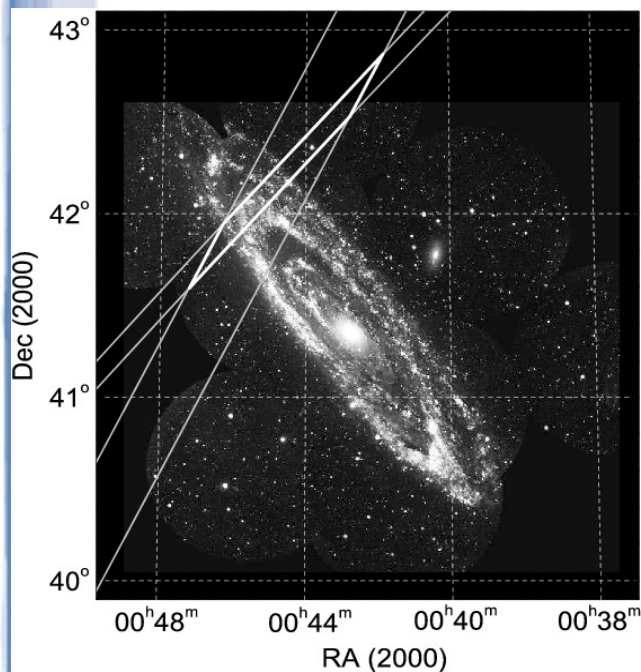


Virgo

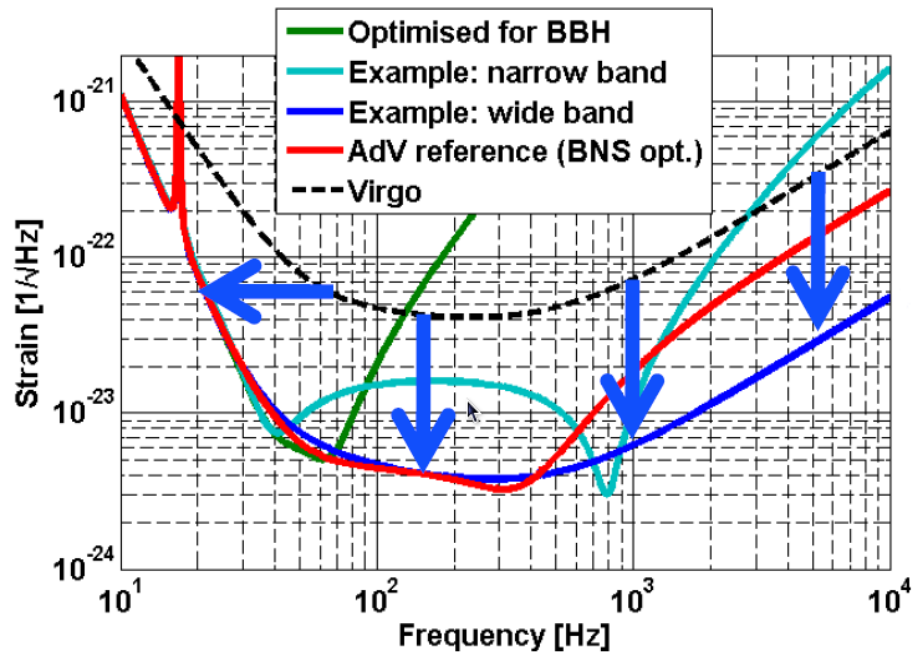
# Premiers résultats scientifiques

- Toujours pas d'OG détectée
- Mais le domaine commence à sortir des résultats contraignant:

GRB 070201

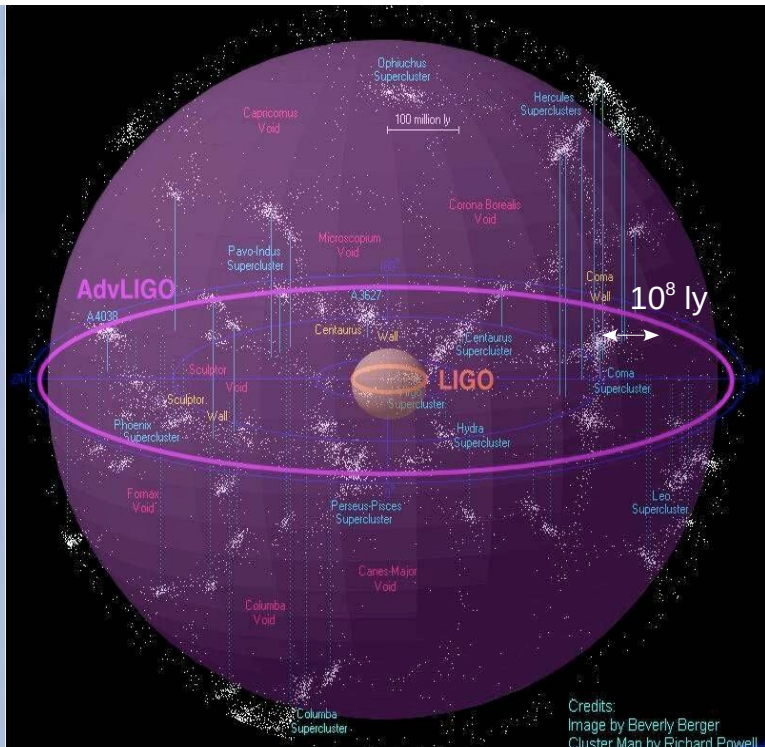


- Pulsars : le ralentissement ne peut pas être expliqué uniquement par les OG ( $\epsilon < 10^{-8}$ )
- Limites sur les sursauts gamma
- Premières contraintes sur les modèles cosmologiques



# D'ici quelques années

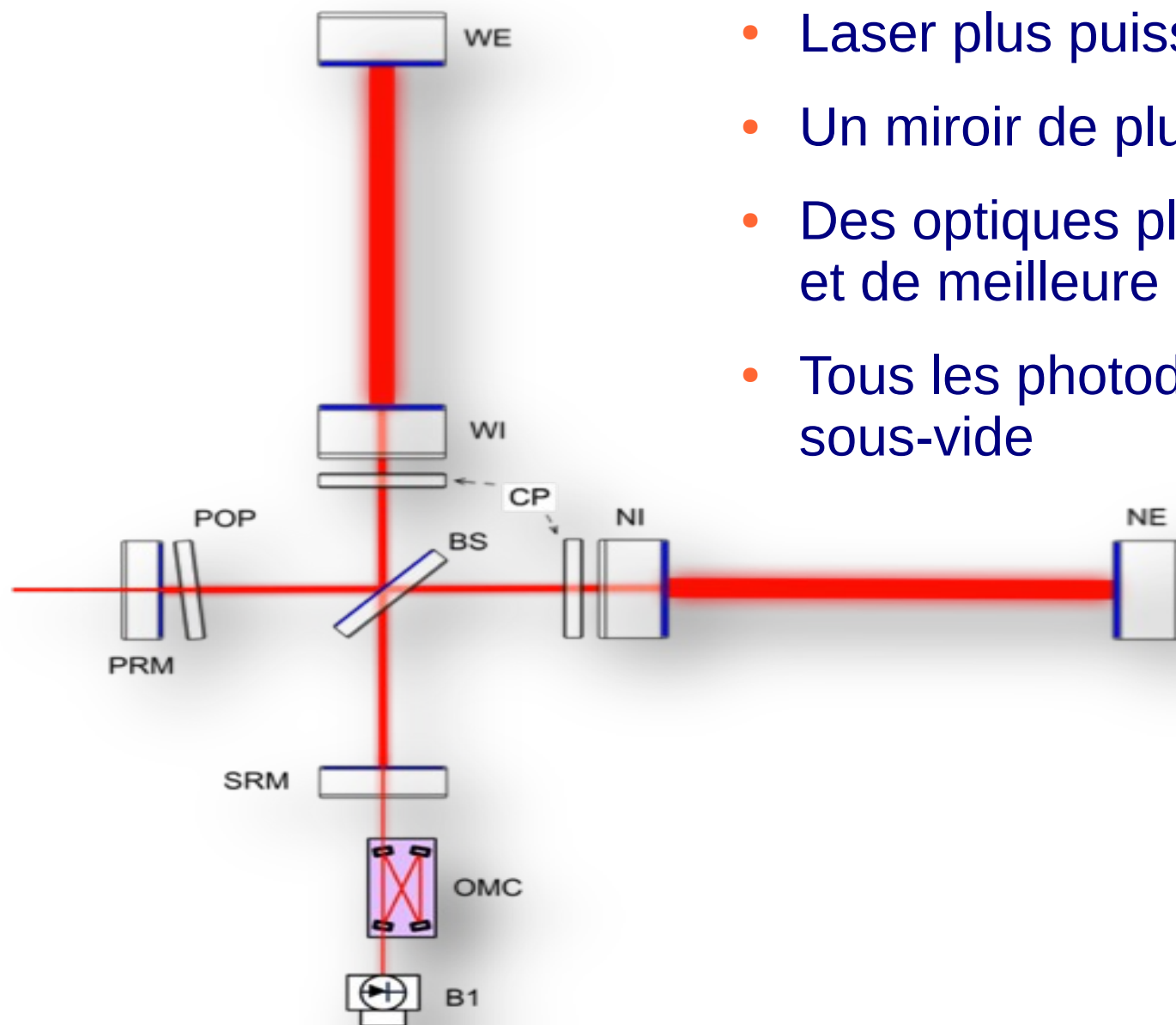
- La prochaine génération de détecteurs est déjà en route:
  - Idée : gagner un facteur 10 par rapport à LIGO/Virgo -> gain 1000 volume



- Distance probable pour coalescence :
  - ~150 Mpc NS/NS
  - ~900 Mpc BH/BH
- Détection probable : plusieurs événements/an
- LIGO pourra prendre des données dès 2015, Virgo un an plus tard

Credit: R.Powell, B.Berger

# A quoi cela va ressembler ?

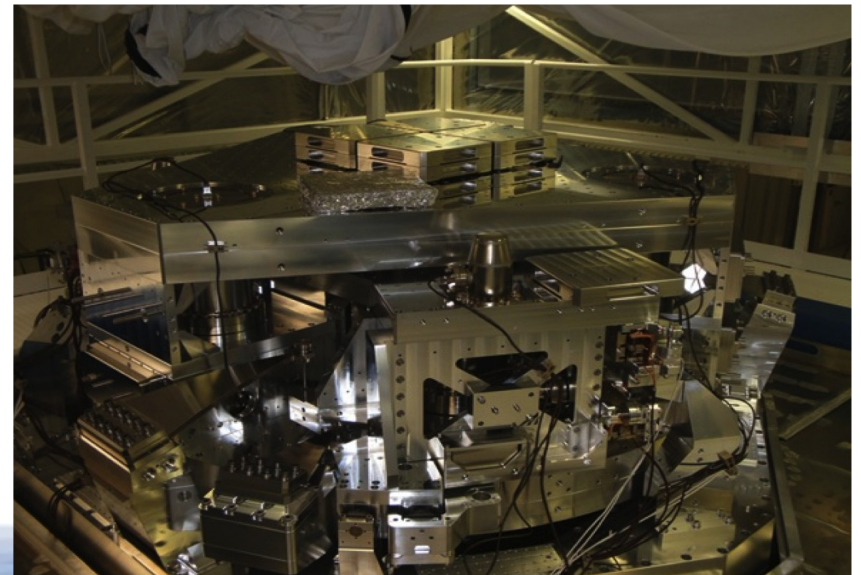
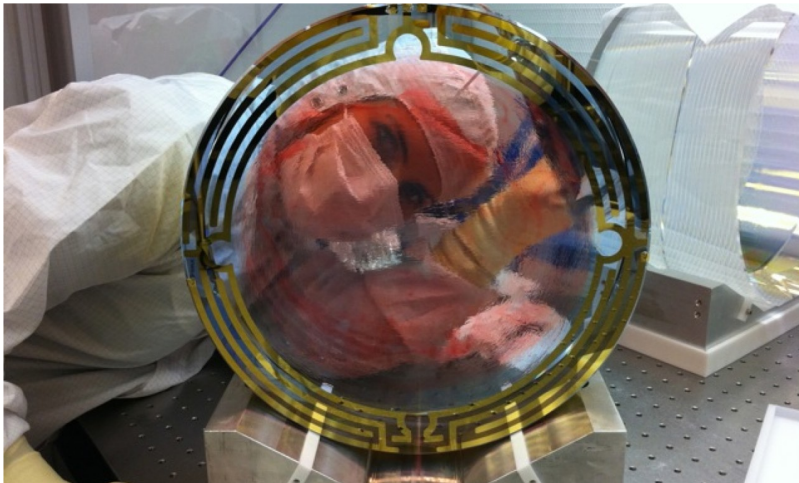


- Laser plus puissant
- Un miroir de plus
- Des optiques plus imposantes et de meilleure qualité
- Tous les photodétecteurs sous-vide



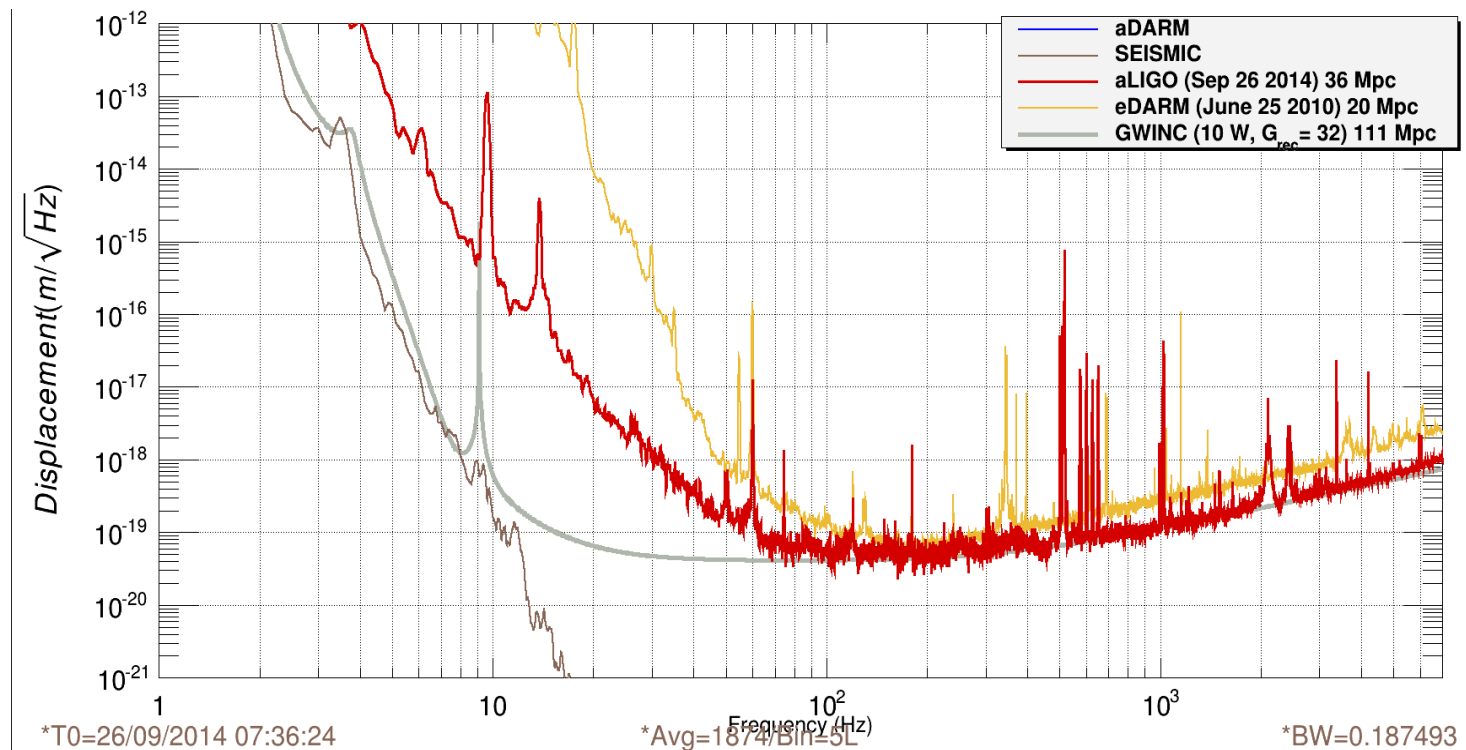
# Advanced LIGO

- Les premiers à avoir commencer à modifier leur instrument
  - Modification de leurs suspensions → gain basse fréquence
  - Miroir plus massif → gain en bruit thermique
  - Changement actuateurs sur les miroirs : de bobines à électrostatique



# Advanced LIGO

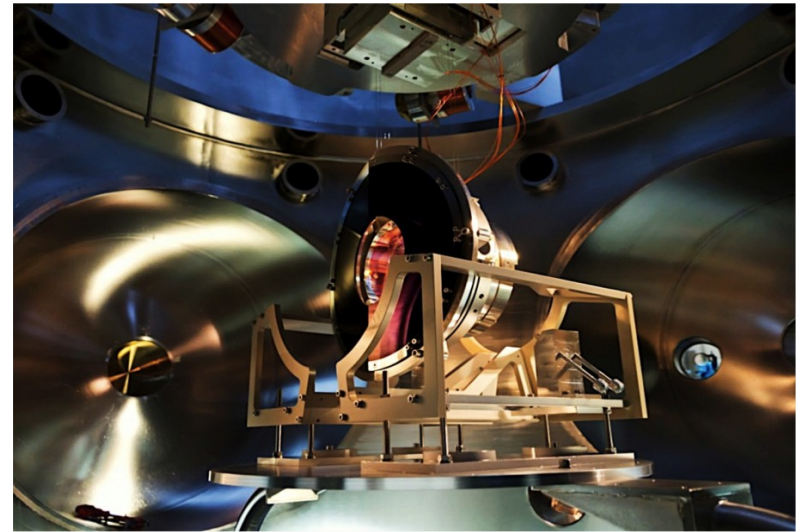
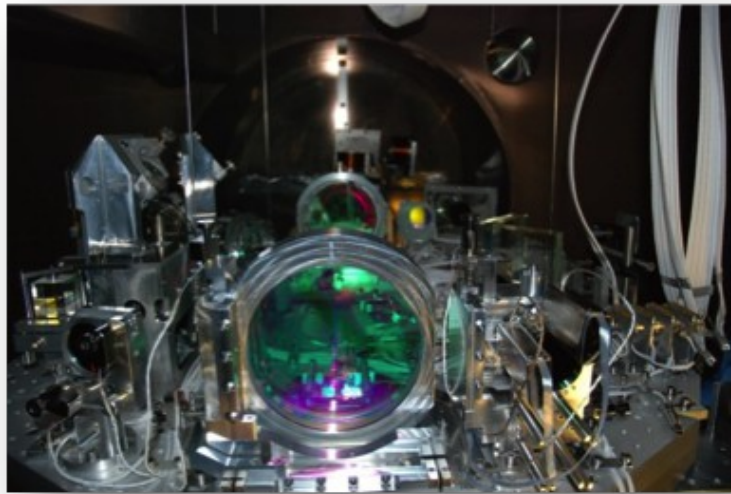
- Le passé ne fut pas perdu ...
  - En 5 mois une meilleure sensibilité que la première version de LIGO



Première prise de données scientifiques certainement en 2015

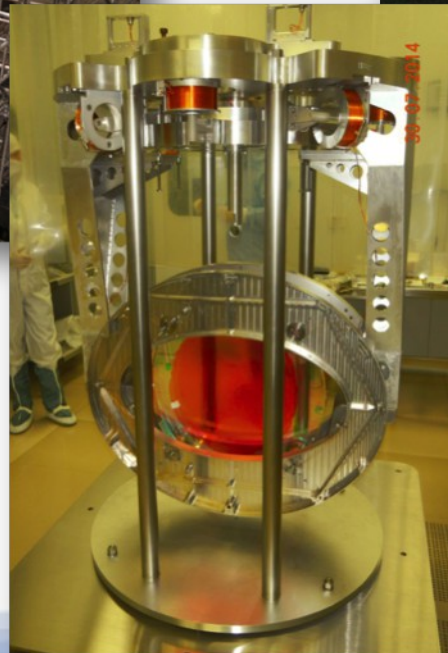
# Advanced Virgo

- Une année de décalage du fait de différentes études sur le design optique des cavités
- Les suspensions de Virgo n'ont besoin que de peu de modifications
- La partie injection du laser est installée et quasi prête

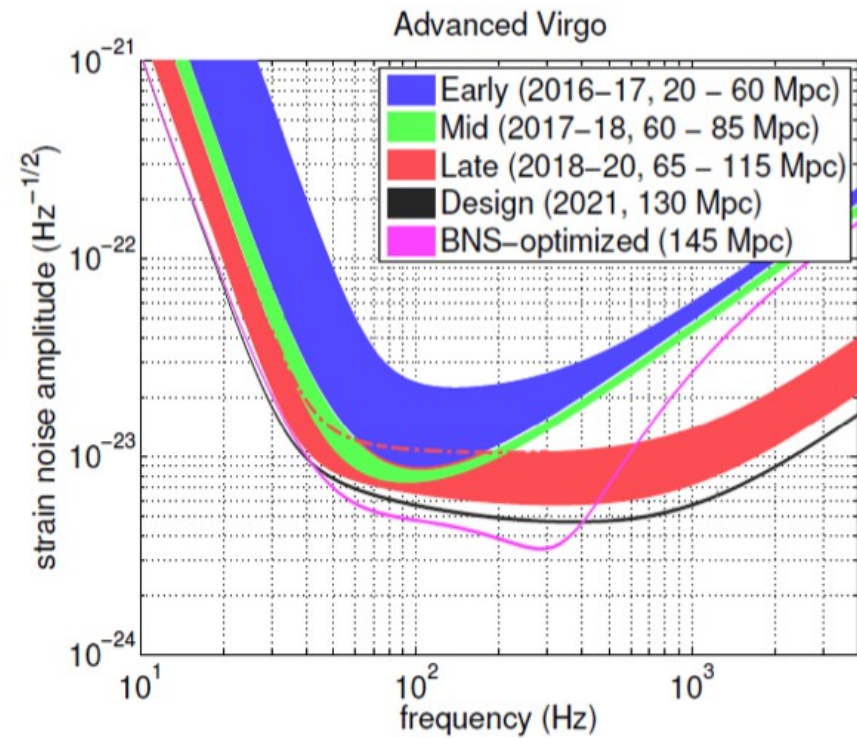
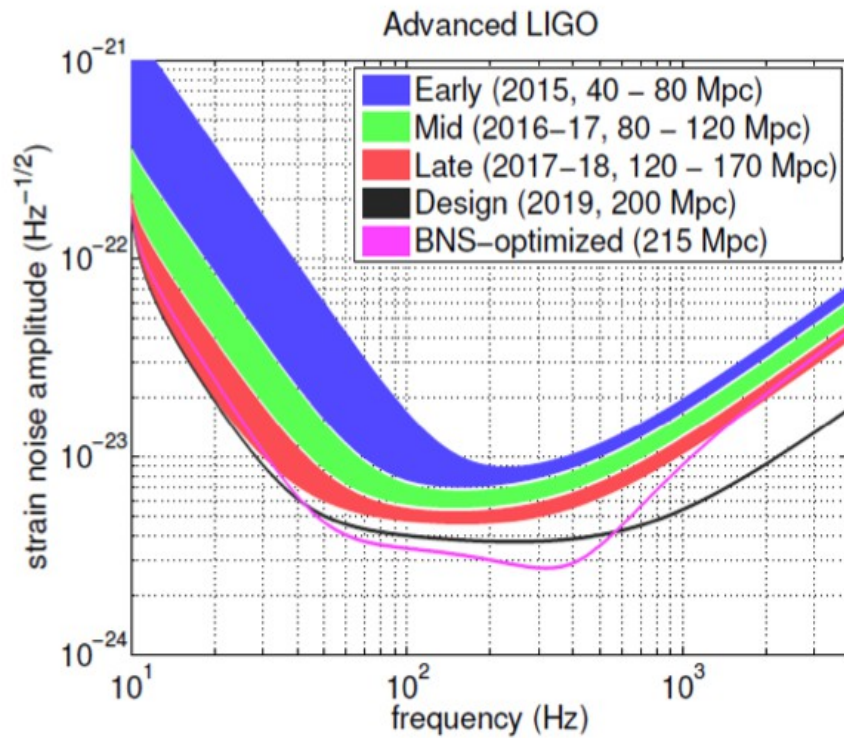


# Advanced Virgo

- Pendant ce temps là sur le reste de l'interféromètre



# Comment cela va évoluer ?



Epoch	Estimated Run Duration	$E_{\text{GW}} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		$5 \text{ deg}^2$	$20 \text{ deg}^2$
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

# KAGRA

- Détecteur souterrain au Japon – arrivée prévu entre 2017 et 2019
- Meilleure couverture du ciel – déjà prévu d'intégrer le réseau LIGO-Virgo
- Tests de suspensions cryogéniques



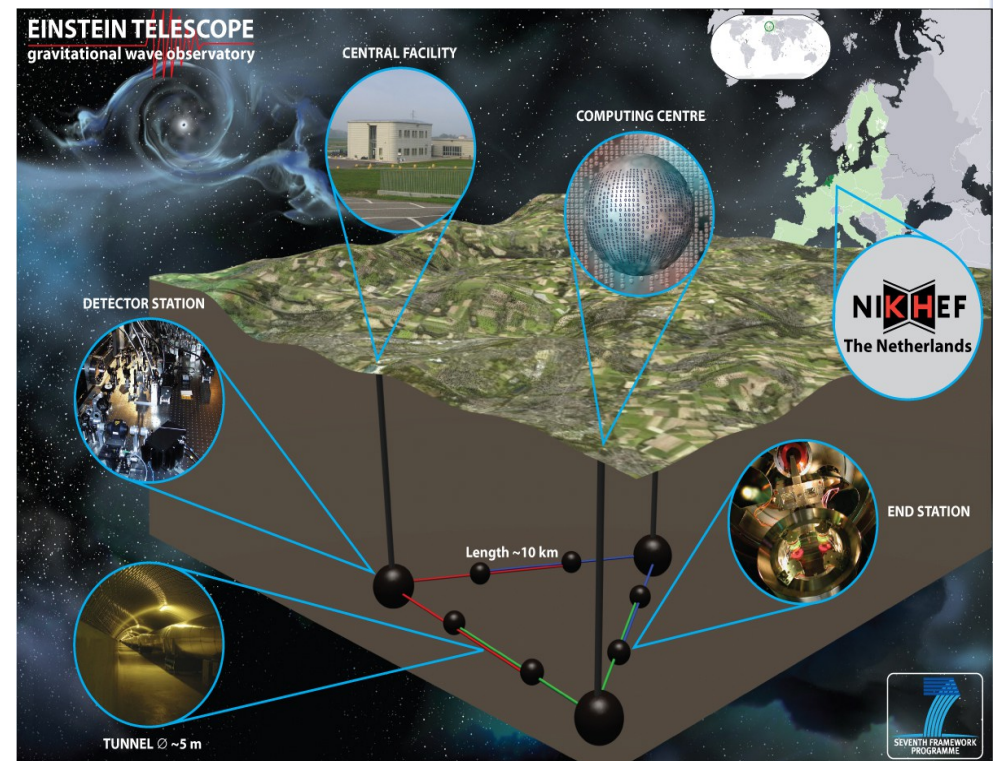
# Si l'on regarde encore plus loin dans le temps

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

## Points forts :

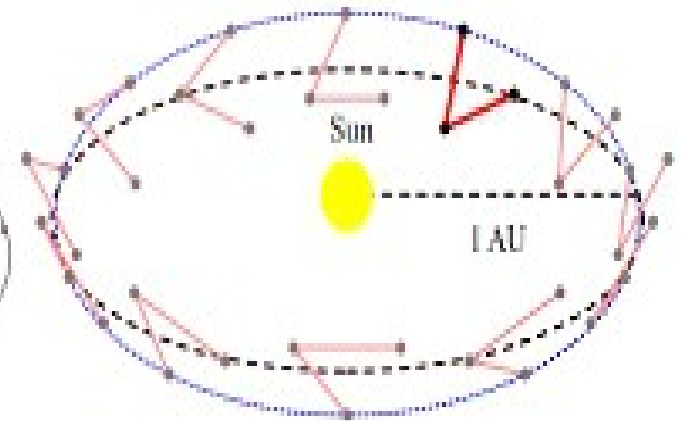
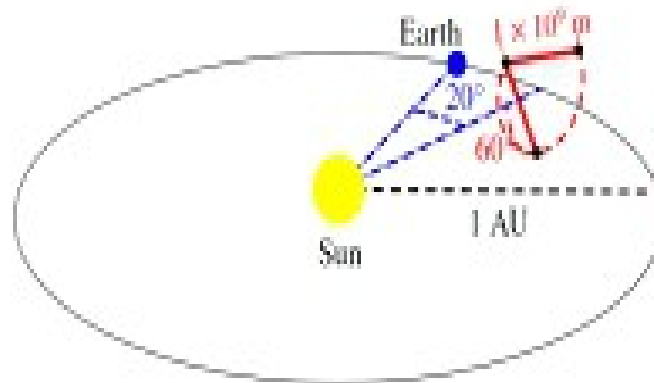
- Souterrain – moins de bruit sismique
- Cryogénique
- Bras de 10 km
- 3 instruments redondants
- Reconstruction de la position de la source

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



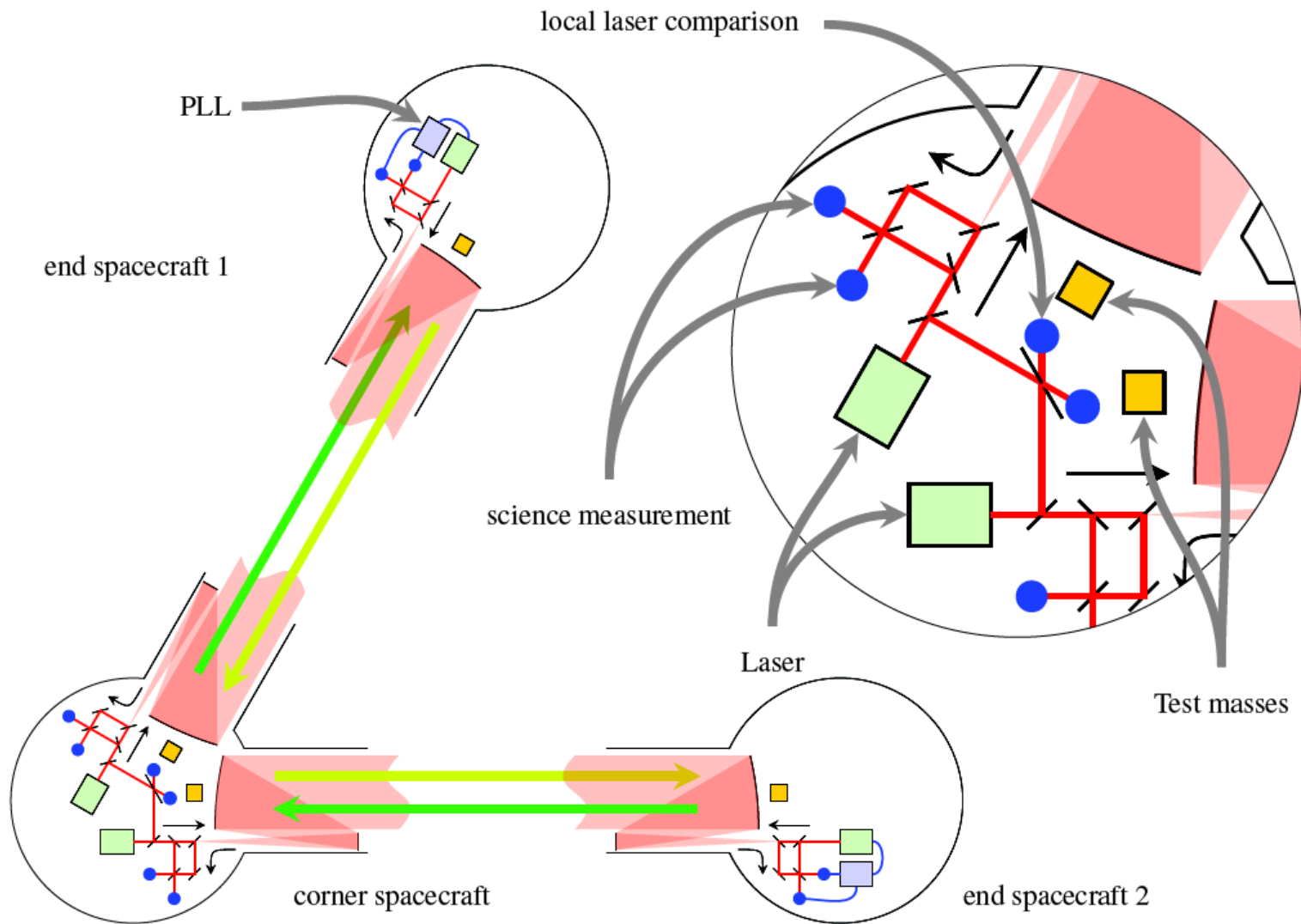
# Changeons de taille ...

- Essayons-nous au spatial avec eLISA/NGO
- 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

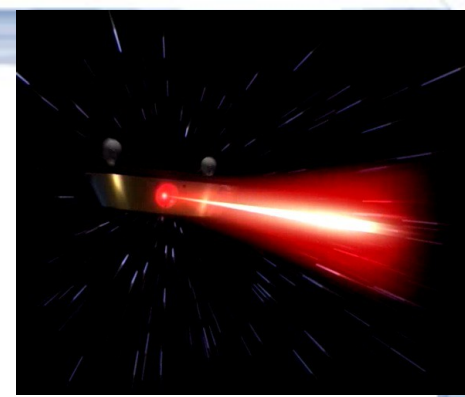




# Configuration optique



# Le principe de base



- Avoir 1 interféromètre
- 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 mère 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 les mouvements du satellite (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
- Trouver et sécuriser son financement ...

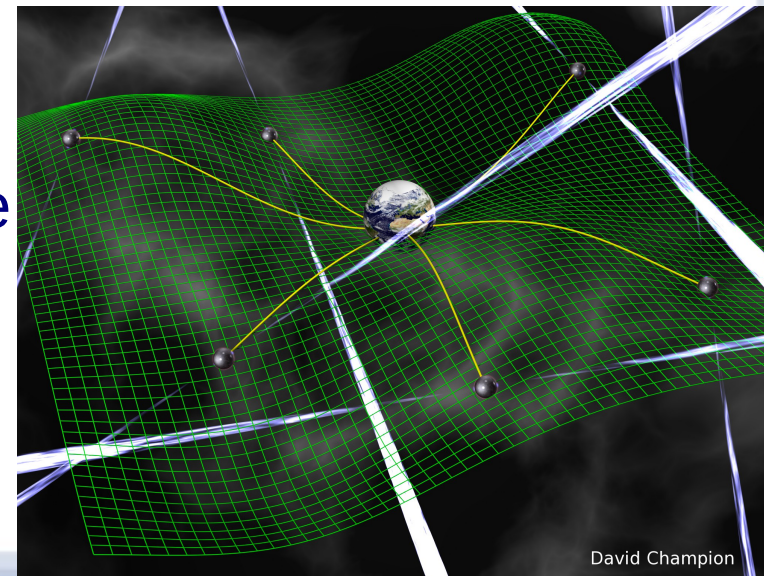
# Une première étape

- LISA Pathfinder – décollage prévu en 2015
- Tester une partie des technologies nécessaires pour eLISA
  - Est-on capable d'avoir une masse en chute libre dans l'espace ?
  - Comment va se comporter sur le long terme l'ensemble mécanique + optique ?
  - Quelle précision peut-on avoir sur la position d'un satellite ?
- Idée : réduire un bras de 1 million km à 10 cm
- Passage important pour s'assurer la réussite de eLISA

# Encore plus loin : plusieurs (milliers) d'années lumière

- Un laser est à la fois une longueur et une horloge très stable
- Il existe dans notre galaxie (et d'autres) des « horloges » quasi parfaites : les pulsars (émission de pulses)
- Si l'on peut suivre le temps d'arrivée des pulses on pourrait être à même de détecter une variation de l'espace-temps
- Sources observables : les coalescences de trous noir super massifs (ie comme celui du centre de notre galaxie)
- Nécessaire d'avoir une petite dizaine de pulsars avec une bonne chronométrie

**Une détection d'ici 2020 ?**



# Challenges de 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 triviales : beaucoup de non stationnarités, espace des paramètres de recherche important



## 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

**Merci de votre attention !**