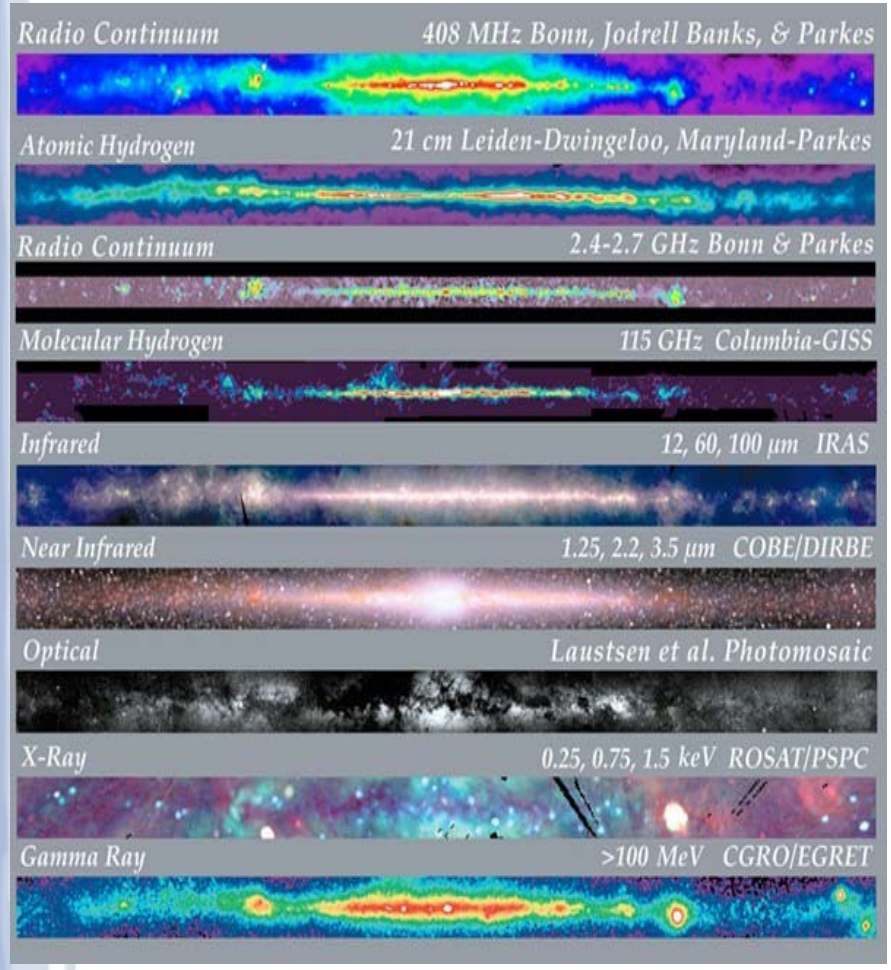
Les ondes gravitationnelles

Écouter l'Univers avec LIGO et Virgo

Nicolas Leroy
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

Séminaire MIPEGE – 20 avril 2011

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 dense restent inaccessibles
- Idée : utiliser d'autres messagers:
  - Neutrinos
  - Ondes gravitationnelles

Commençons ...

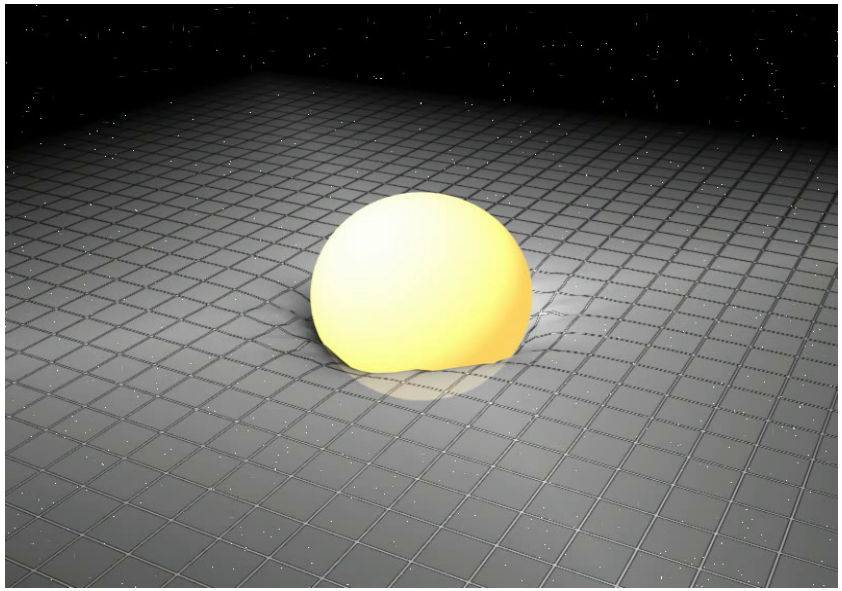
- Expliquer ce que sont les OG
  - Un peu de relativité
  - Comment les créer
  - Comment les détecter
- Détecteurs au sol : LIGO – Virgo
  - Bruits de fond: sismique, thermique, ...
  - Comment détecter une OG
  - Utiliser un réseau de détecteurs
  - Dans un proche futur (2015)
- L'espace : LISA

Courbure et espace-temps

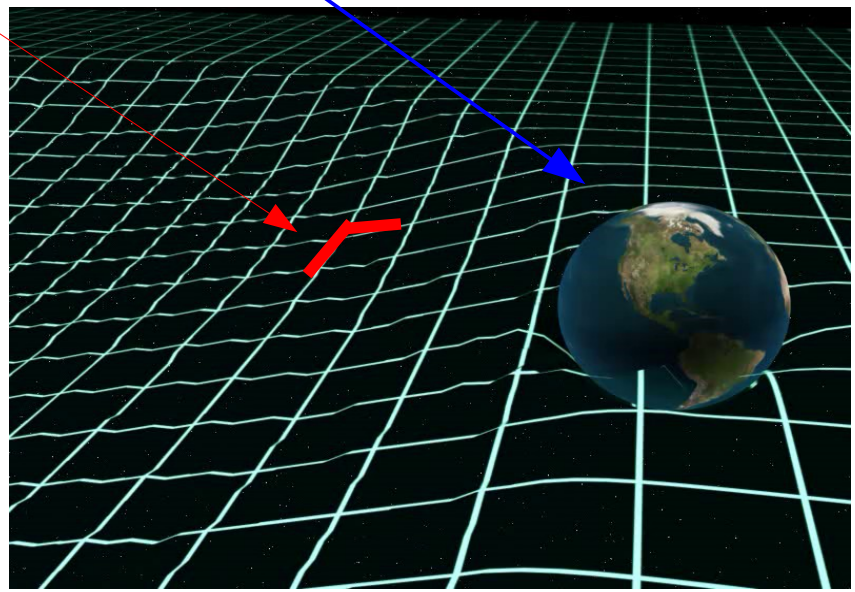
- Équation d'Einstein :

  « *La matière indique à l'espace-temps comment se courber, l'espace-temps indique à la matière comment se déplacer* »
  J.A. Wheeler

$$G_{\mu\nu} = 8\,\Pi\, T_{\mu\nu}$$



Un objet massif courbe l'espace-temps



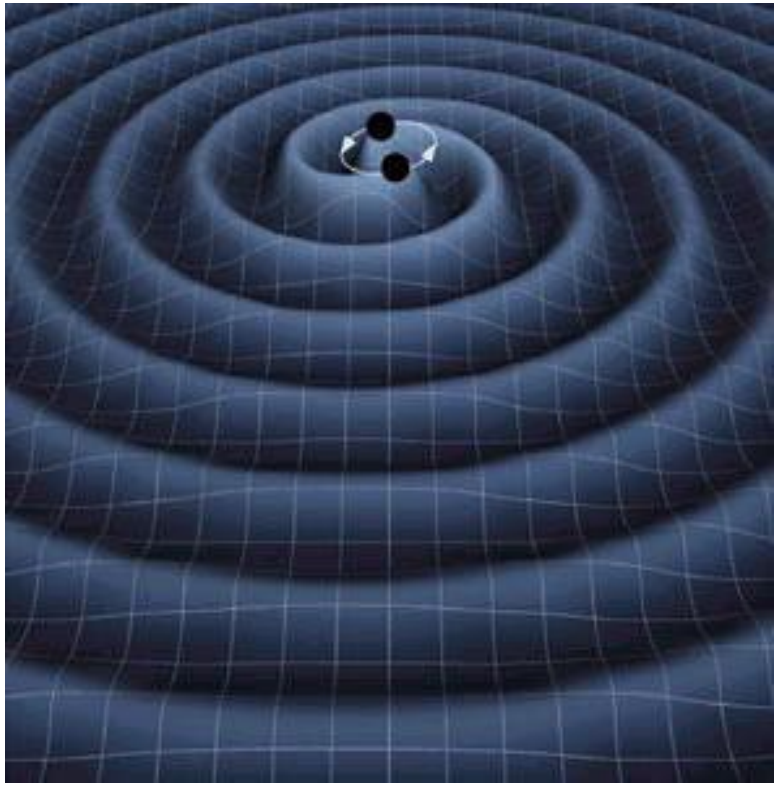
Un objet se déplace dans l'espace-temps courbé par les autres objets

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)

Ondes en relativité générale

- Mesure de distance:

  espace-temps plat, non perturbé (Minkowski)

$$ds^2 = cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

  espace-temps en Relativité Générale

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

  $g_{\mu\nu}$ traduit la courbure de l'espace-temps

  en cas d'une perturbation de faible amplitude : $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$

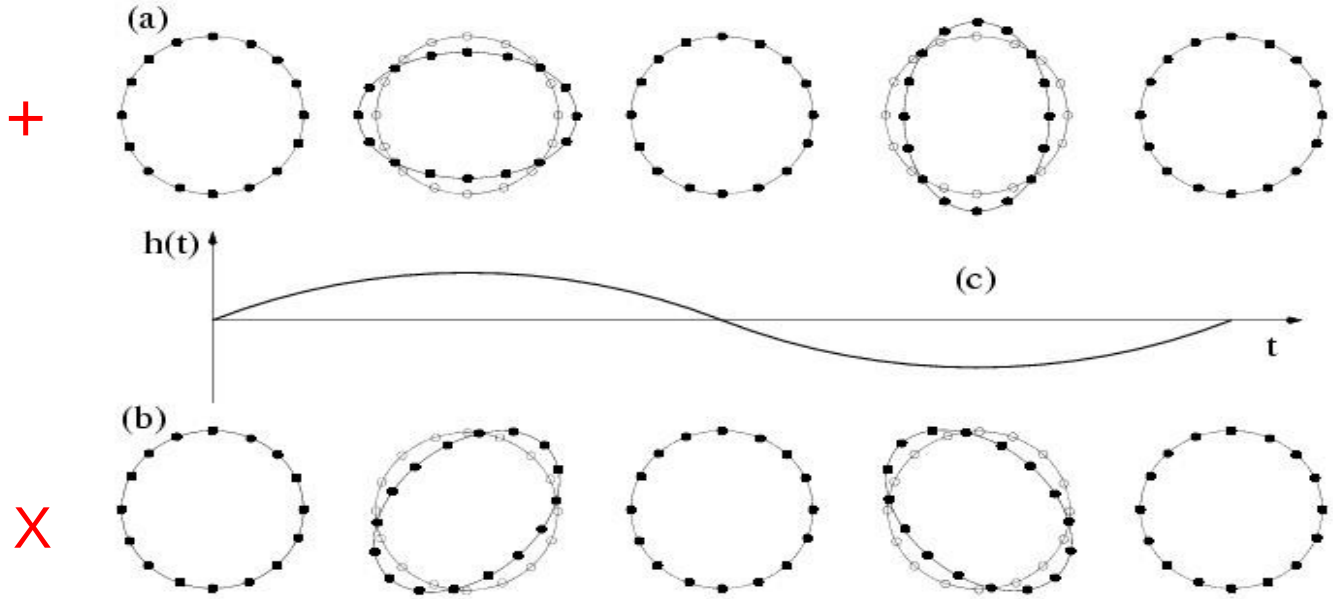
  $h_{\mu\nu}$ obéit à une équation de propagation

  - Propagation à la vitesse c (selon z)
  - Onde transverse (en x,y)
  - 2 états de polarisation (+ et x)
  - Moment quadrupolaire

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

Effet sur un ensemble de masses libres



Les produire en laboratoire ?

- Prouver l'existence des OG : peut-on faire comme Hertz avec les ondes électromagnétiques ?
- Puissance émise : $$P = \frac{G}{5c^5} \langle \dddot{Q}_{\mu\nu} \dddot{Q}^{\mu\nu} \rangle$$

Moment quadrupolaire: quantifie écart à la symétrie sphérique

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

facteur astronomiquement pénalisant !

source	distance	*h*	*P* (W)
Barreau d'acier, 500 T, ∅ = 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**

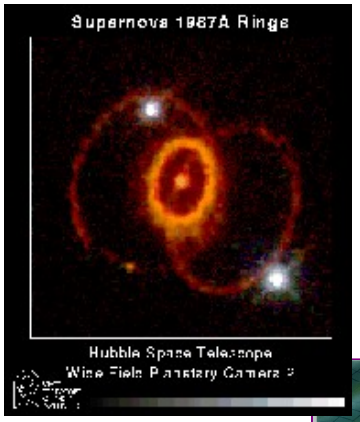
Supernovae
10 $M_\odot$ @ 10 kpc **$h \sim 10^{-21}$**

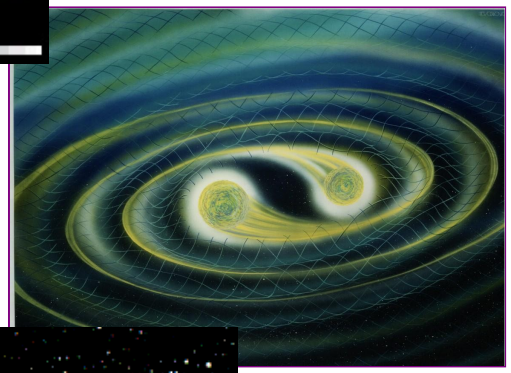
NS-NS @ 10 Mpc **$h \sim 10^{-20}$**

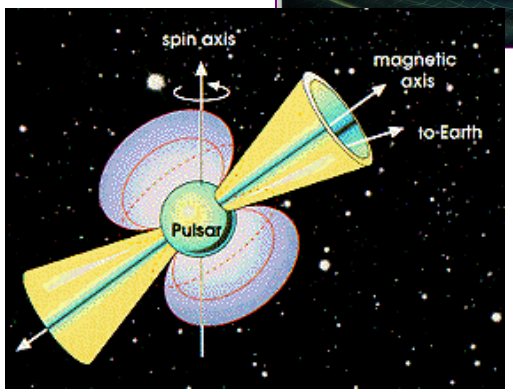
1 pc = 3.26 al = 3.09 10^{16} m

Quelles sources ?

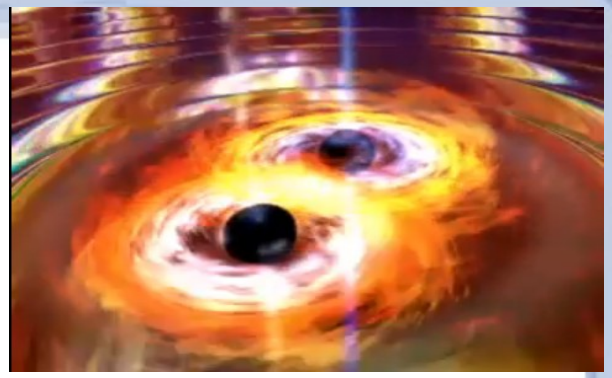
- Impulsionnelles
  - Supernovae
  - Désexcitation de trou noir
- Système binaires
  - Couples étoiles à neutrons
  - Couples de trous noirs
  - Couple mixte
- Sources périodiques (pulsars)
- Fond stochastique
- Autres ?





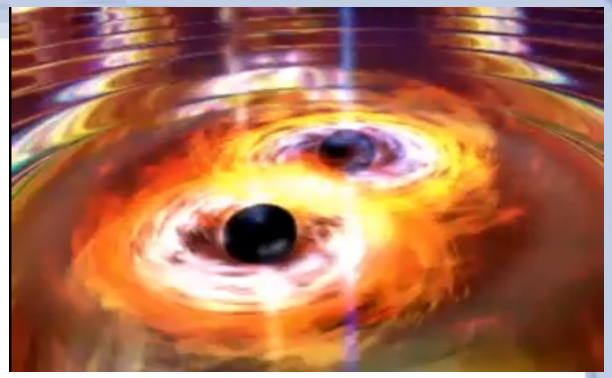


Coalescence de binaires

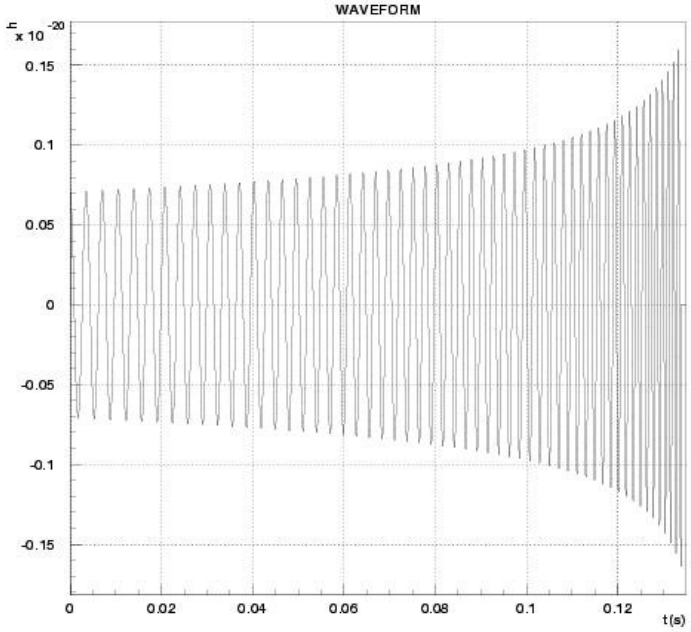


- Couples objets compacts en rotation
  - Perte d'énergie en OG
  - Perte de moment angulaire
  - Rapprochement des orbites
  - Formation d'un trou noir

Coalescence de binaires



- Forme d'onde très bien connue théoriquement : calcul analytique, dépend uniquement des masses et vitesse de rotation

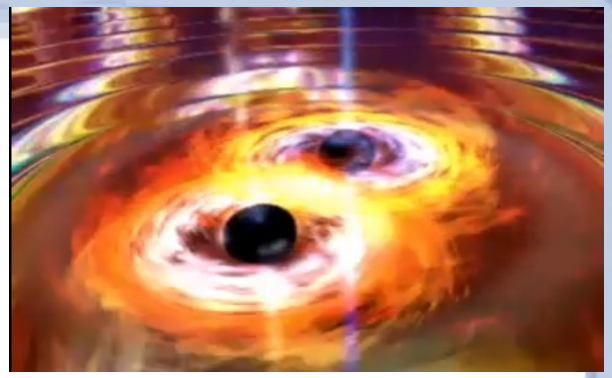


$$h \propto \frac{M}{D} \; et \; f \propto \frac{1}{M}$$

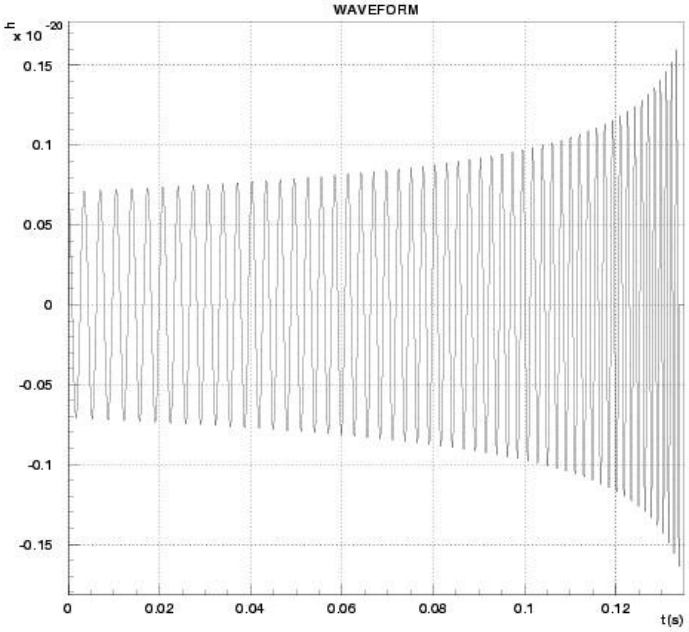
Étoiles à neutrons

- Simulation numérique nécessaire pour la phase du plongeon, vieux problème (1977), sur le point de converger

Coalescence de binaires



- Forme d'onde très bien connue théoriquement : calcul analytique, dépend uniquement des masses et vitesse de rotation

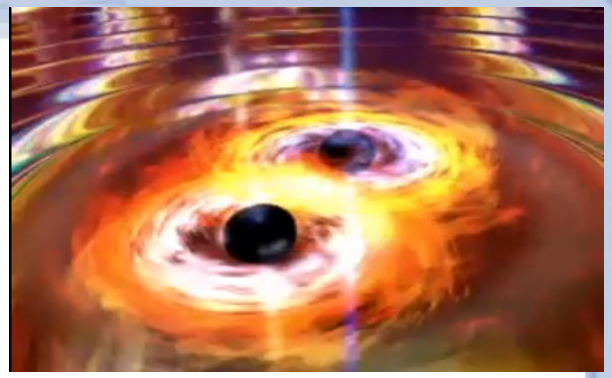


$$h \propto \frac{M}{D} \; et \; f \propto \frac{1}{M}$$

Trou noir et étoile à neutrons

- Simulation numérique nécessaire pour la phase du plongeon, vieux problème (1977), sur le point de converger

Coalescence de binaires



- Quelques chiffres :
  - TN-TN : 10 $M_\odot$

    trous noirs initiaux : 30 km

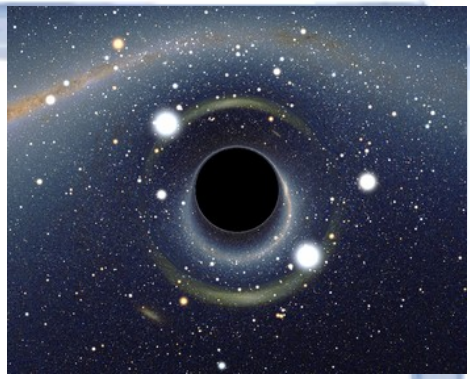
    trou noir final : 60 km

    à 1500 km $\Delta L/L \sim 10^{-3}$ .... à 10 Mpc $\Delta L/L \sim 10^{-20}$
  - Energie transporté est énorme : 10^{47} J

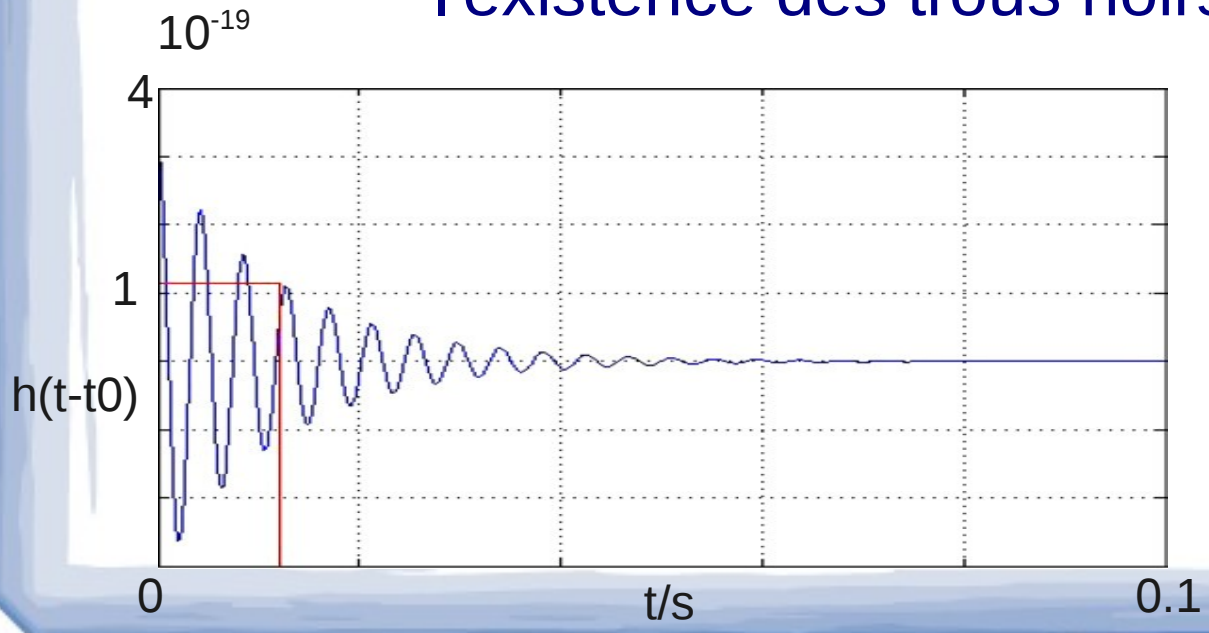
    > 10^{20} luminosité du Soleil (10^{27} J/s)
  - Incertitude sur le taux d'événement :

    NS/NS : 0.001 -> 1 /an @ 20 Mpc
  - Durée : quelques secondes à plusieurs minutes

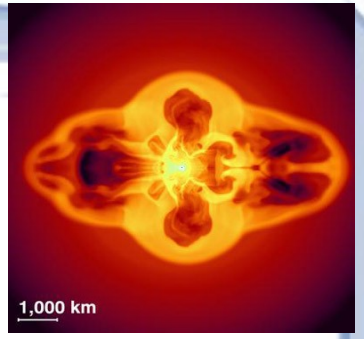
Trous noirs



- Formation précise reste mal connue
  - Beaucoup de travail en simulation numérique
- Toutefois leur désexcitation est bien connue
  - Elle ne dépend que de la masse de l'objet
  - L'une des manières les plus fiable pour confirmer l'existence des trous noirs



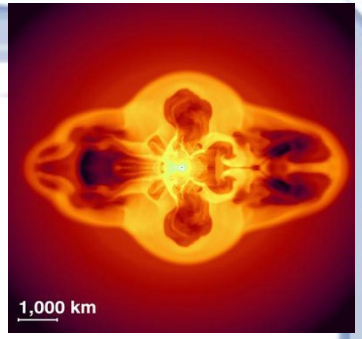
Supernovae



- Effondrement gravitationnel d'une étoile massive ($M > 12\ M_\odot$)
  - Étoile massive en fin de vie
  - Coeur ne compense plus le poids de l'étoile
  - Effondrement rapide pour former étoile à neutrons ou trous noirs
  - si asymétrie = émission OG

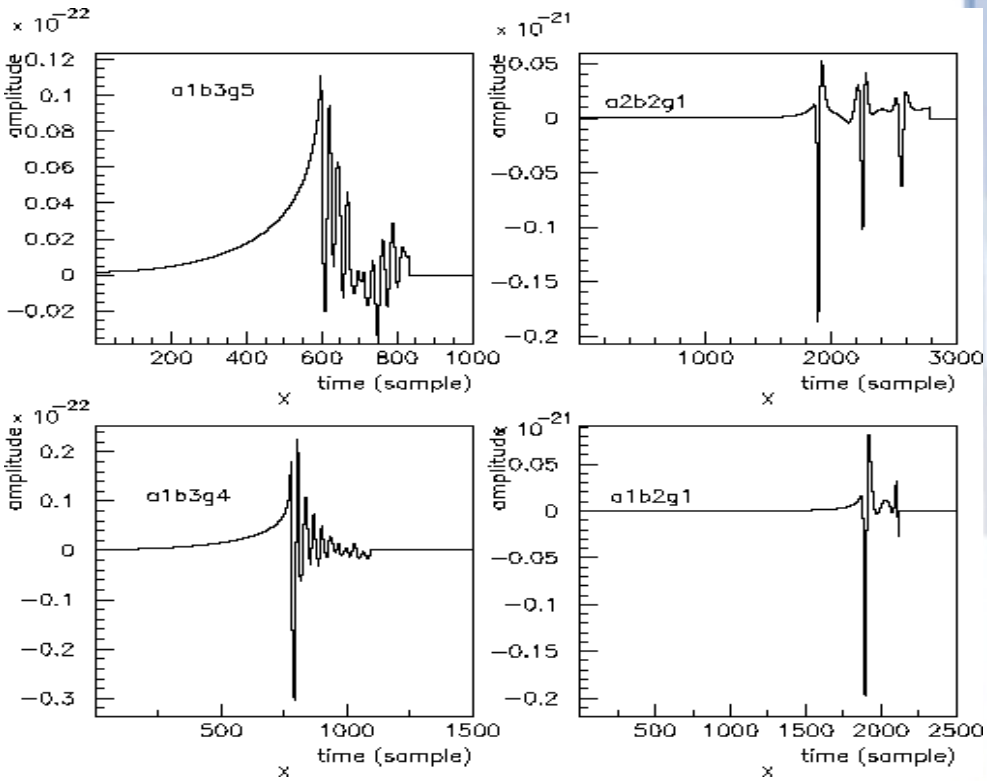
- Taux probable :
  2/galaxie/siècle

Supernovae



- Signaux sont mal connus

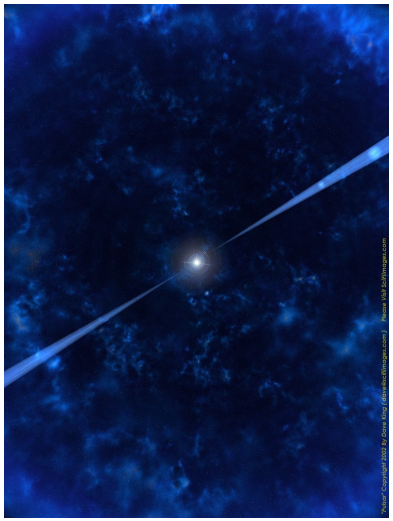
  - uniquement via simulation
  - difficile à « allumer »
  - beaucoup de physique à inclure
  - forme dépend de la matière
  - groupes commencent à converger



$h \sim 10^{-23}$ @ 10 Mpc
$f \sim 0.1 \rightarrow 1$ kHz

- Distance : aujourd'hui essentiellement sensible à notre galaxie

Pulsars

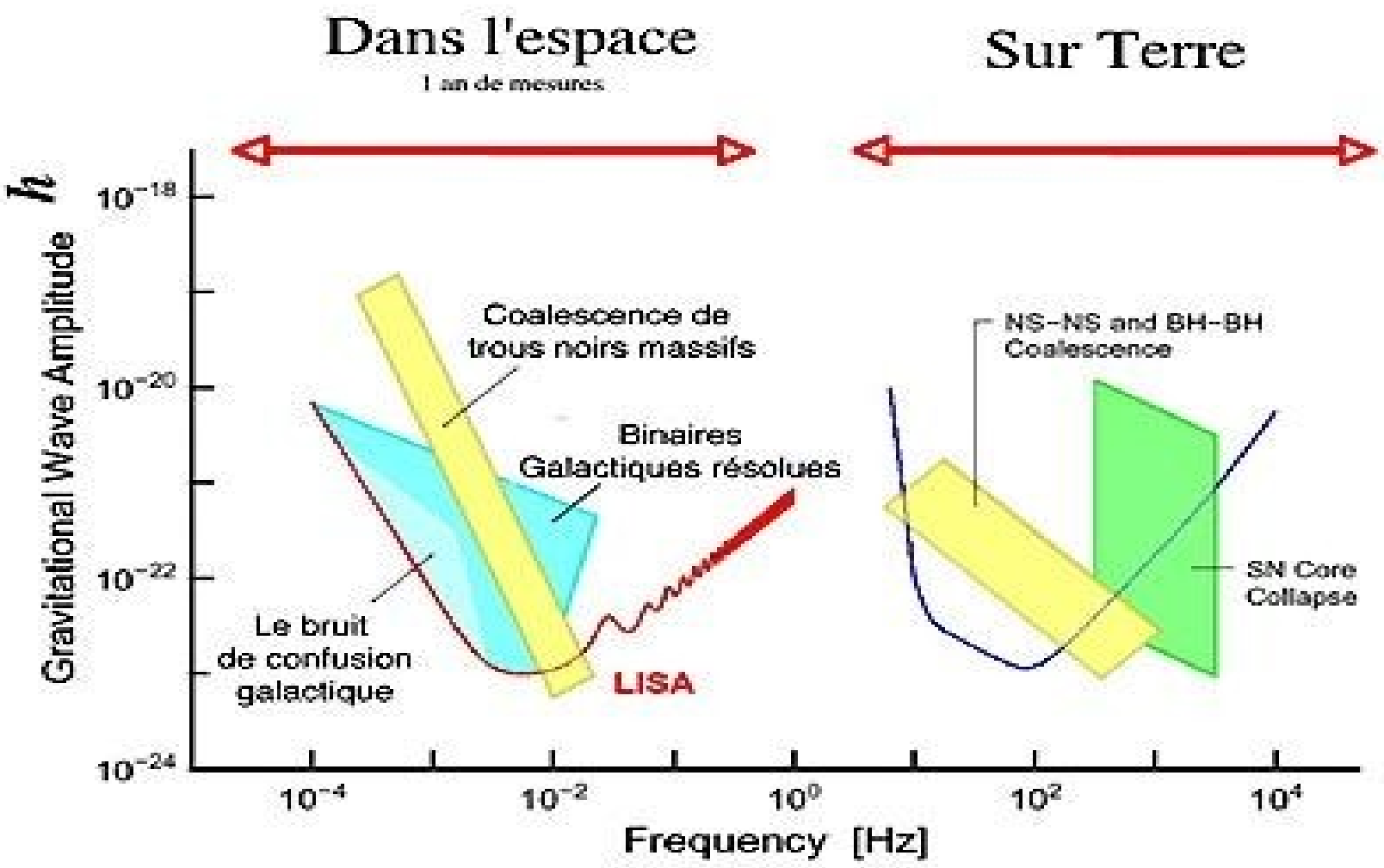


- Étoile à neutrons en rotation rapide
  - 10^5 pulsars dans la galaxie
  - Plusieurs milliers avec f > qqs Hz
  - Faibles amplitudes (h ~ 10^{-24}) mais périodique sur long terme → intégration possible
- Origines des asymétries:
  - Instabilités de rotation
  - Montagnes (quelques mms)
  - Effets magnétiques

Autres sources

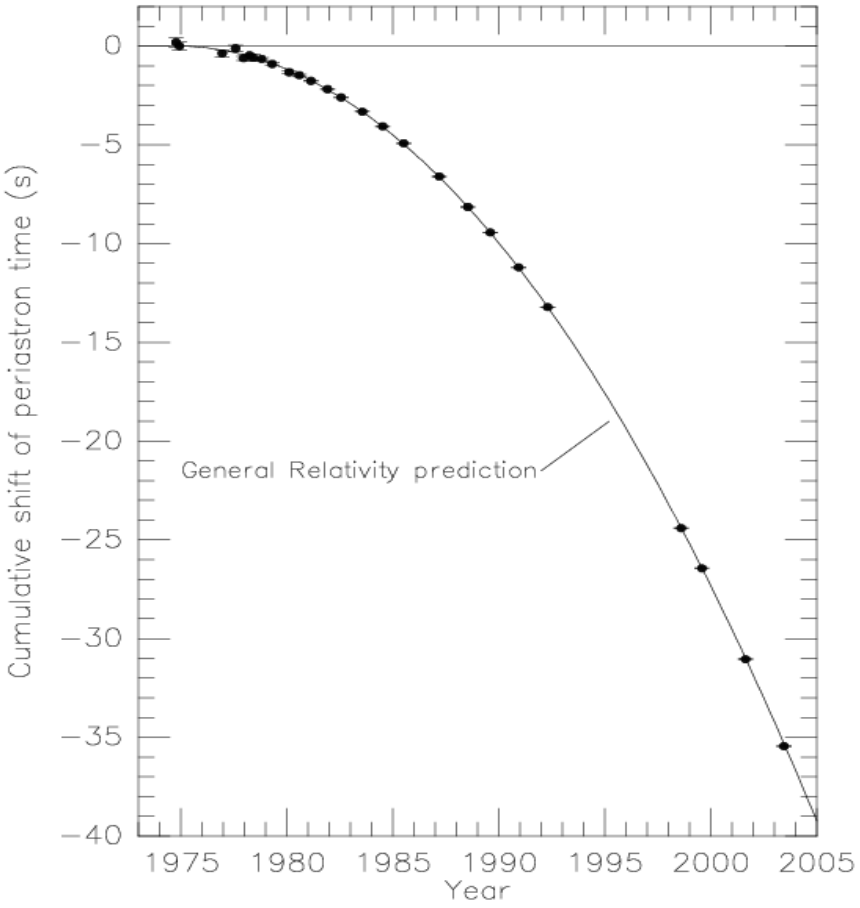
- Sursauts gamma :
  - Cœur central : coalescence ou supernovæ d'étoiles très massive
  - Sensible sur plusieurs dizaines de Mpc
- Fond stochastique :
  - Sources non résolues
  - Fond cosmologiques – équivalent au rayonnement fossile à 2.7 K :
    10^{-22} s post Big-Bang vs 10^{5} ans pour rayonnement fossile
- Un tas d'autres idées ....

Qui pour quoi



Preuves d'existence ?

- 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 ~10^6 km
- Diminution de 3mm/orbite(8h)
- Observée pendant plus de 30 ans

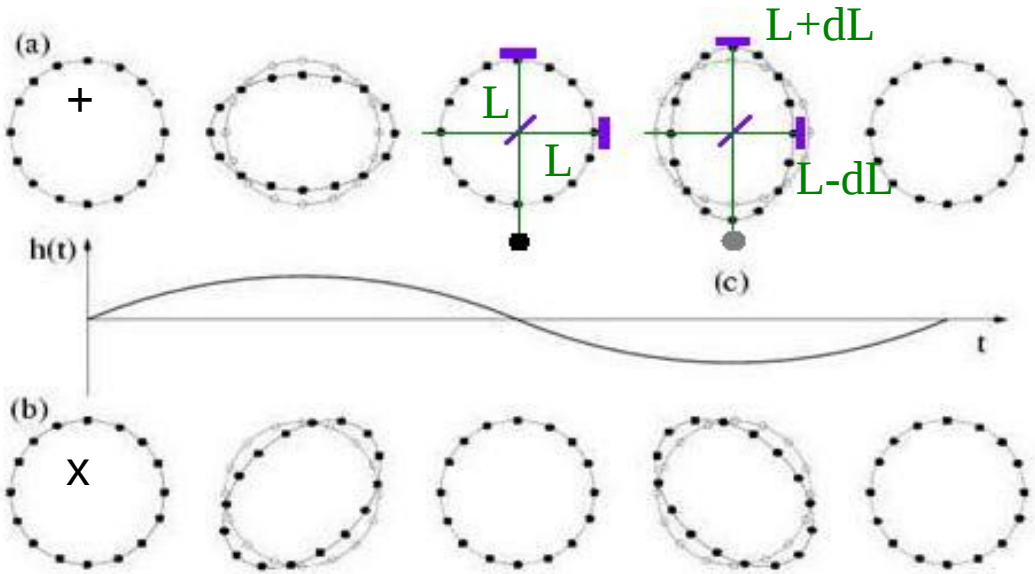
Prix Nobel Hulse et Taylor en 2003

Comment les détecter ?

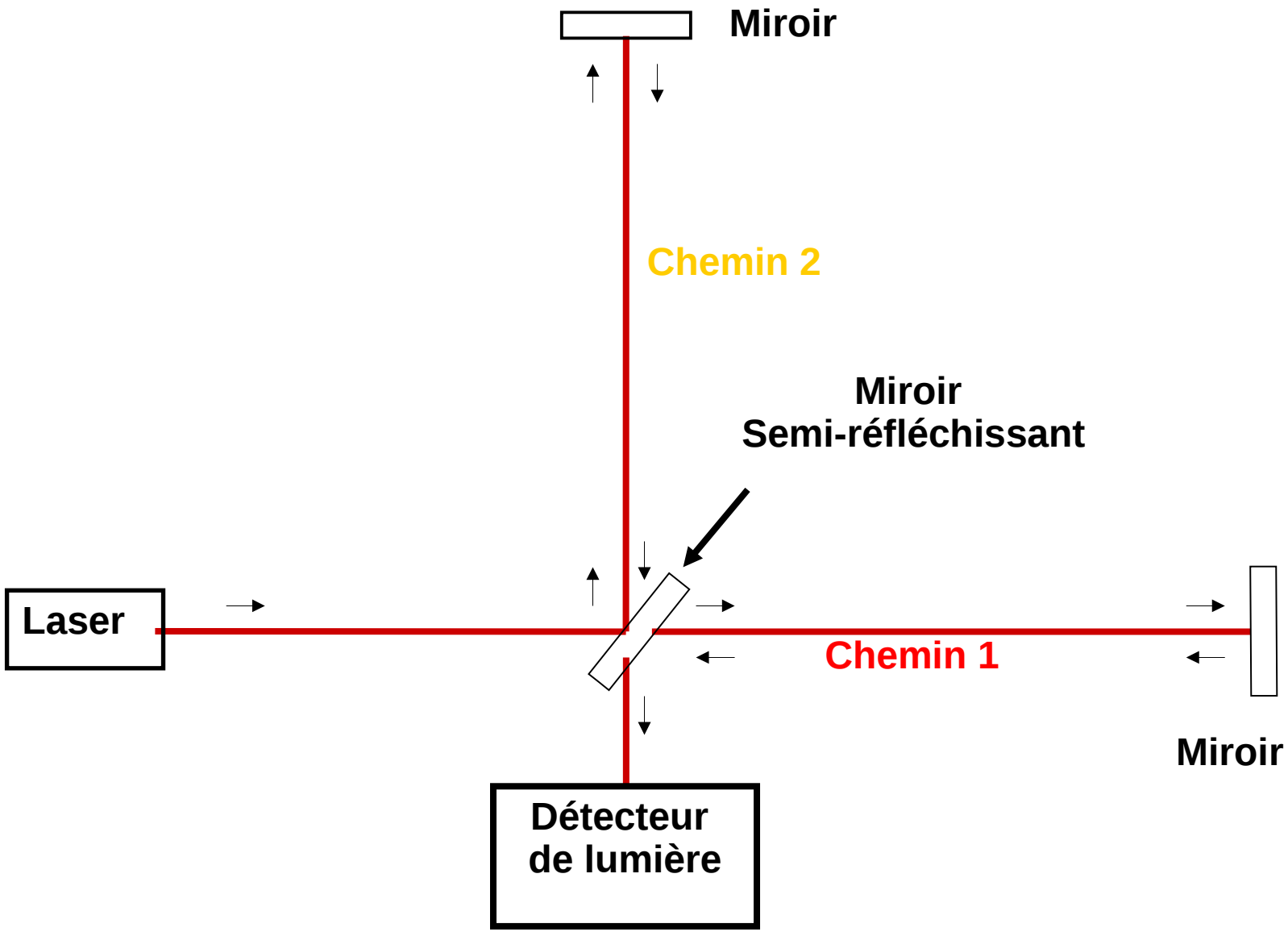
- Amplitudes très faible
- Peu/pas de couplage avec la matière

- Mesurer l'impact sur un solide :
  détecteurs de type barres
- Utiliser l'effet différentiel

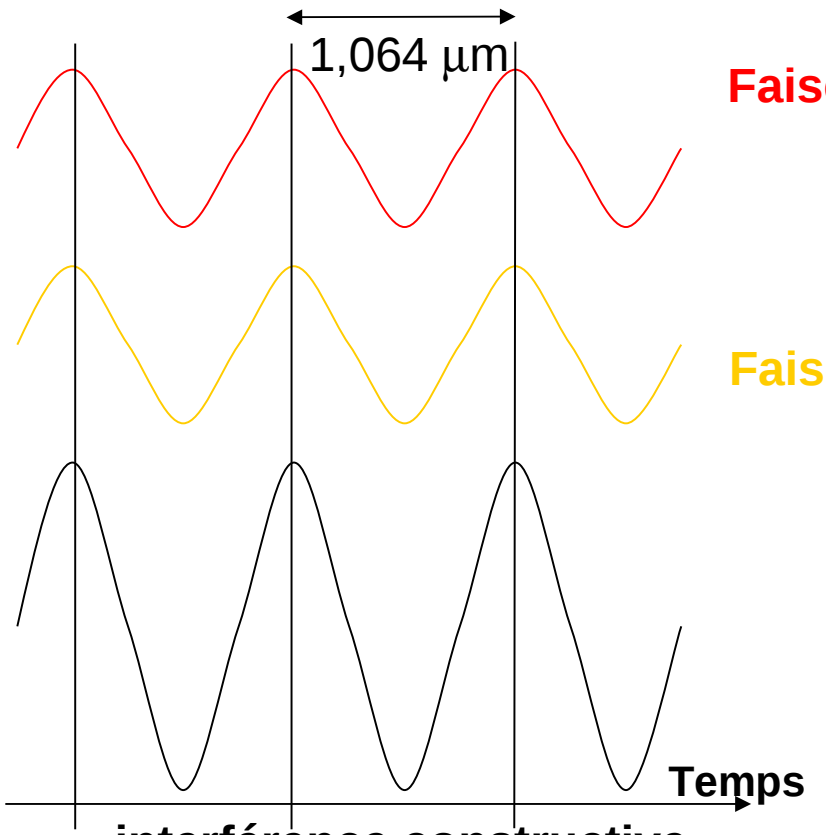
principe de l'interférométrie semble adapté



Interféromètre de Michelson



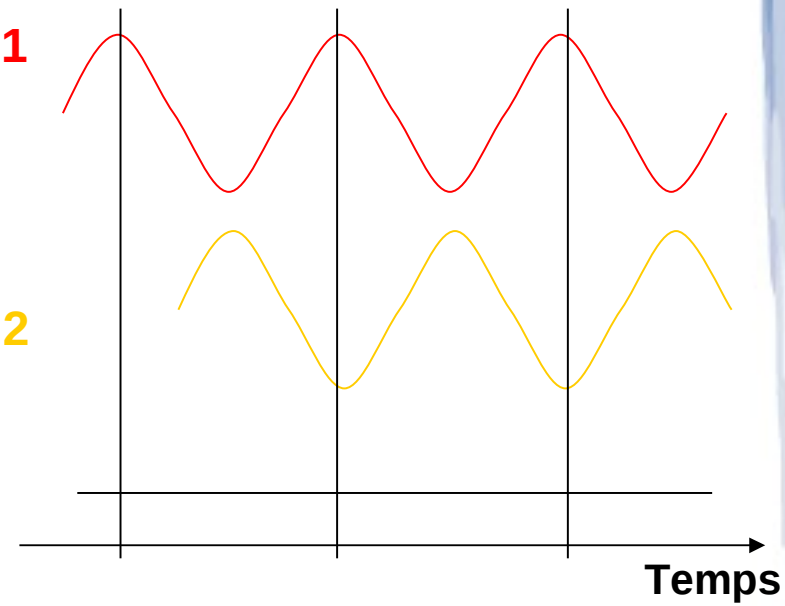
Franges d'interférence



interférence constructive

Faisceau Chemin 1

Faisceau Chemin 2



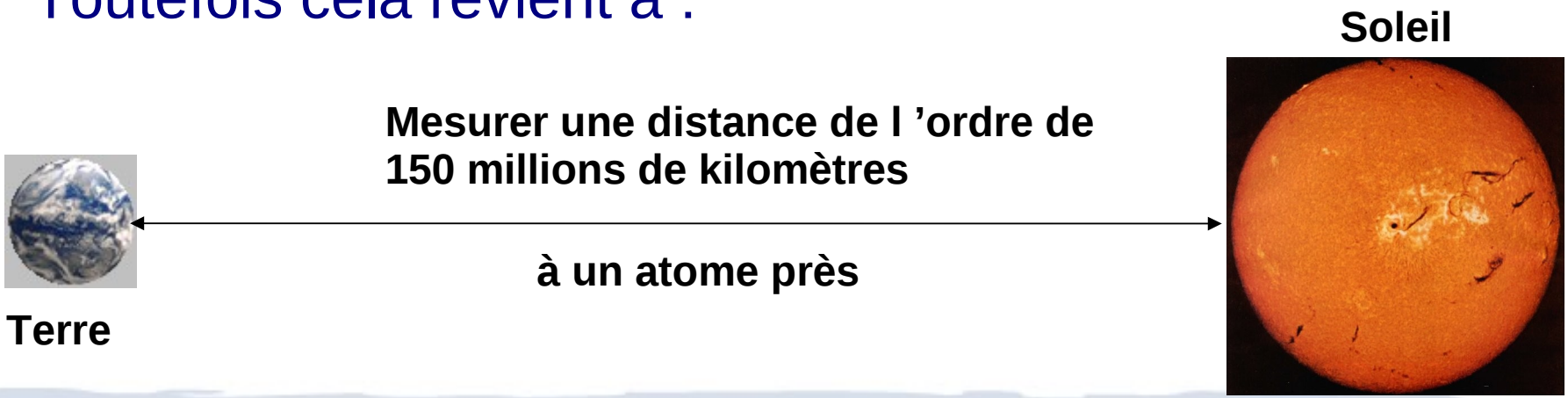
interférence destructive appelée frange noire

Le détecteur de lumière voit la somme des deux faisceaux

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

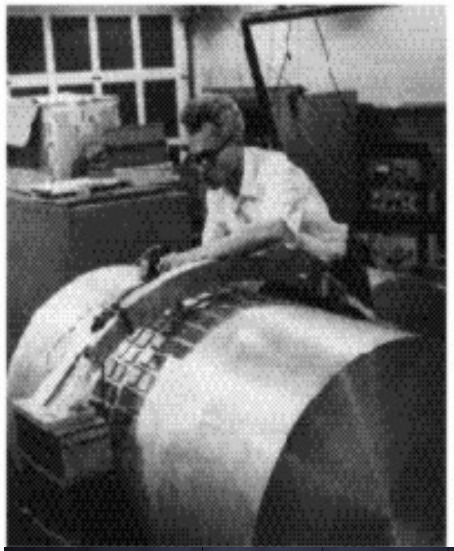
Pour détecter des OG ...

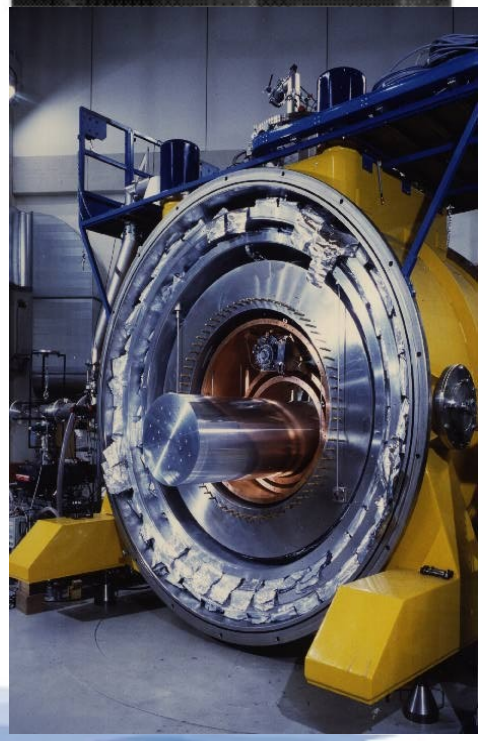
- Une OG va modifier la longueur des deux chemins optiques
- On obtient une figure d'interférence différente
- Réglons nous sur la frange noire
- Si OG, le détecteur va recevoir de la lumière
- La quantité de lumière sera proportionnelle à l'amplitude h de l'onde incidente
- Toutefois cela revient à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



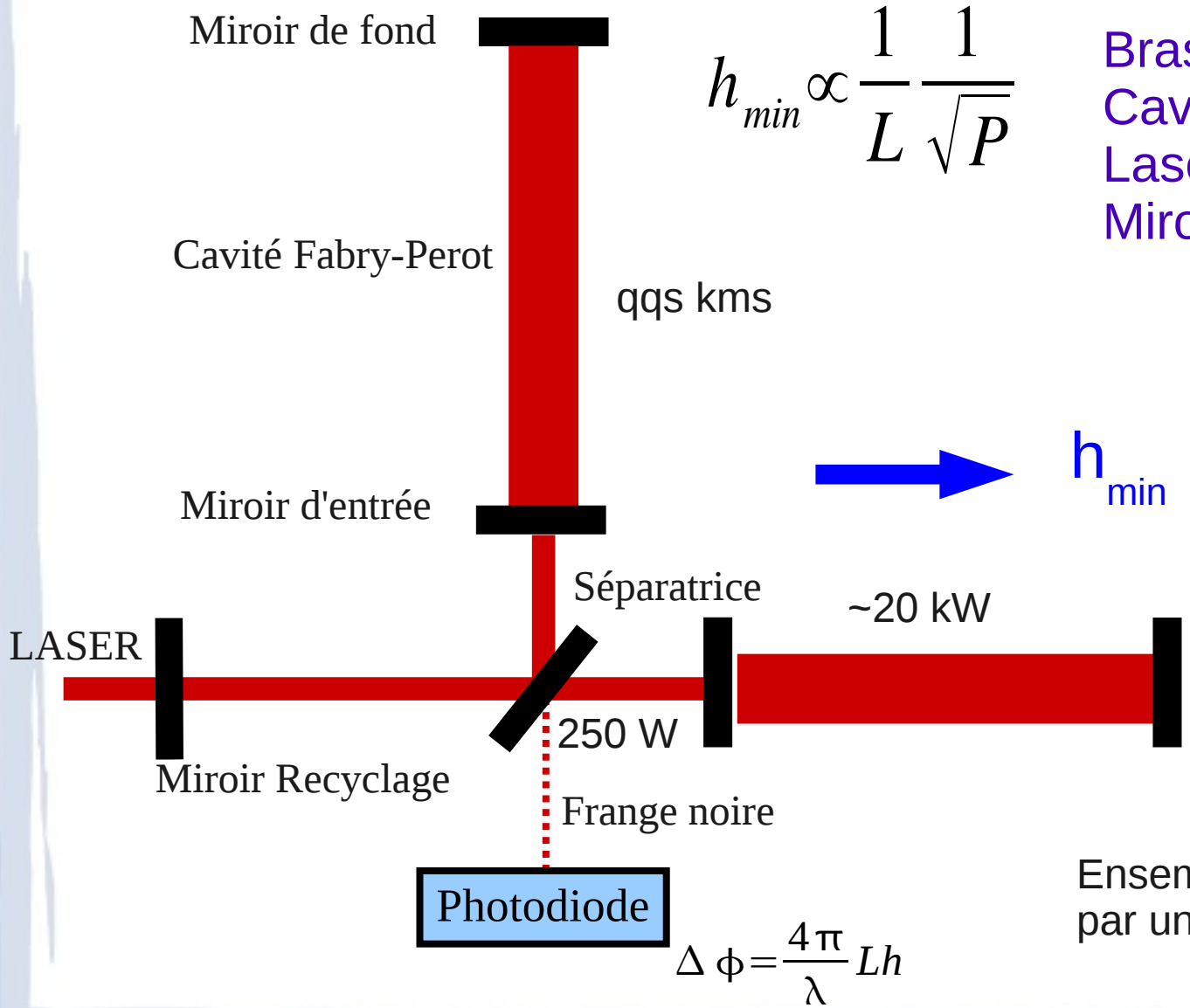
Une histoire déjà longue

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 senbilité nominale





Détecteurs interférométriques



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

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

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

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

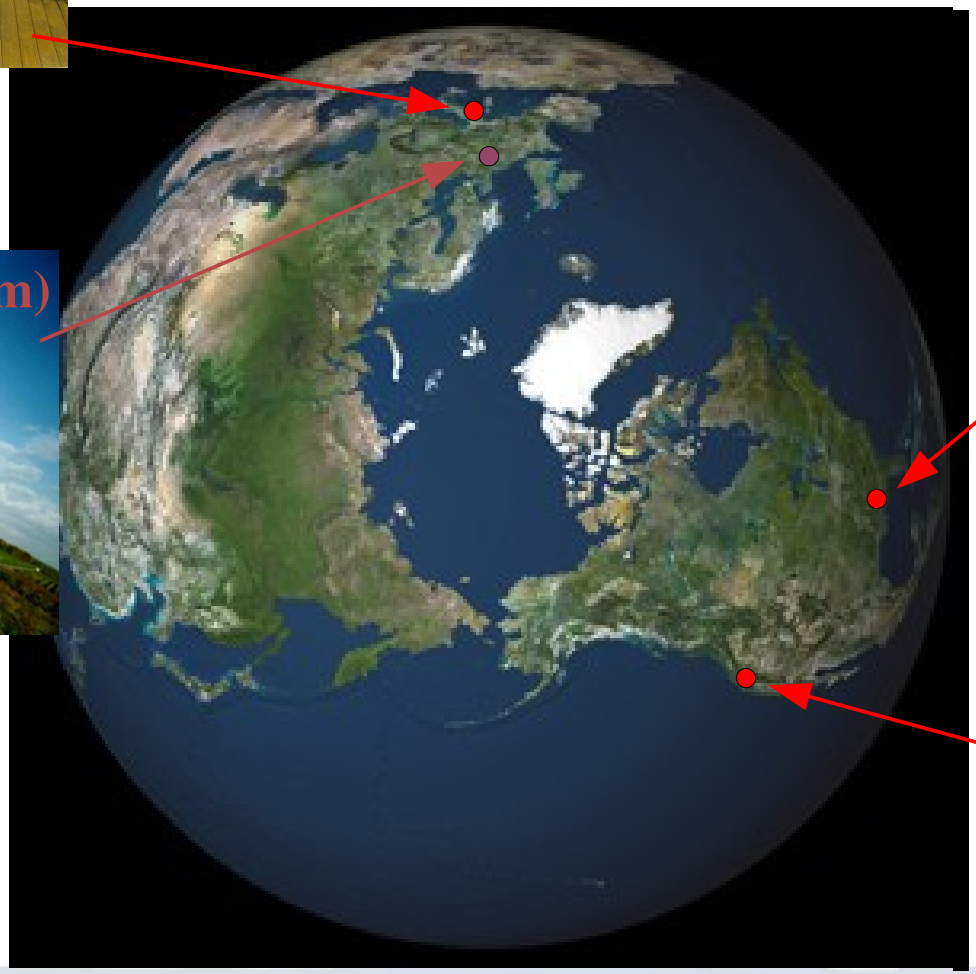
Ensemble maintenu en résonance par un contrôle à 10 kHz

Virgo - Italie

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 (20W) 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 µm)
  - Matériau pour avoir le moins de bruit thermique
- Mettre l'ensemble du système sous-vide (~ 7000 m^3 à 10^{-9} mbar)
- Contrôler en permanence le système (à 10 kHz) pour le garder à son point de fonctionnement optimal

Un réseau mondial de détecteurs



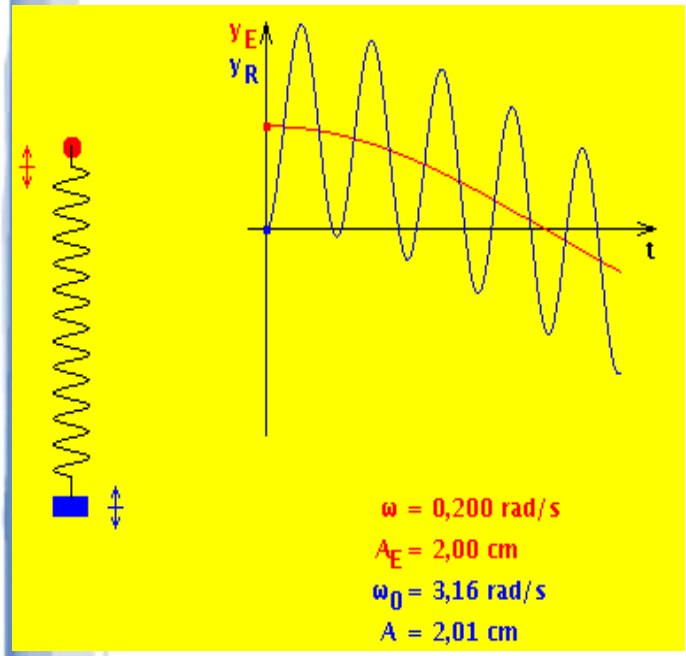
S'isoler du sol

- Origines du bruit (quelques exemples):
  - Houle
  - Activité humaine
  - Tremblements de terre
- Bruit sismique mesuré : $\tilde{x} \approx \frac{10^{-6}}{f^2} m/\sqrt{Hz}$

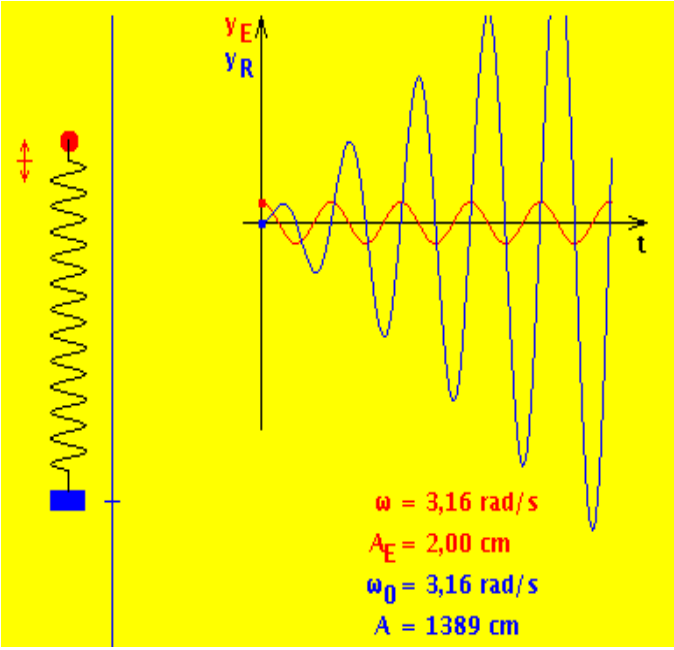
  → Filtrage indispensable
- Utiliser des oscillateurs harmoniques couplés (ressorts, pendules,...) :
  - Fonction de transfert $\tilde{H} = \frac{\tilde{x}}{\tilde{x}_{excitation}} = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$
  - Loin de la résonance $|\tilde{H}| = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$
  - Avec N oscillateurs $|\tilde{H}| = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{2N}$

Exemple sur un ressort

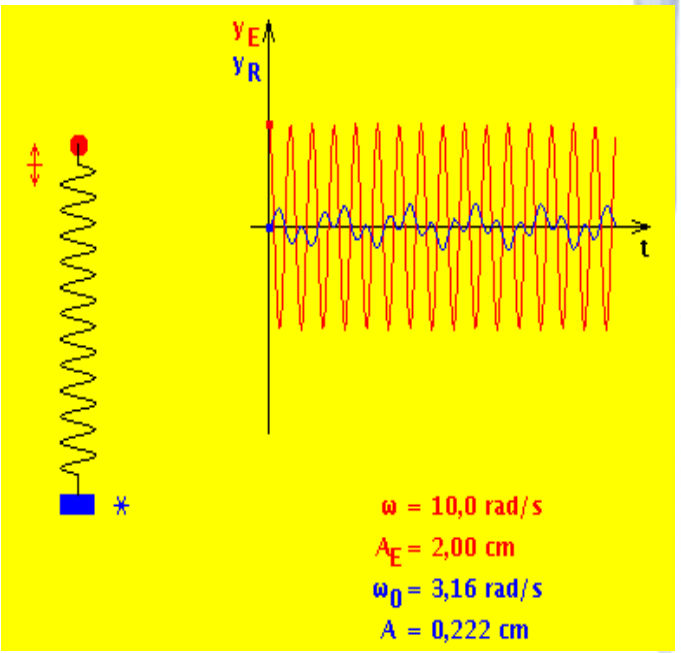
http://www.walter-fendt.de/ph11f/resonance_f.htm



À basses fréquences



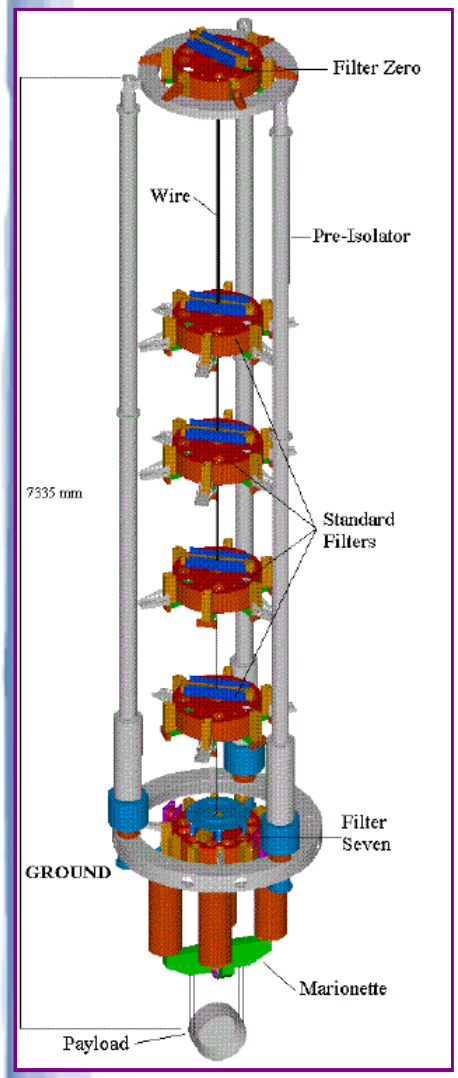
À la résonance



À hautes fréquences

Systèmes de suspension

Virgo



Pendule inversé : 7m, 1 tonne

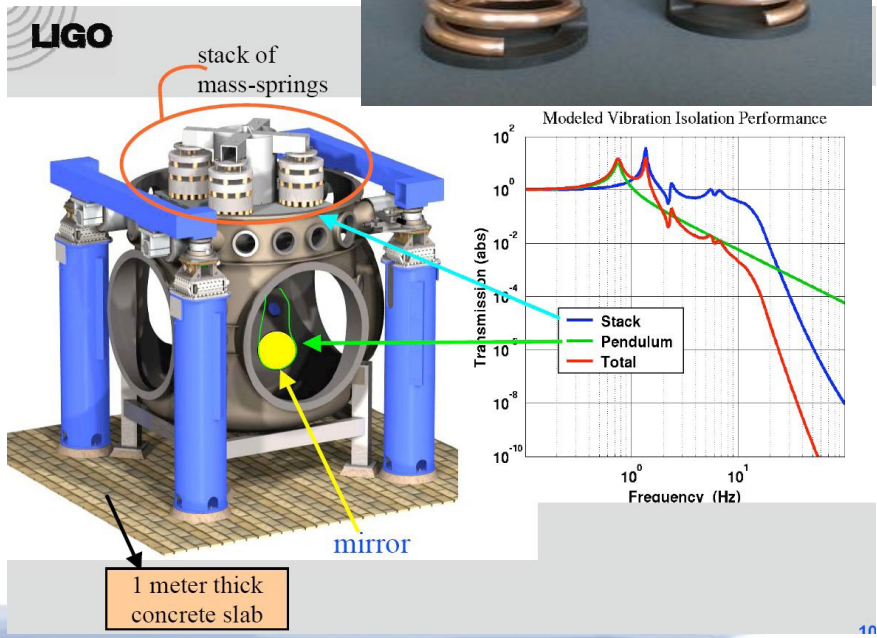
5 filtres passifs intermédiaires

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

LIGO

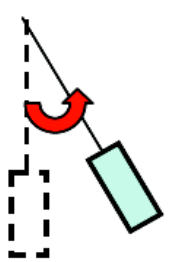
4 plans de ressorts passifs

Atténuation sismique:
~ 10^{8} à 40 Hz



Bruit thermique

- Miroir + câbles de suspension = oscillateur mécanique excité par l'environnement à température T (cf mouvement brownien)



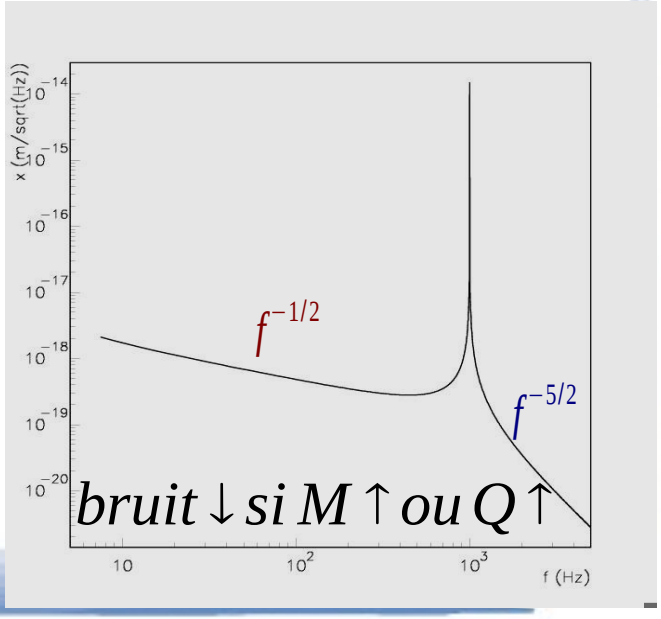
Bruit de pendule

Bruit de miroir

Modes violons (résonances h fréquence)

Chaque mode de vibration caractérisé par :
- fréquence propre ω_0
- facteur de qualité Q

$$|\tilde{x}(\omega)|^2 = \frac{4kT\,\omega_0}{mQ}\,\frac{\omega_0}{\omega}\,\frac{1}{\sqrt{(\omega^2-\omega_0^2)^2+\omega_0^4/Q^2}}$$

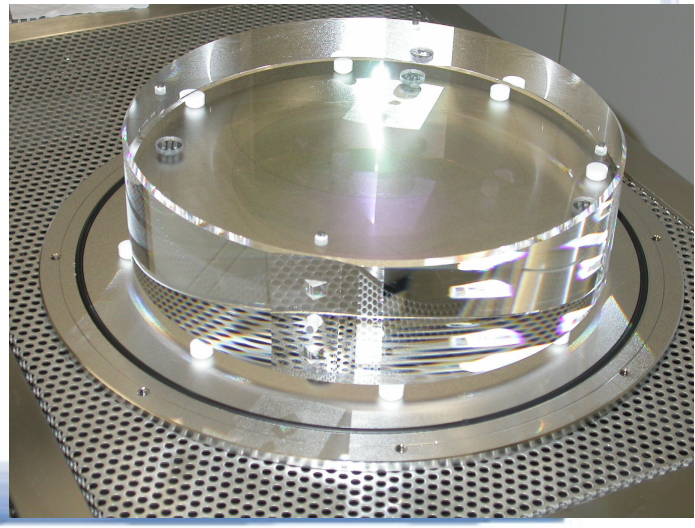


Miroir, mon beau miroir

- Bruit thermique est le bruit limitant entre 40 et 200 Hz

  → masse de + de 10 kg
- Réflectivité définie à mieux que 0.01 %
- Faibles pertes (absorption, diffusion) de l'ordre que quelques ppm à λ=1064nm
- Surface définie avec défauts < à 30 nm (λ/40) sur 30 cm de diamètre

Solution actuelle :
- miroir en silice (SiO_2)
- diamètre : 35 cm
- épaisseur : 10 – 20 cm
- masse : 20-30 kg



Bruit de photon

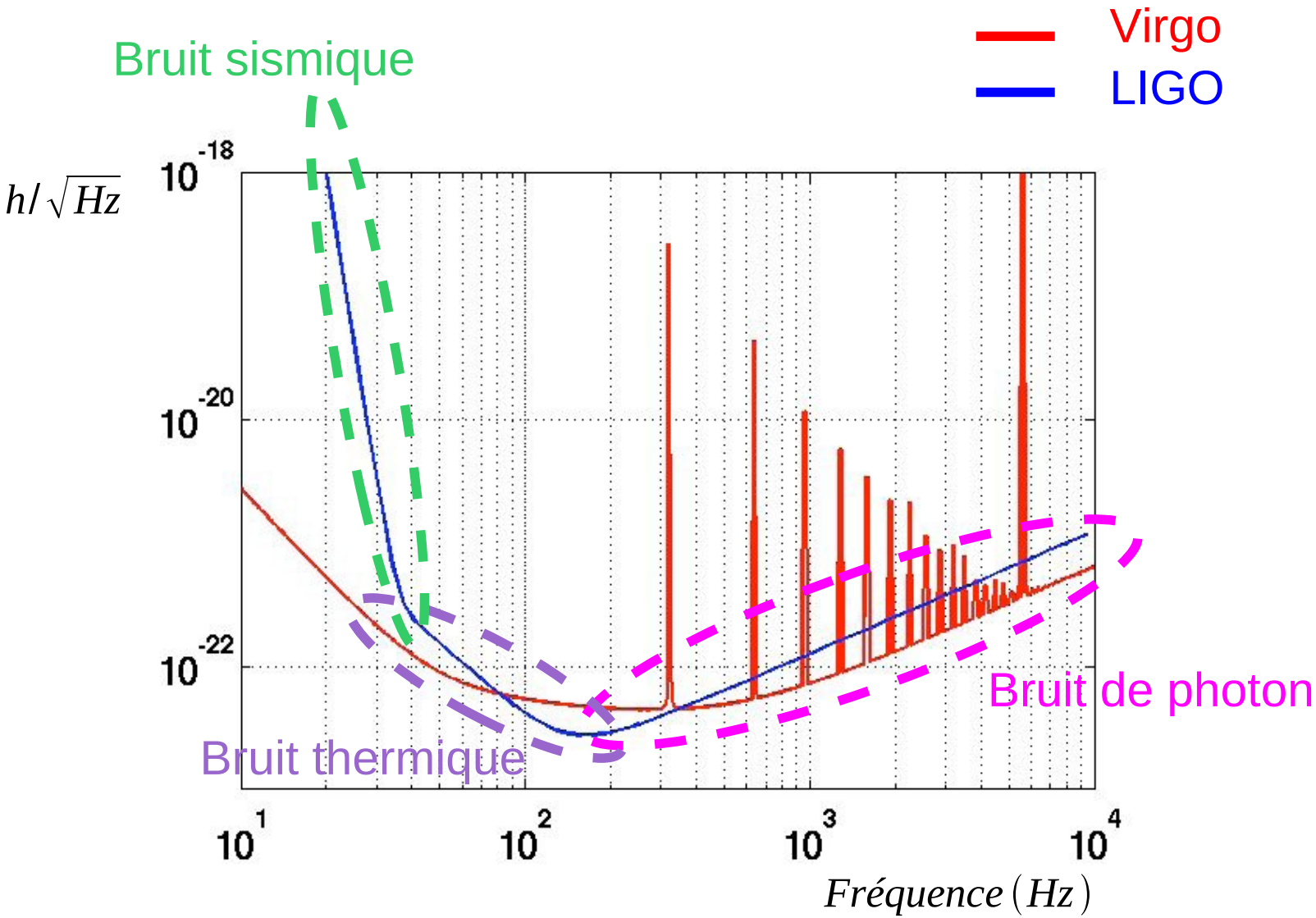
- « Quelle amplitude d'onde peut-on détecter ? = quelle modification de puissance optique peut-on détecter ? » (P. Saulson)
- On compte un nombre de photons

  → erreur sur la mesure
- Bruit blanc (ne dépend pas de f)

$$h_{phot} = \frac{1}{L}\sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P}}$$

- Bruit dominant pour f > 200 Hz

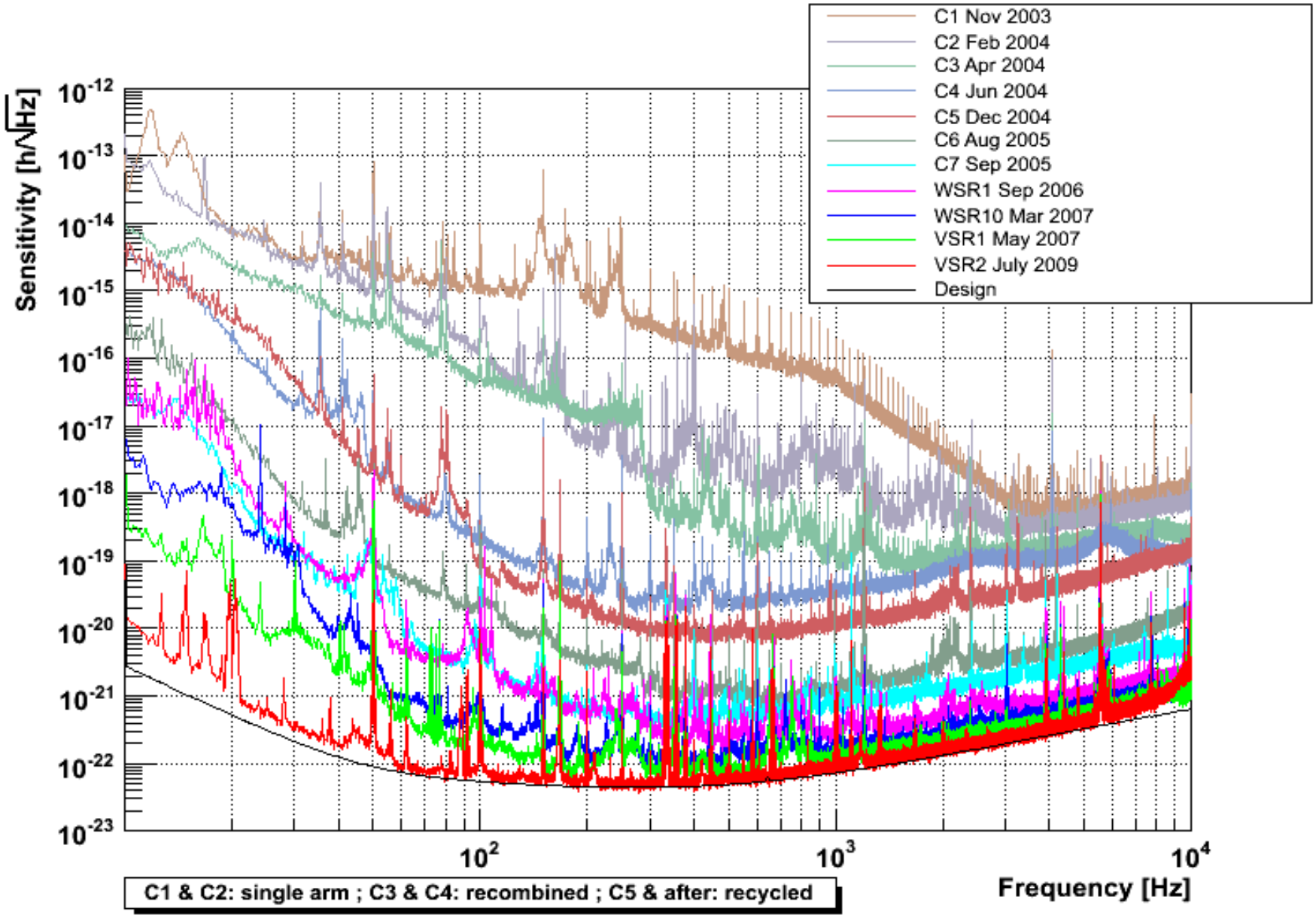
Résumé


Virgo
LIGO
Bruit sismique
$h/\sqrt{Hz}$
10^{-18}
10^{-20}
10^{-22}
Bruit de photon
Bruit thermique
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
$Fréquence\,(Hz)$

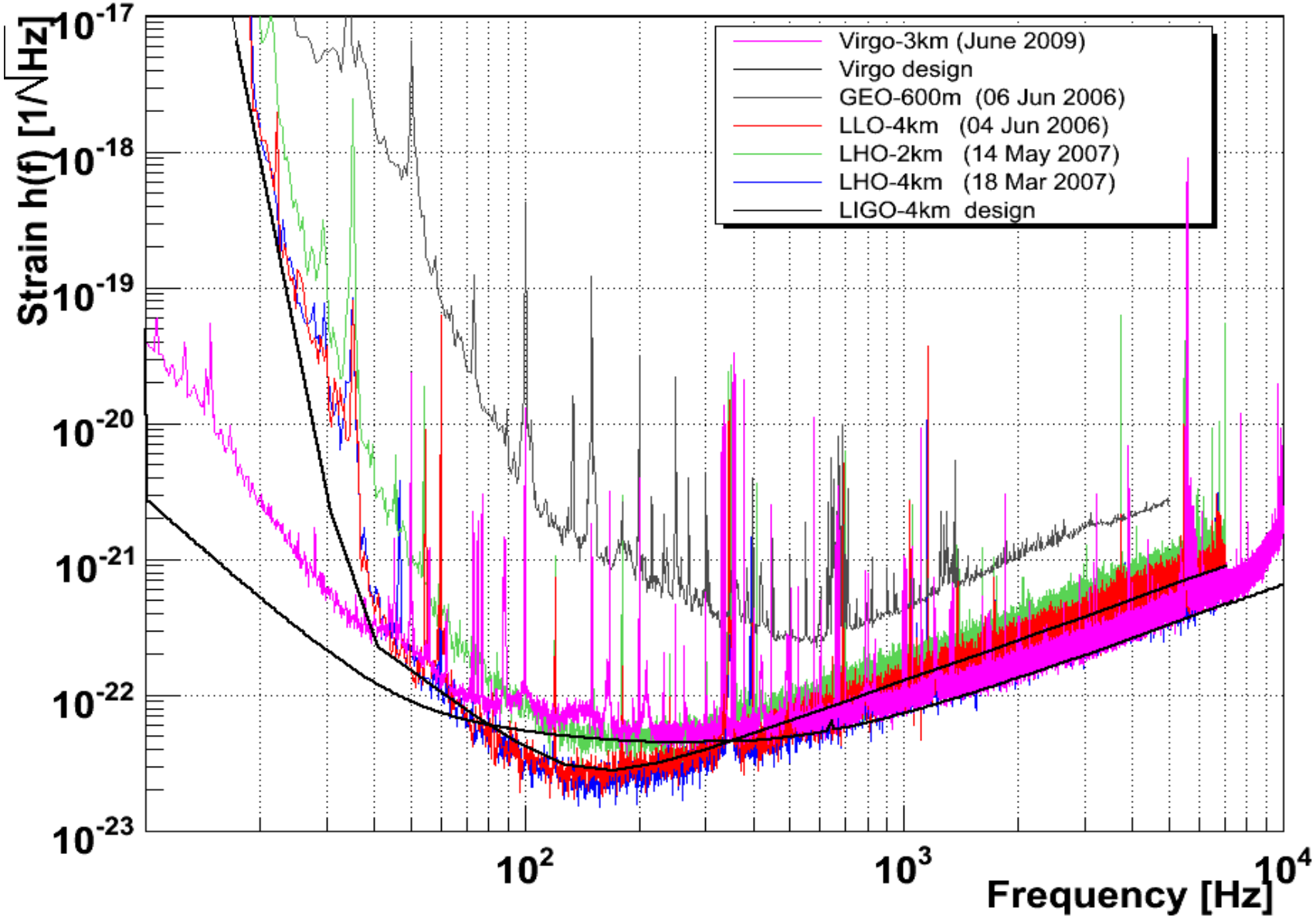
Autres problèmes possibles

- 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 : ~10^{-10} m
  - Alignement des miroirs : ~10^{-9} rad

Cela ne se fait pas tout seul

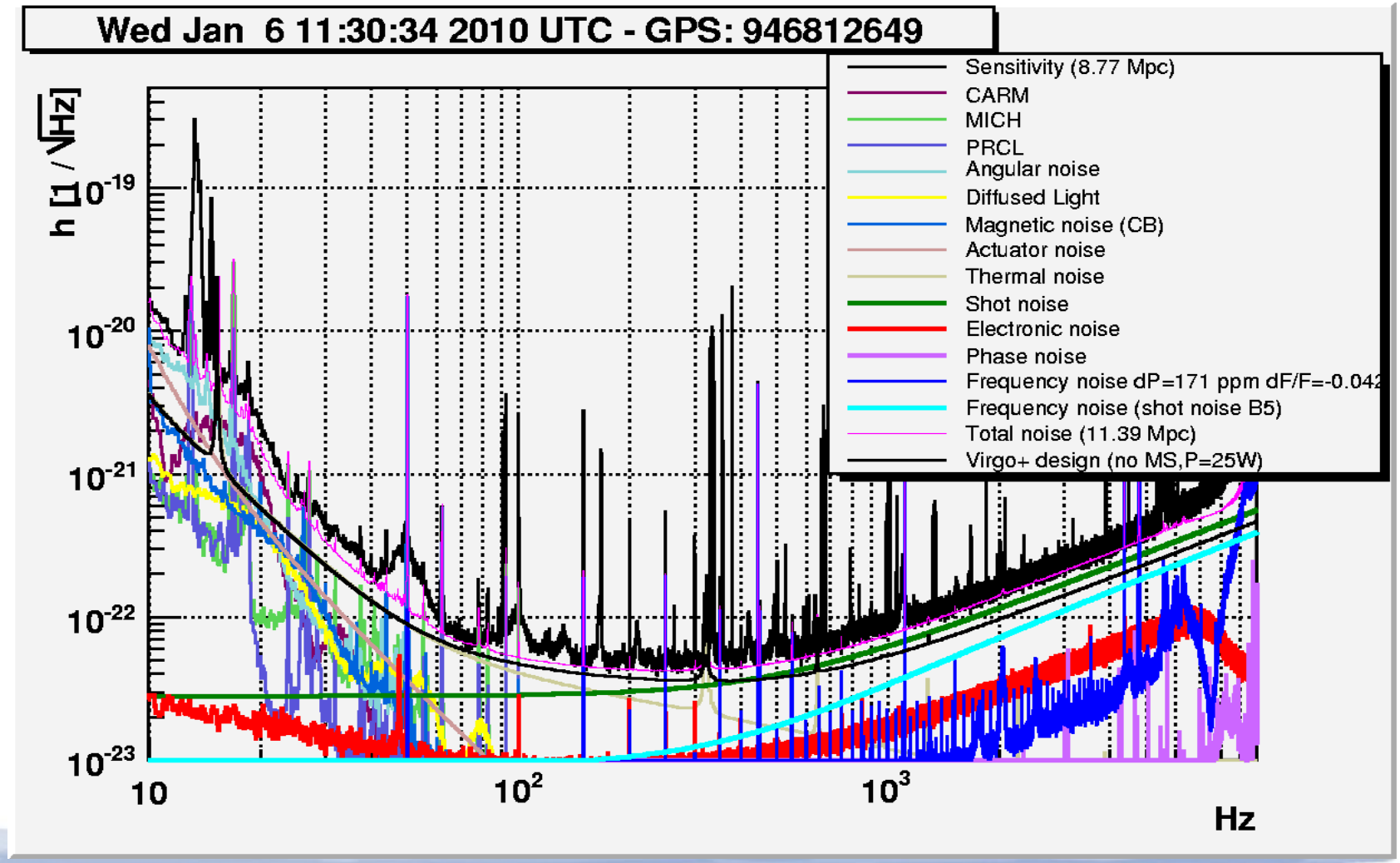


Et maintenant tous ensemble

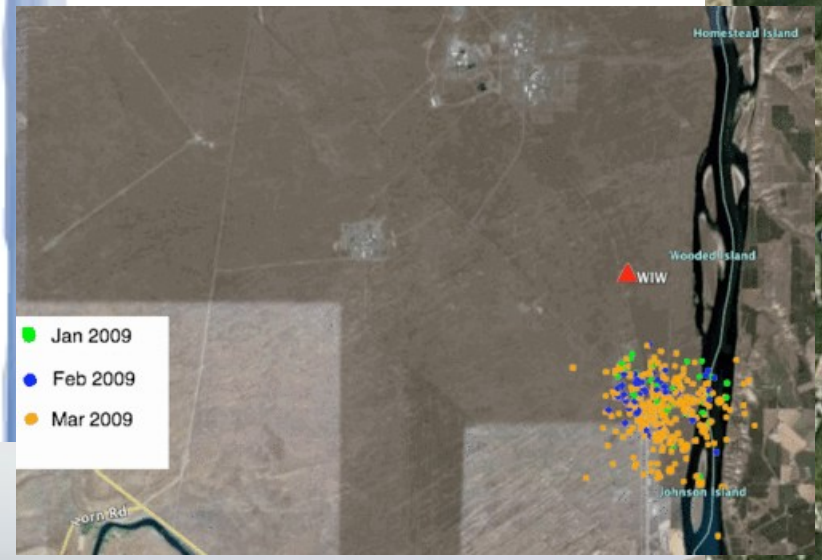


Compréhension des bruits

- Projection des différents bruits connus : exemple pour Virgo



Expériences dans la vie réelle



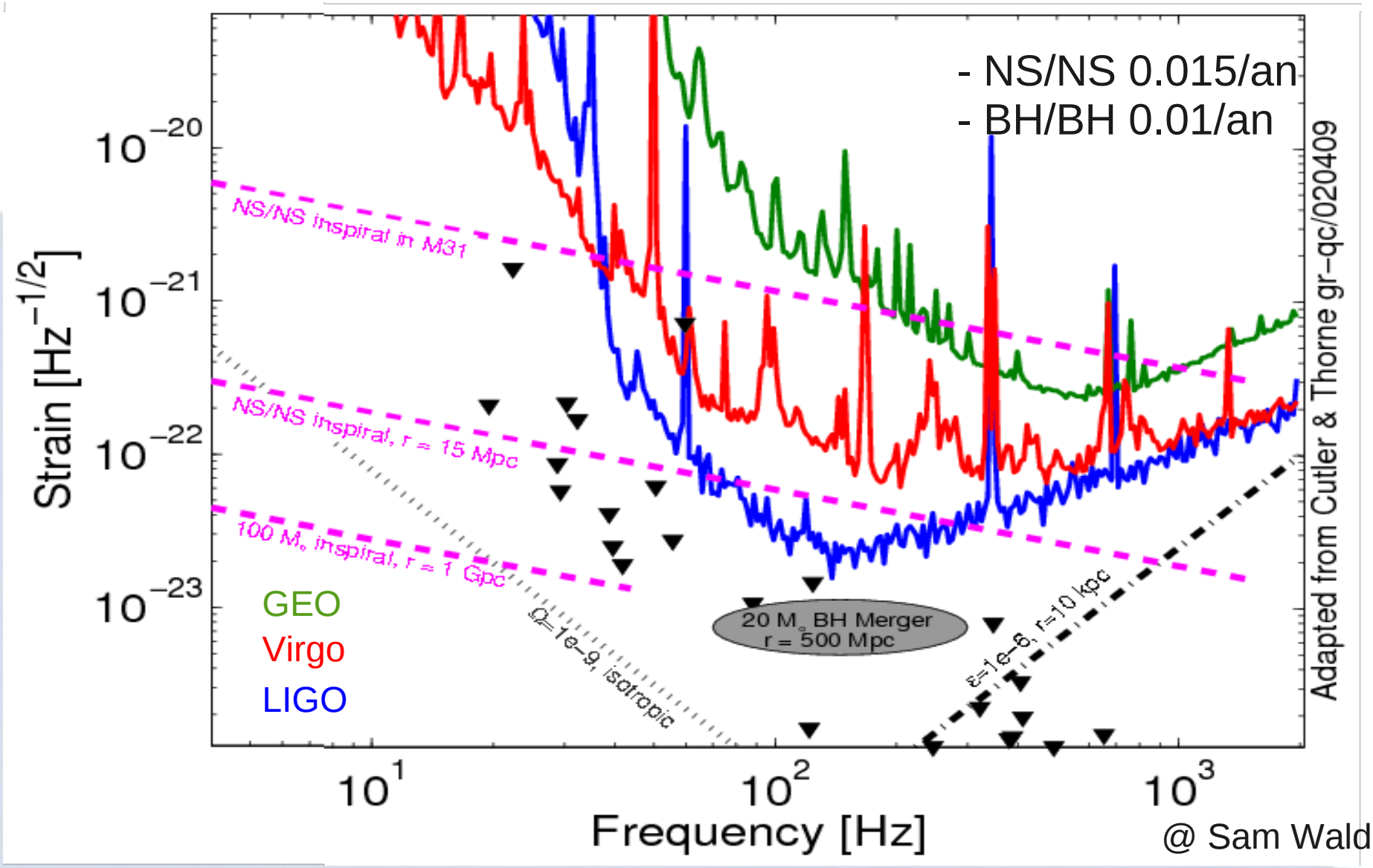
Exemples de LIGO
@ Sam Waldman

Performances malgré tout ça

- Record de la plus longue durée de lock : 143 hrs (juillet 2009 – Virgo)
- Première prise de données commune en 2007:
  - LIGO S5 : nov 2005 – oct 2007 (3 ITFs)
    - Au moins 2 instruments : 70 %
    - Triple coïncidence : 52 %
  - Virgo VSR1 : mai 2007 – oct 2007
    - Temps utile : 80 %
    - Coïncidence entre les 3 sites : 55 %
- Depuis 2009 - 2010 :
  - Virgo : ~80 % de temps utile
  - LIGO : ~60 % (par ITF)
  - Triple coïncidence : ~ 25 %

Sensibilité pour S5/VSR1

Taux attendus (avec grande incertitude) :



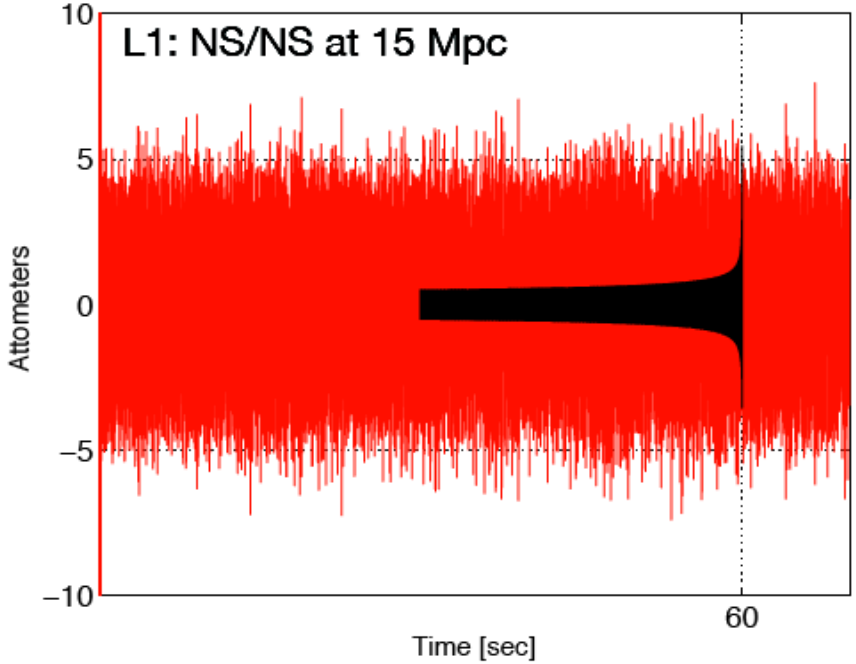
@ Sam Waldman

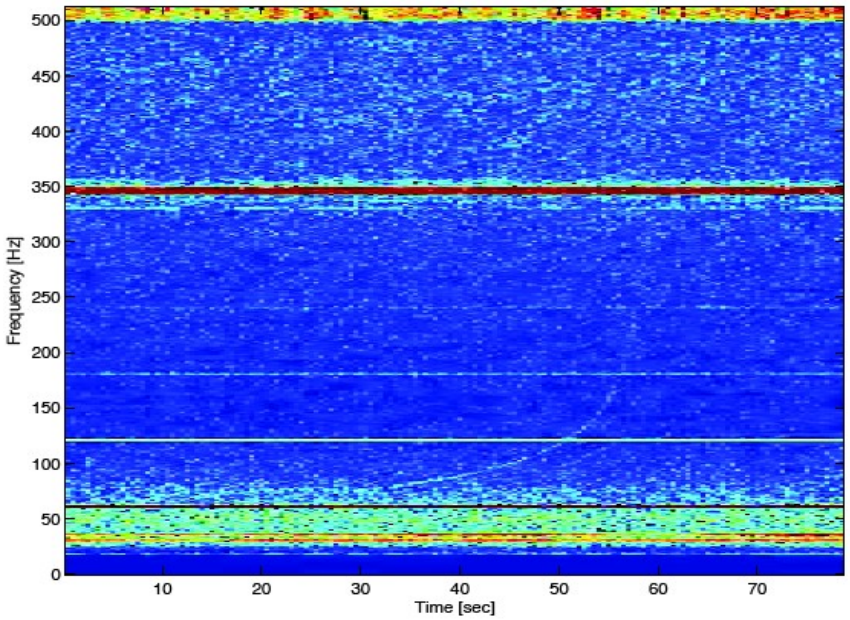
Analyse des données

- Différents types d'analyse selon le type de signal
- Savoir reconnaître un problème du/des détecteurs par rapport à un vrai événement
- Reconstruire les caractéristiques de cet événement

Nos principales difficultés

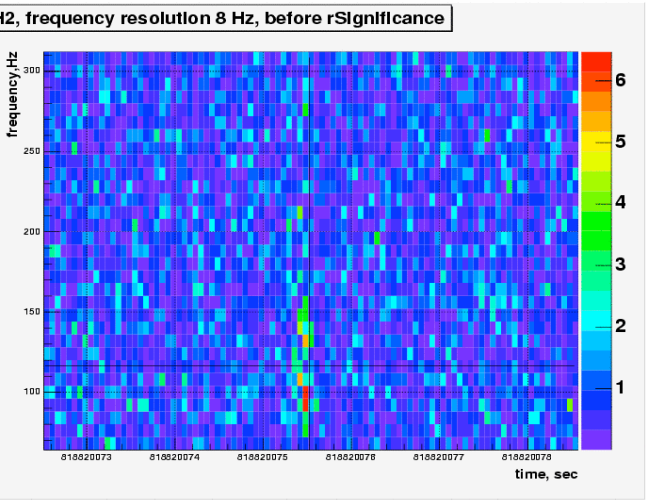
- Pas de déclenchement de l'expérience, ni de conditions expérimentales connues
- Rapport signal sur bruit et très faible comparé aux observatoires électromagnétiques





Méthodes d'analyses

- Signaux courts :
  - Si forme connue :
    - recherche adaptés par calques
    - Coïncidence entre 2 détecteurs
  - Dans le cas contraire :
    - Méthodes robustes basées sur décomposition temps-fréquences des données
      - Excès dans les pixels
    - Coïncidence entre 2 détecteurs

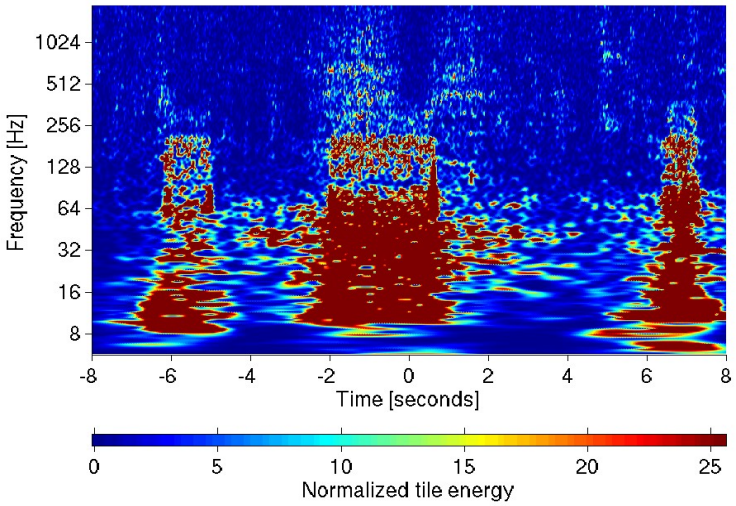


- Signaux longs – pulsars:
  - Recherche de lignes dans le spectre du bruit en tenant compte mouvement terrestre
    - Suivi des pulsars connus en rayonnement electromagnétique
    - Recherche en aveugle

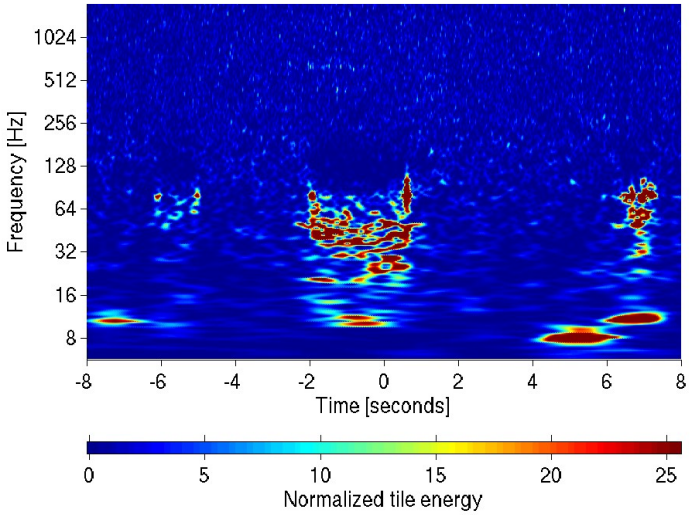
Nettoyer les données

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

Signal sur la frange noire



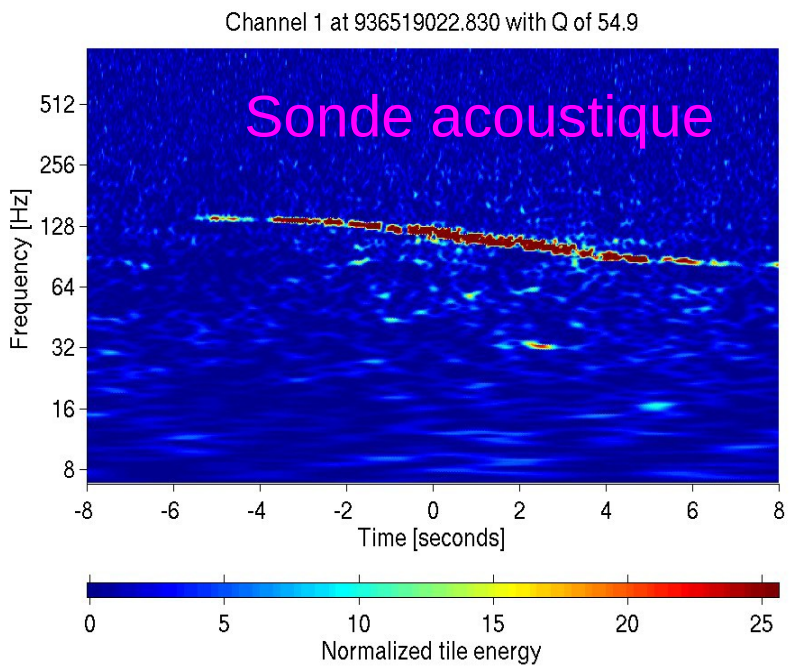
Courant envoyé sur une bobine

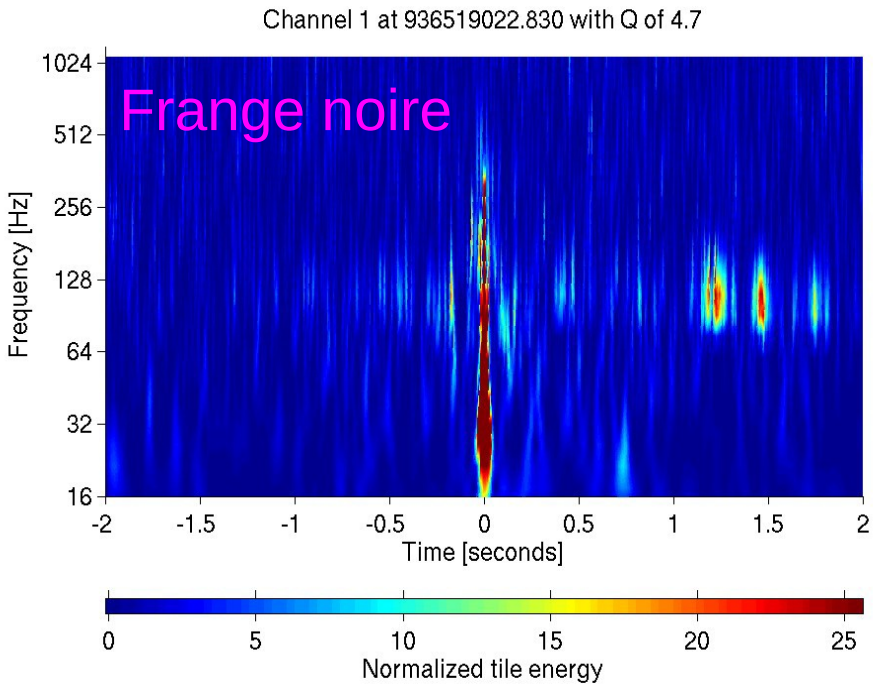


- Travail important sur la compréhension des bruits du détecteur

D'autres problèmes ....

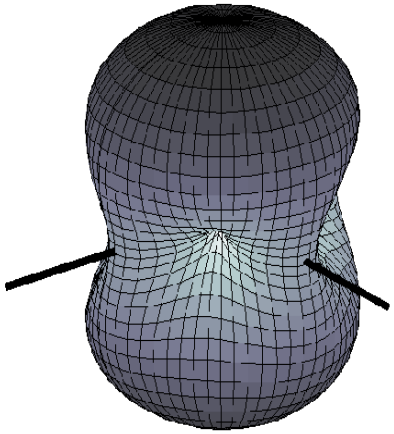
- Système de climatisation – couplage magnétique avec les aimants
- Avions

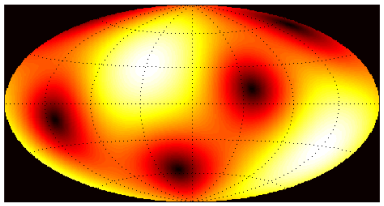




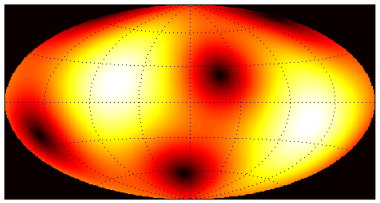
Analyse en réseau

- 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 jusqu'à 1°
    - Reconstruction de la forme d'onde

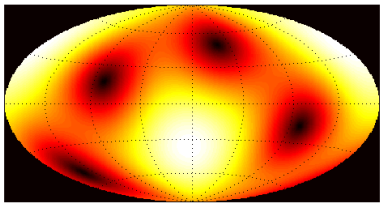




Hanford



Livingston

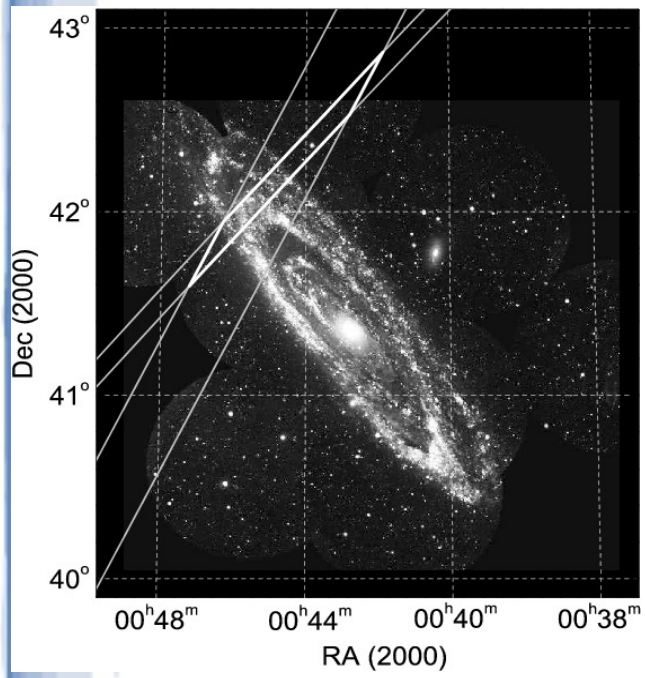


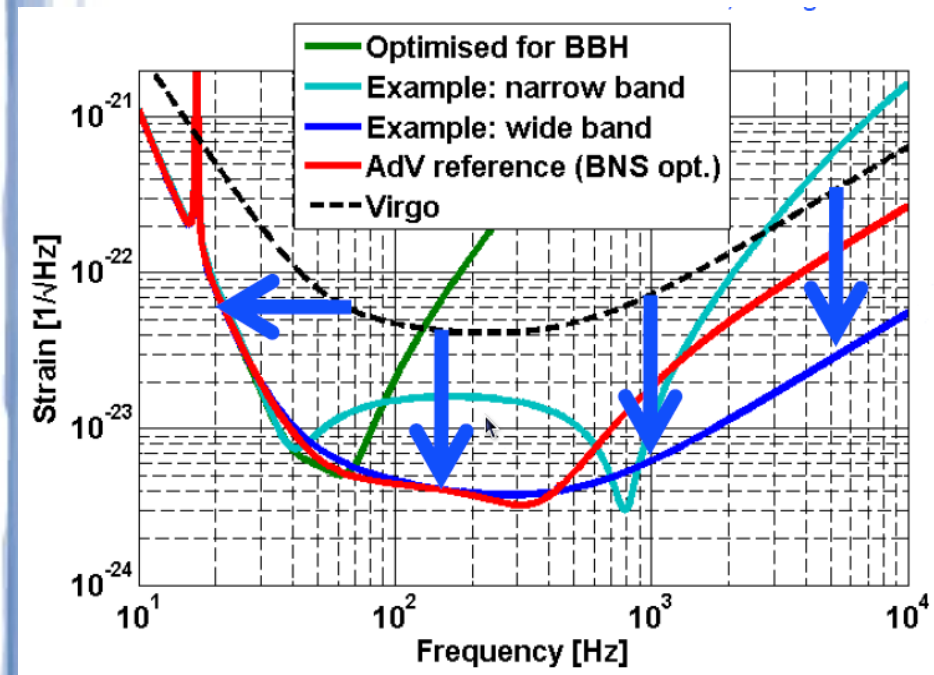
Virgo

Premiers résultats scientifiques

- Toujours pas d'OG détectée
- Mais le domaine commence à sortir des résultats contraignant:
  - Pulsar du Crabe : le ralentissement ne peut pas être expliqué uniquement par les OG ($\varepsilon < 10^{-4}$)
  - Limites sur les sursauts gamma
  - Premières contraintes sur les modèles cosmologiques

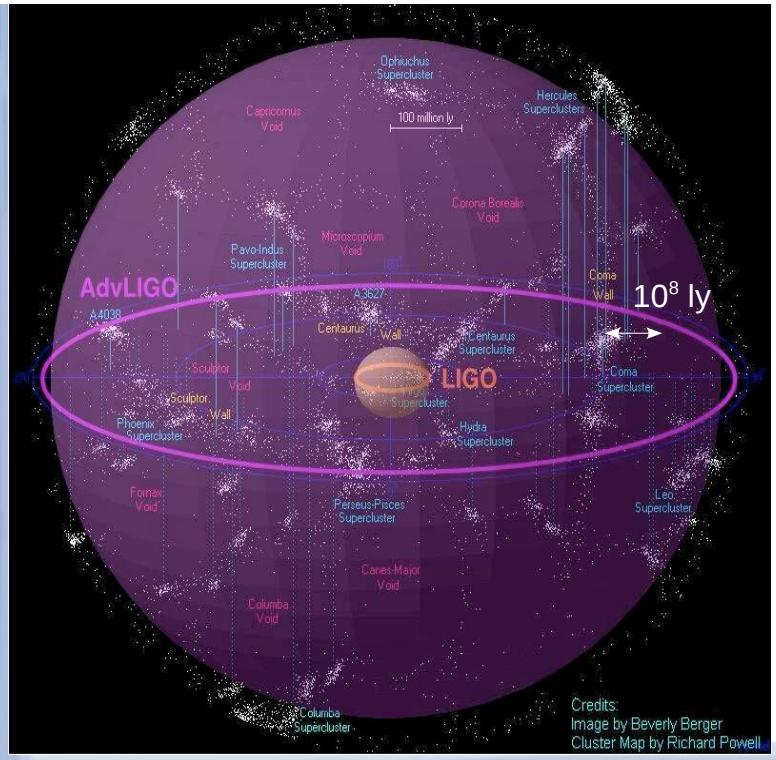
GRB 070201





Et pour plus tard

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



Credit: R.Powell, B.Berger

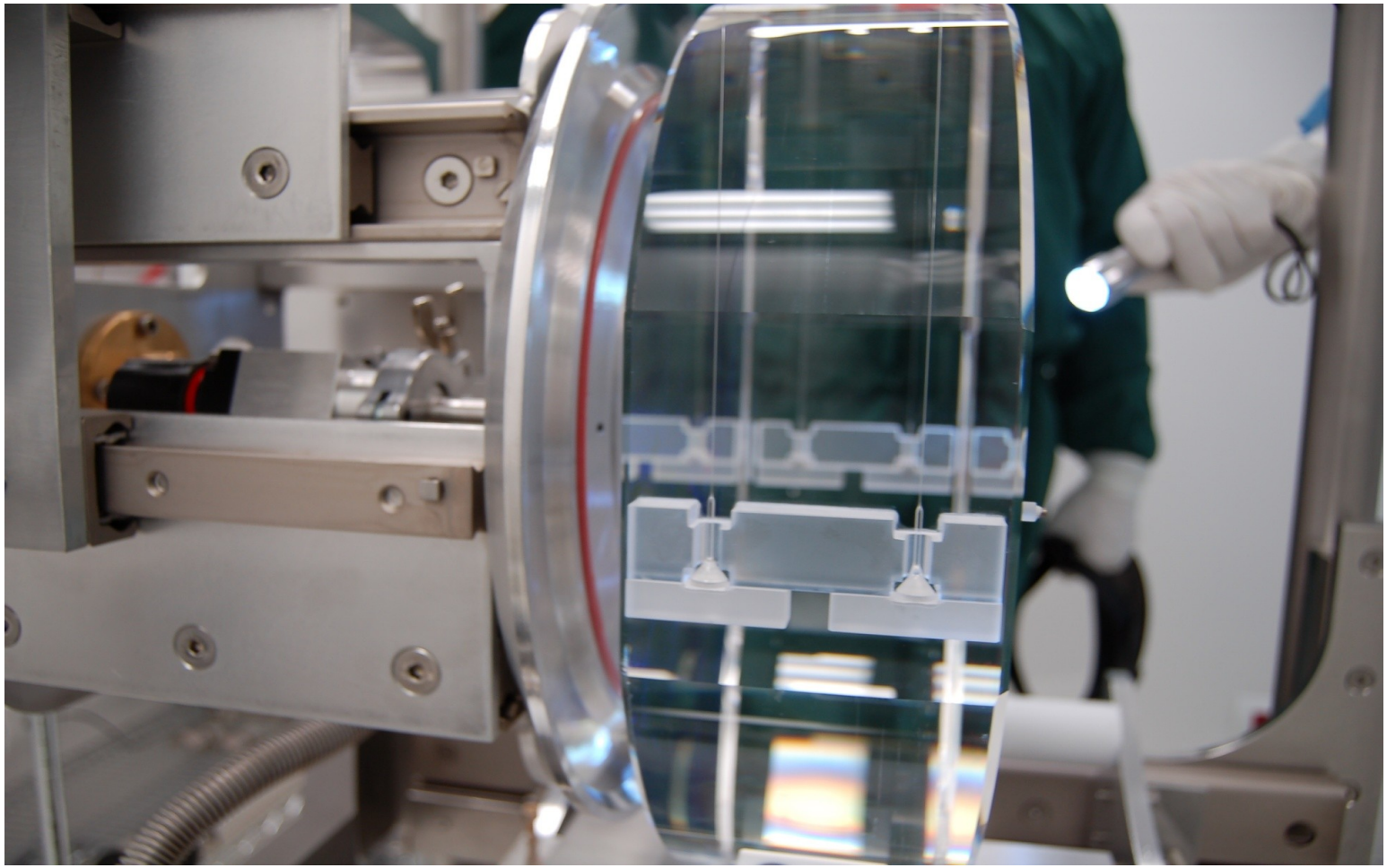
- Différents choix de configuration étudiés
- Distance probable pour coalescence :
  - ~150 Mpc NS/NS
  - ~900 Mpc BH/BH
- Détection probable : plusieurs évenements/an

Comment gagner ?

- Meilleure suspension pour LIGO
- Augmentation de la puissance du laser : ~200 W
- Bruit thermique :
  - Miroir plus gros : ~40 kg
  - Changement câble de suspension en silice (en test pour Virgo+)
  - Meilleur matériau
- Planning : début construction 2011
  run scientifique à l'horizon 2015

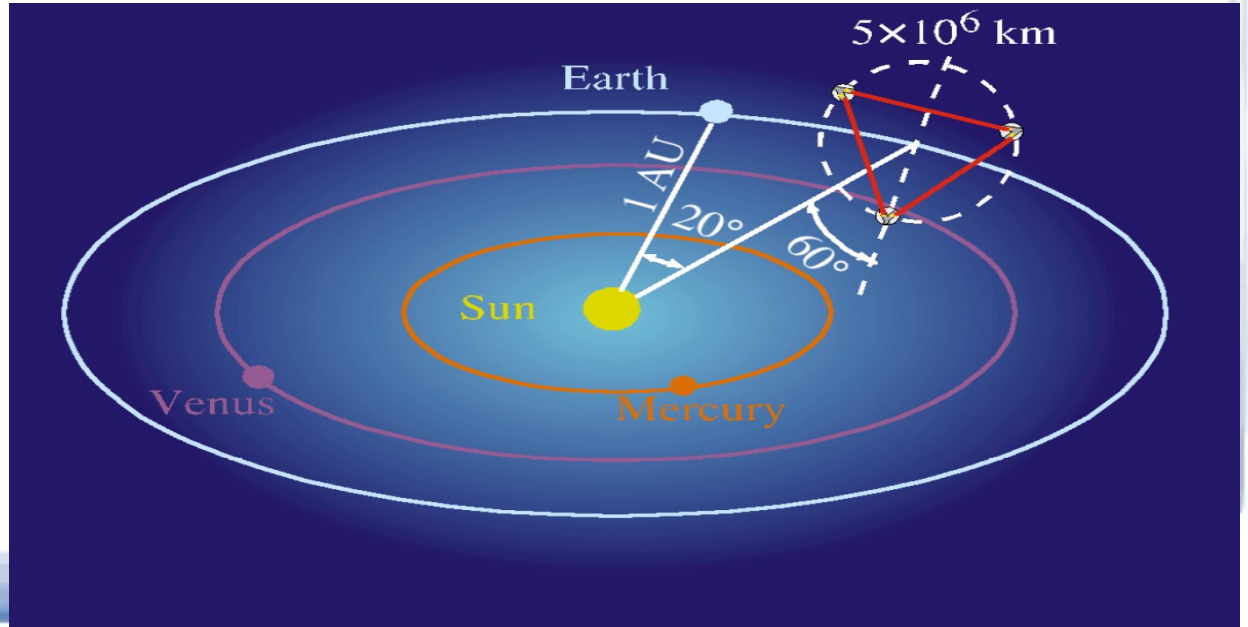
Exemple d'une suspension

- Fibre de silice Ø 0.28mm, L= 0.7m, chaque fibre est capable de tenir 10 kg

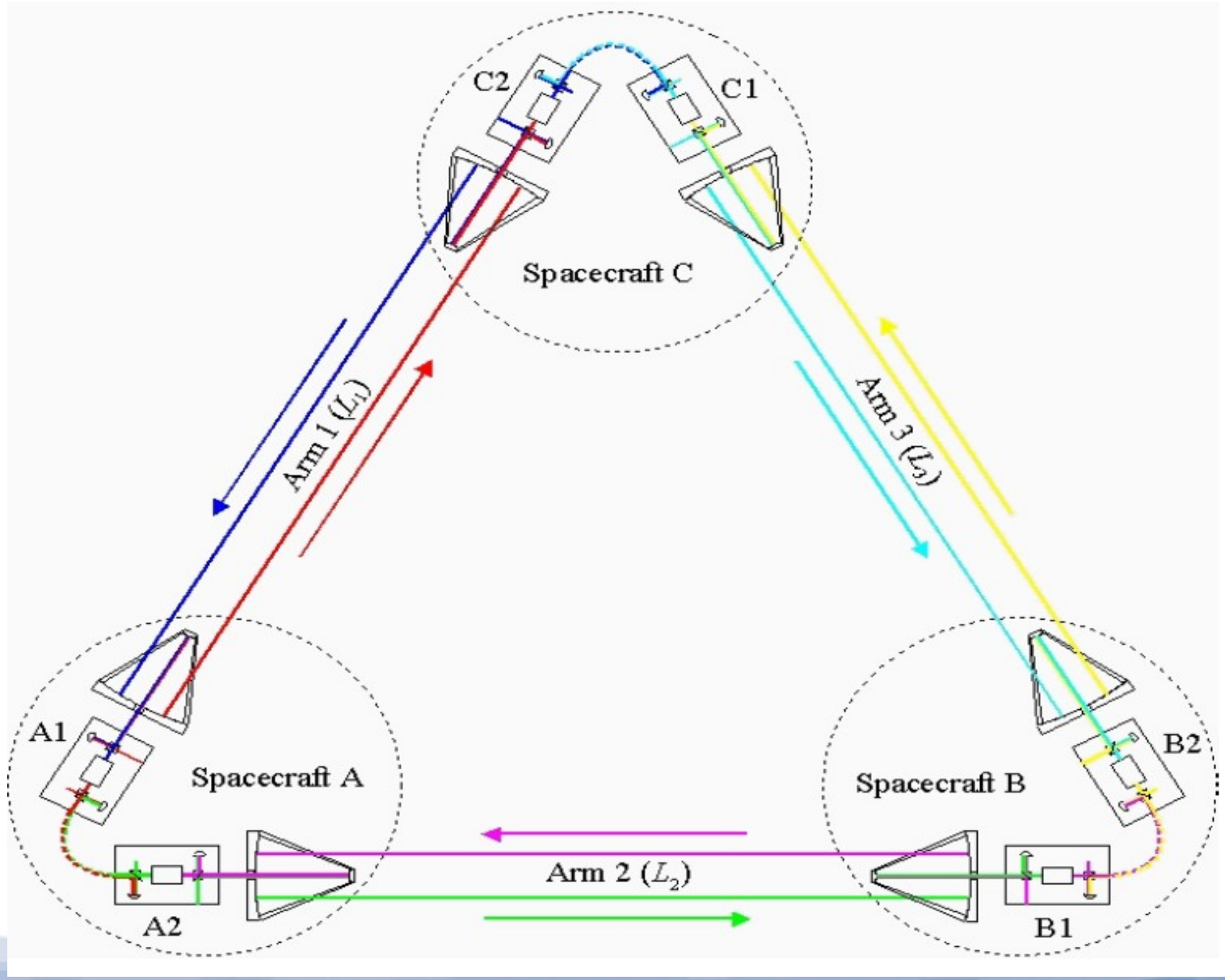


Changeons de taille ...

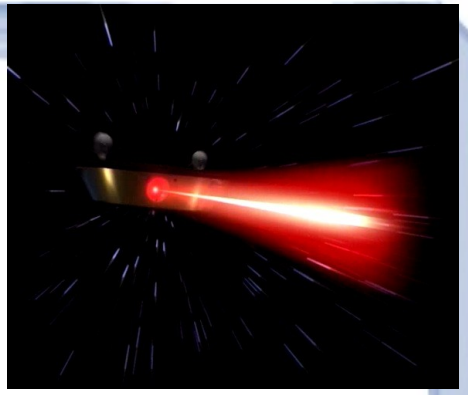
- Essayons-nous au spatial avec LISA
- Objectif : observer les OG entre 10^{-4} et 0.1 Hz
  - Trous noirs supermassifs
  - Début de la coalescence des binaires galactiques
- Utiliser des bras de 5 **<u>millions</u>** de km avec 3 satellites



Configuration optique



Le principe de base



- Avoir 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
  - Chaque 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 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 des deux autres satellites:
  - Caractériser entièrement les faisceaux
  - Faire la mesure d'interférométrie
- S'assurer que l'on garde une masse de référence en chute libre
- LISA sera limitée par des bruits instrumentaux mais aussi (et essentiellement) par des signaux provenant de sources non résolues
- Trouver et sécuriser son financement ... (NASA vient de lâcher le projet)

Une première étape

- LISA Pathfinder – décollage prévu en 2013
- Tester une partie des technologies nécessaires pour LISA
  - 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 5 millions km à 10 cm
- Passage important pour s'assurer la réussite de LISA

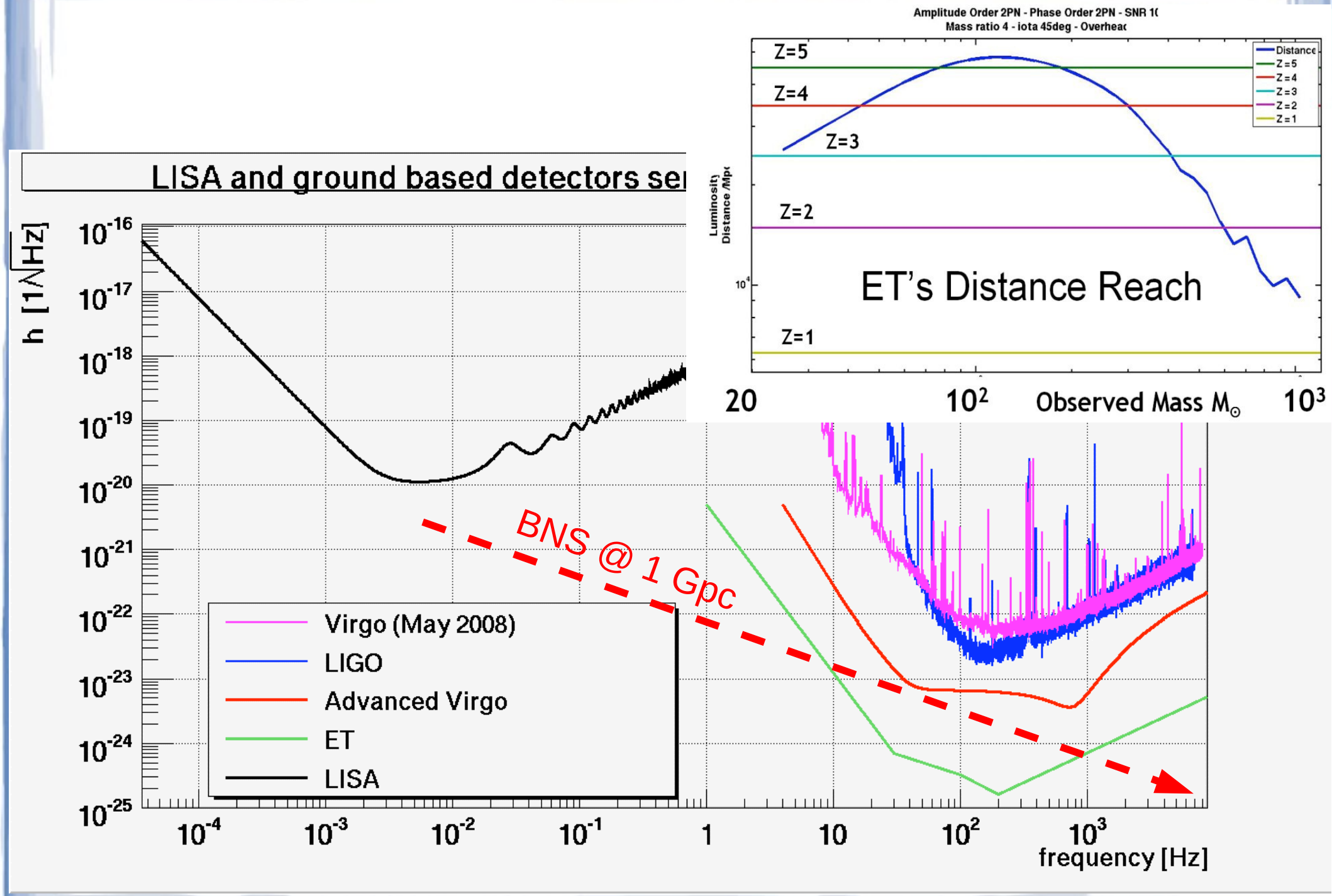
Au final

- Les ondes gravitationnelles sont produites par les masses en mouvements
- Elles sont une conséquences de la théorie de la relativité générale
  - Tests de la théorie
  - Études en milieu très dense – impossible autrement
- Leur détection implique l'utilisation de technologies de pointe
- Beaucoup de projets sont en route pour nous ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation (ou plutôt d'écoute) de l'Univers

Que pourra-t-on faire avec une astrophysique des OG

- Coalescence : futures chandelles de la cosmologie
  seule amplitude dépend de la distance
- Étude de population
- Observations de zone non accessible autrement si matière très dense
- Accès aux premiers instants de l'Univers
- Observation directe des trous noirs
- Équation d'état de la matière dans les étoiles à neutrons
- Masse du graviton
- ....

Merci de votre attention !


LISA and ground based detectors se
h [1/√Hz]
Virgo (May 2008)
LIGO
Advanced Virgo
ET
LISA
BNS @ 1 Gpc
frequency [Hz]
Amplitude Order 2PN - Phase Order 2PN - SNR 1(
Mass ratio 4 - iota 45deg - Overhea
Z=5
Z=4
Z=3
Z=2
Z=1
Distance
Luminosity Distance /Mp
ET's Distance Reach
Observed Mass M⊙