

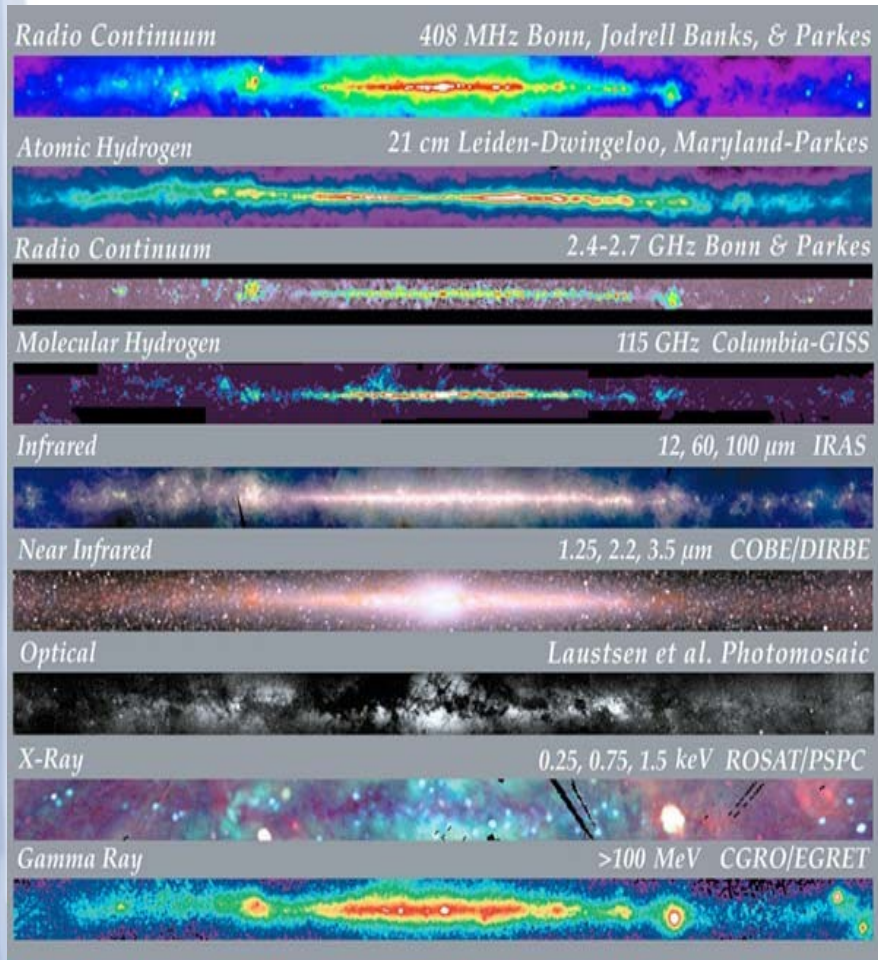
Les ondes gravitationnelles

Écouter l'Univers

Nicolas Leroy
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay

Visite 1ère S du Lycée Saint Sigisbert de Nancy
18 avril 2013

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
- L'espace : LISA

De Newton à Einstein

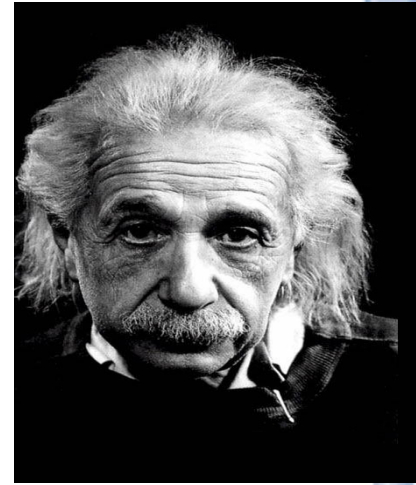


$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

Newton (1687)

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

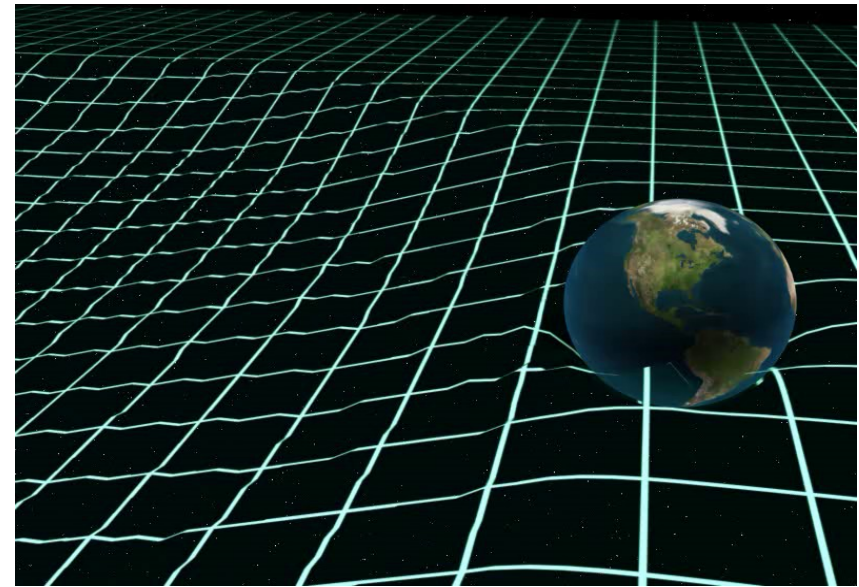
Einstein (1915)



La gravité n'est pas une force instantanée mais résulte d'une déformation de l'espace-temps

Un objet massif courbe l'espace-temps

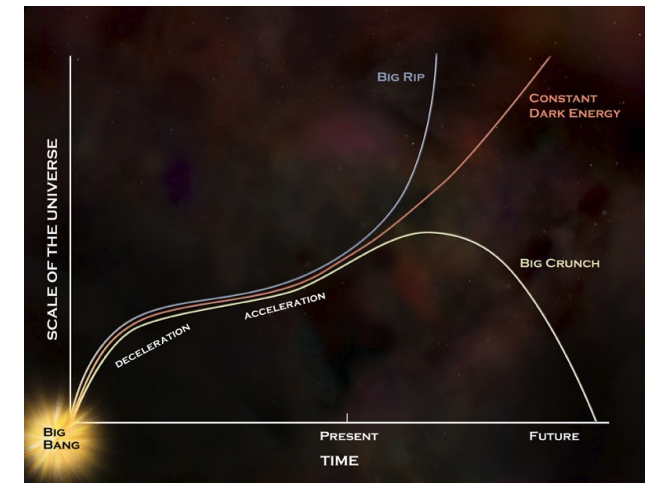
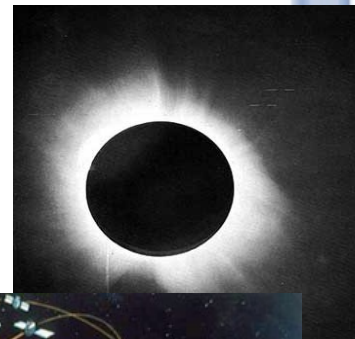
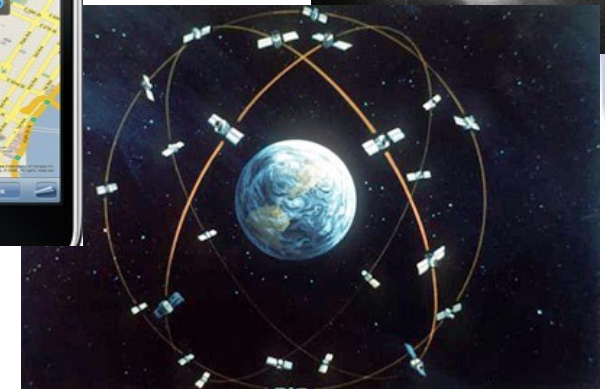
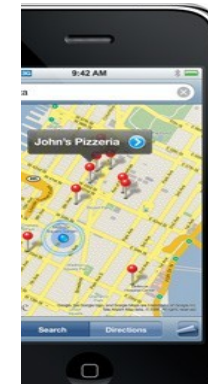
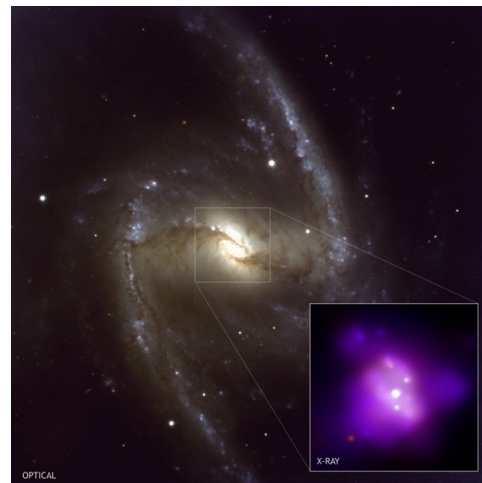
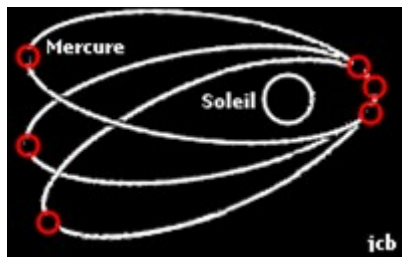
MASSE \longleftrightarrow GEOMETRIE
ESPACE-TEMPS



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

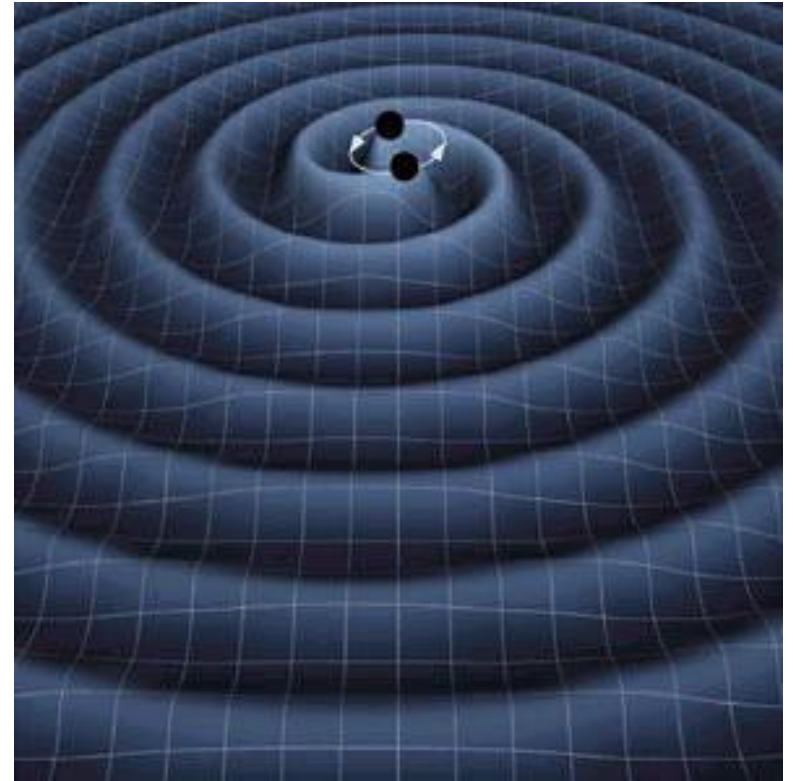
Les succès de la relativité générale

- 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)

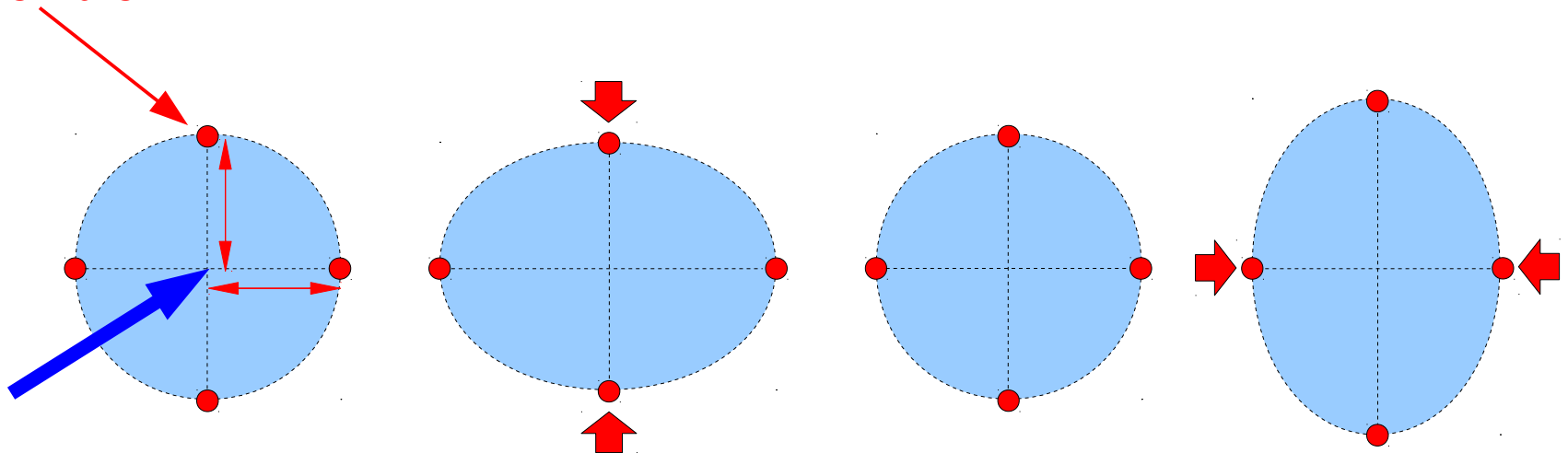


Onde gravitationnelle propage une perturbation locale de l'espace-temps (à la vitesse c)

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

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	P (W)
Barreau d'acier, 500 T, $\delta\alpha\mu = 2$ 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

$h \sim 10^{-21}$

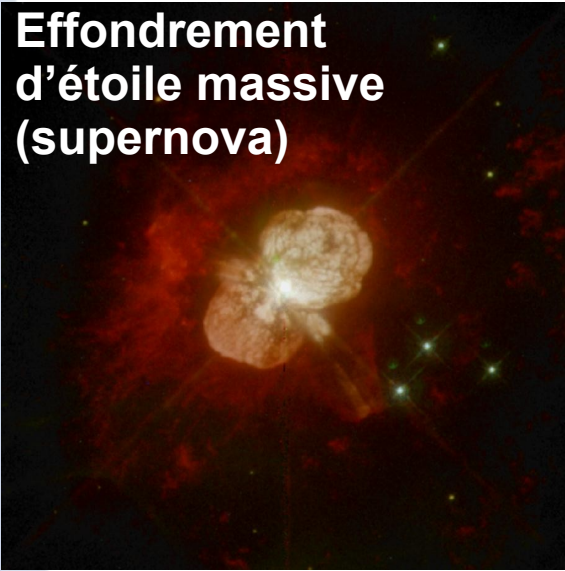
NS-NS @ 10 Mpc

$h \sim 10^{-20}$

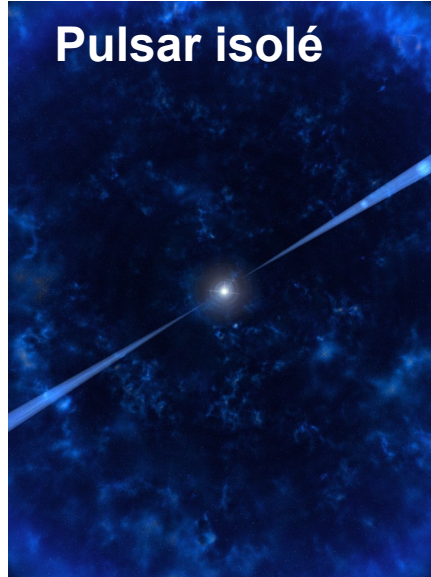
$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ al} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m}$

Sources possibles

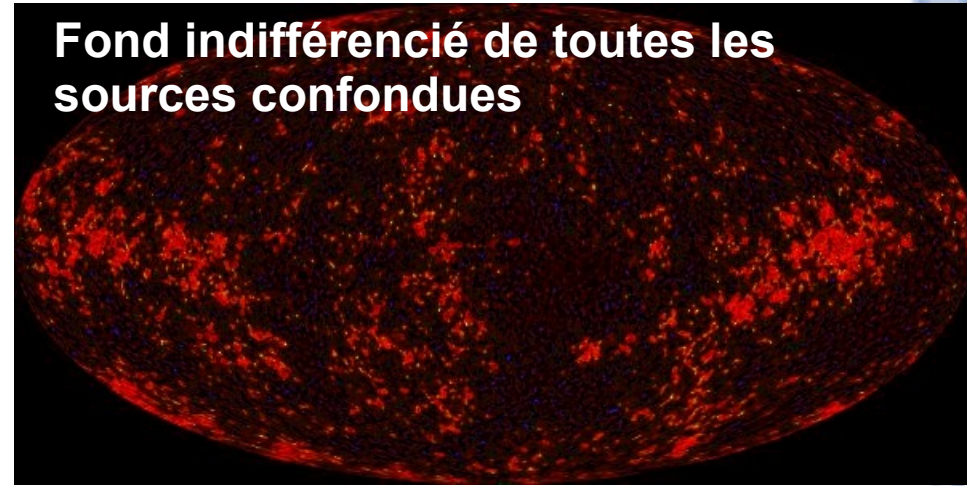
**Effondrement
d'étoile massive
(supernova)**



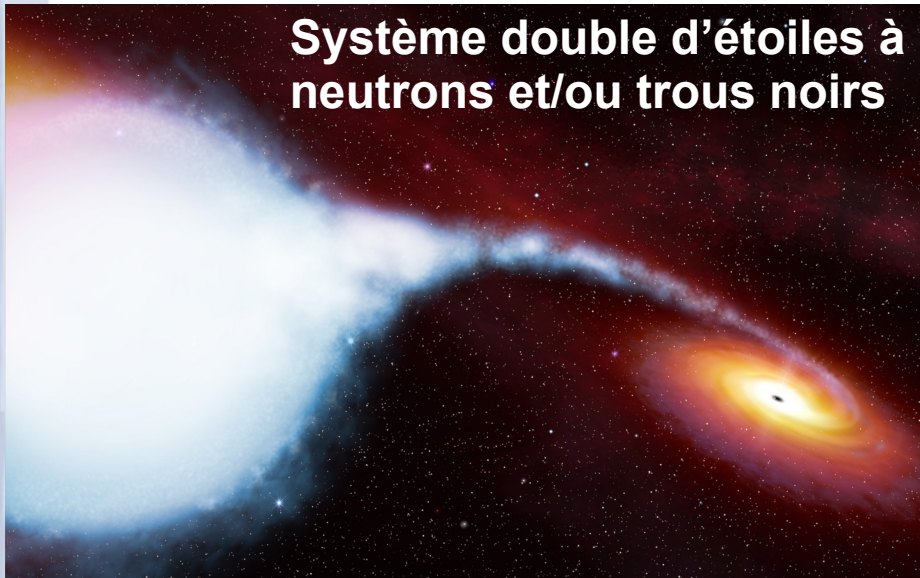
Pulsar isolé



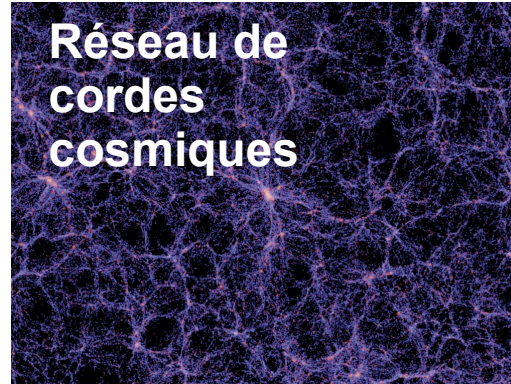
**Fond indifférencié de toutes les
sources confondues**



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



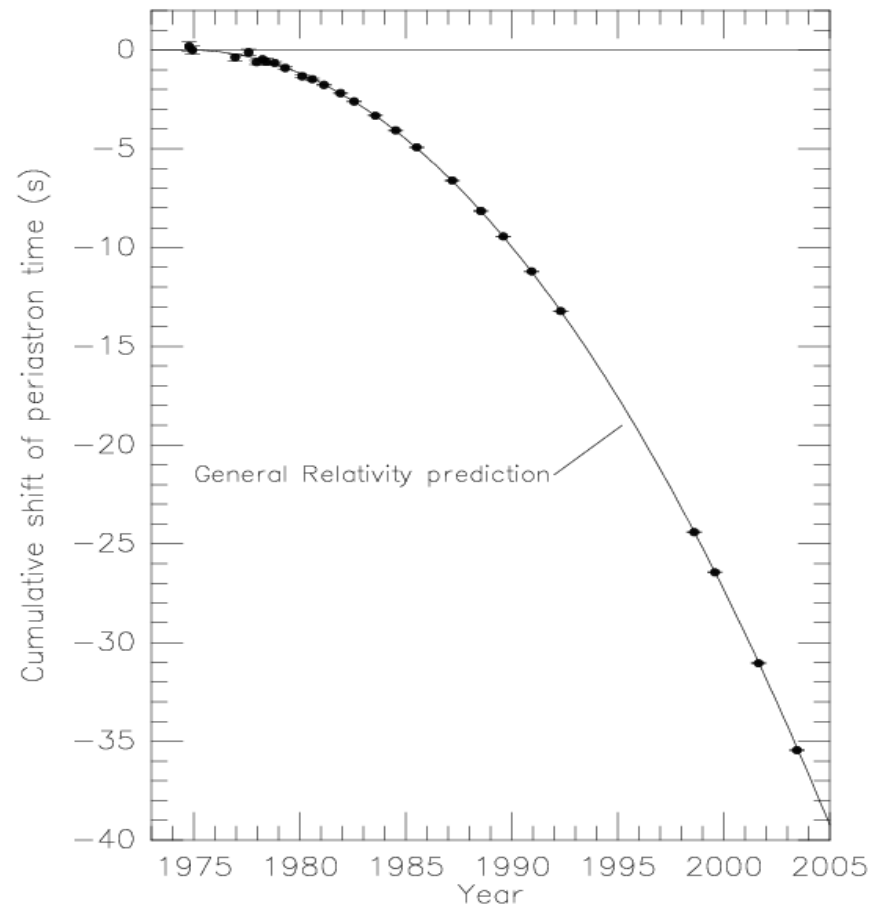
**Réseau de
cordes
cosmiques**



Surprise !

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

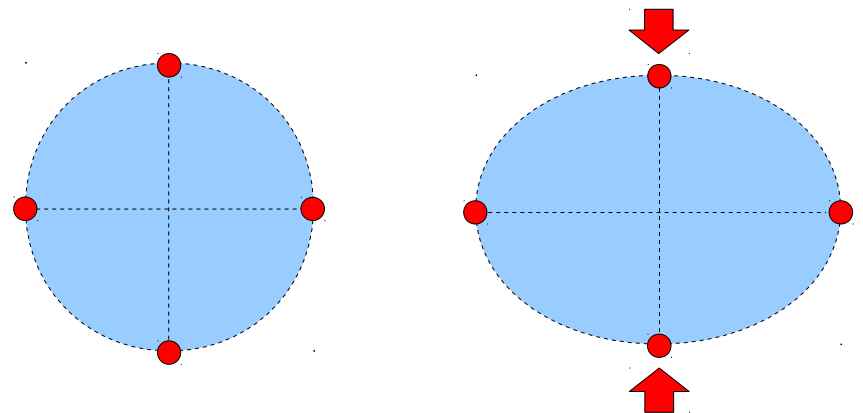


Prix Nobel Hulse et Taylor en 2003

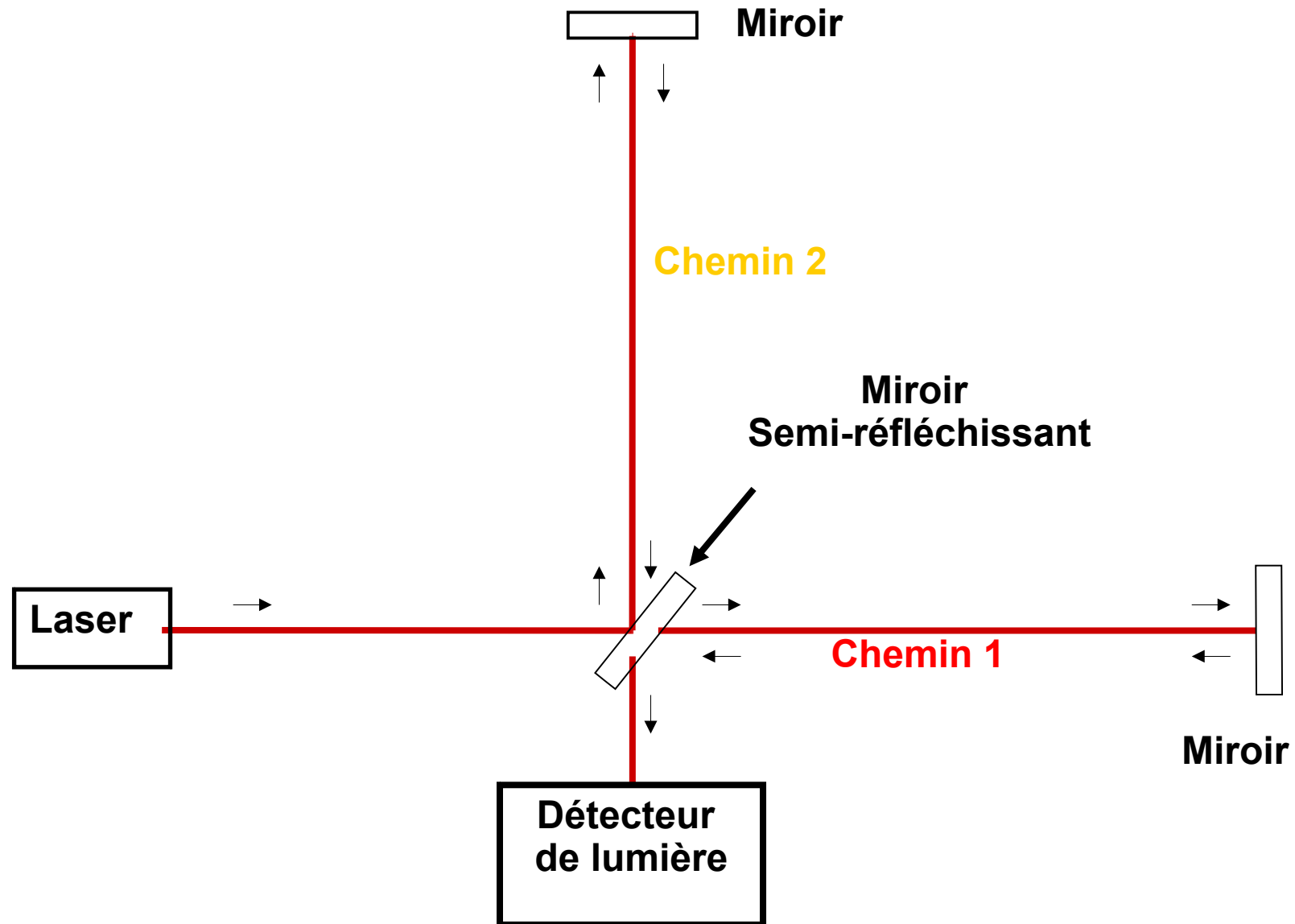
Comment les détecter ?

- Amplitudes très faible
- Peu/pas de couplage avec la matière
- Mesurer l'impact sur un solide :
détecteurs de type barres
- Utiliser l'effet différentiel

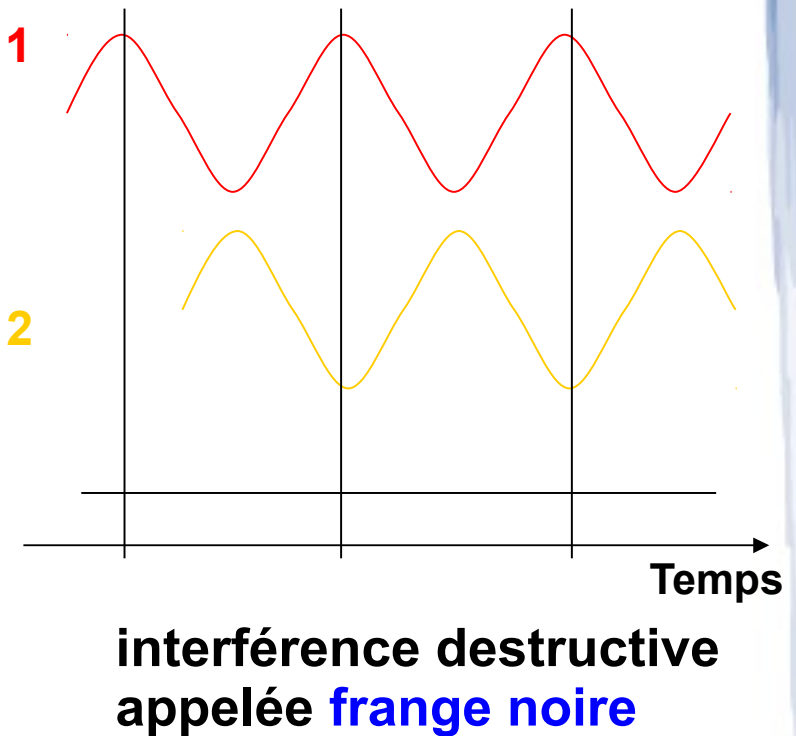
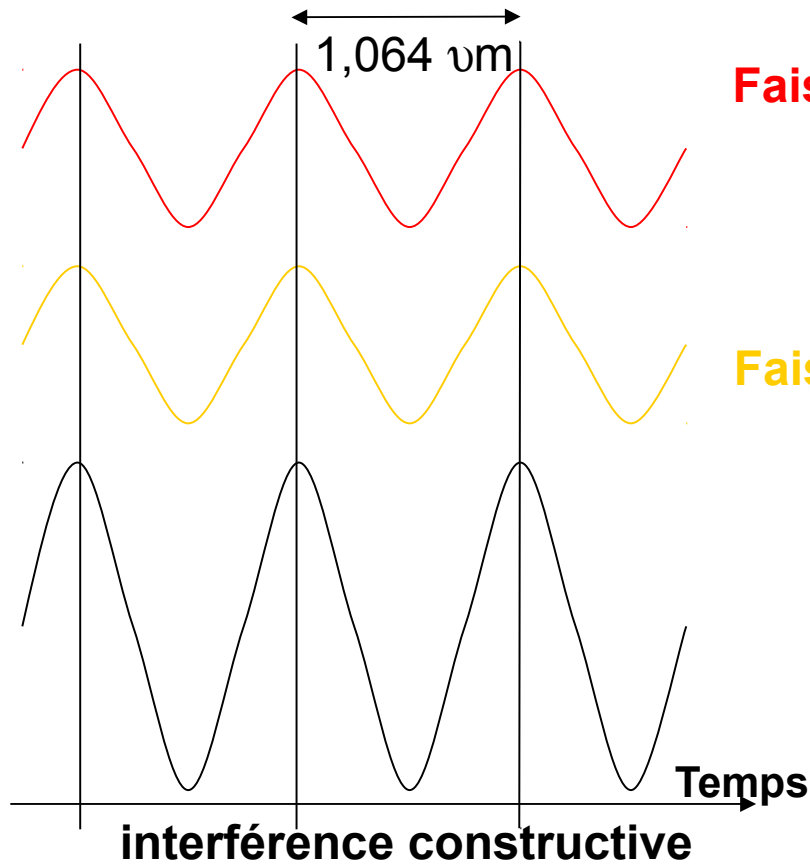
principe de l'interférométrie
semble adapté



Interféromètre de Michelson



Franges d'interférence

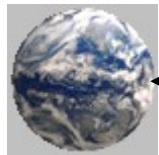


Le détecteur de lumière voit la **somme** des **deux faisceaux**

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 :

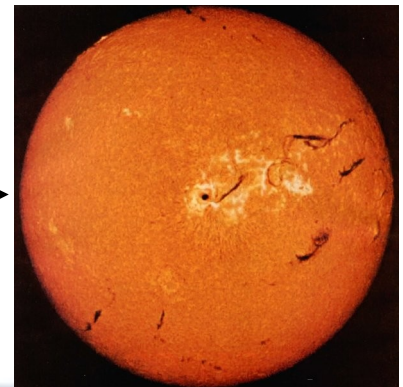


Terre

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

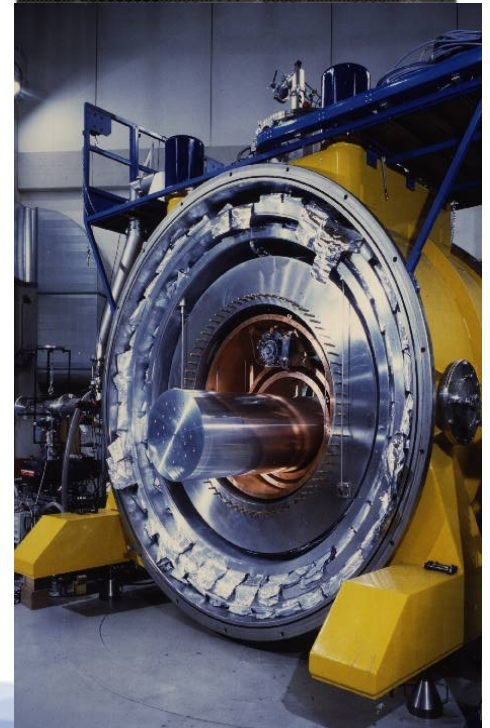
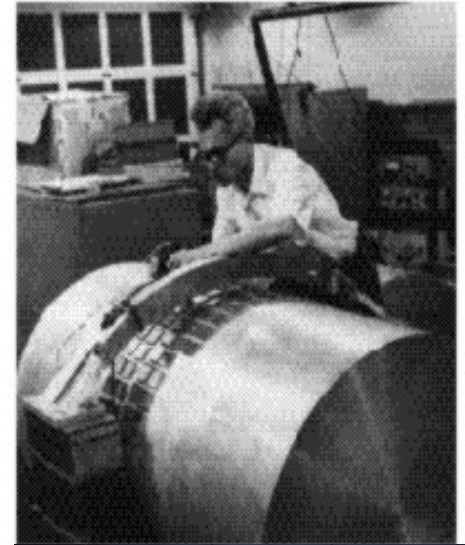
à un atome près

Soleil

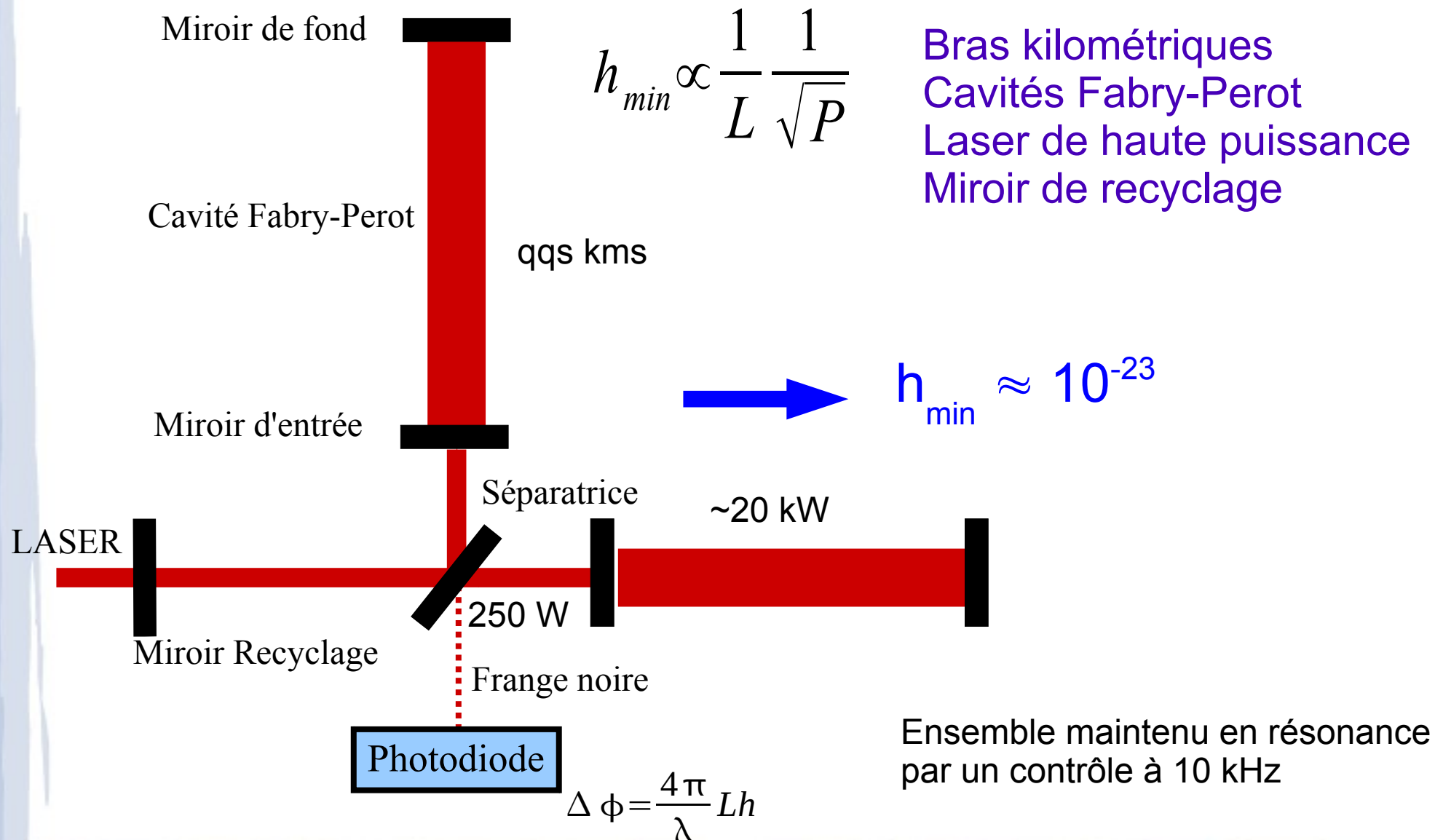


Une histoire déjà longue

- 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 CITE. LIGO : engineering runs
- Fin 2005 LIGO à sa sensibilité nominale
- 2007 Premier run commun LIGO/Virgo
- 2009 Virgo ~ à sa sensibilité nominale



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 (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 ($\sim 7000 \text{ m}^3$ à 10^{-9} mbar)
- Contrôler en permanence le système (à 10 kHz) pour le garder à son point de fonctionnement optimal

Un réseau mondial de détecteurs

Virgo (3 km)



Livingston (4 km)



Geo (600 m)



Hanford (2 - 4 km)



S'isoler du sol

- Origines du bruit (quelques exemples):
 - Houle
 - Activité humaine
 - Tremblements de terre
- Bruit sismique mesuré :
 - Filtrage indispensable



Pendule inversé : 7m, 1 tonne
5 filtres passifs intermédiaires

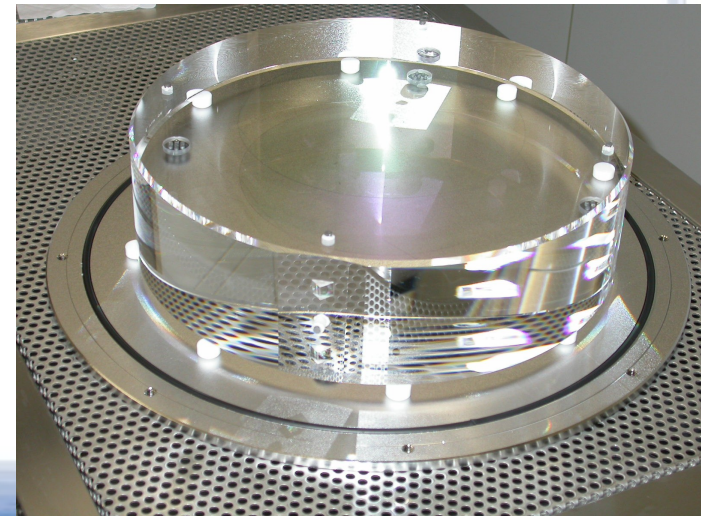
Atténuation sismique:
 $\sim 10^{14}$ à 10 Hz

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 %
- Faibles pertes (absorption, diffusion) de l'ordre que quelques ppm à $\lambda=1064\text{nm}$
- Surface définie avec défauts $<$ à 30 nm ($\lambda/40$) sur 30 cm de diamètre

Solution actuelle :

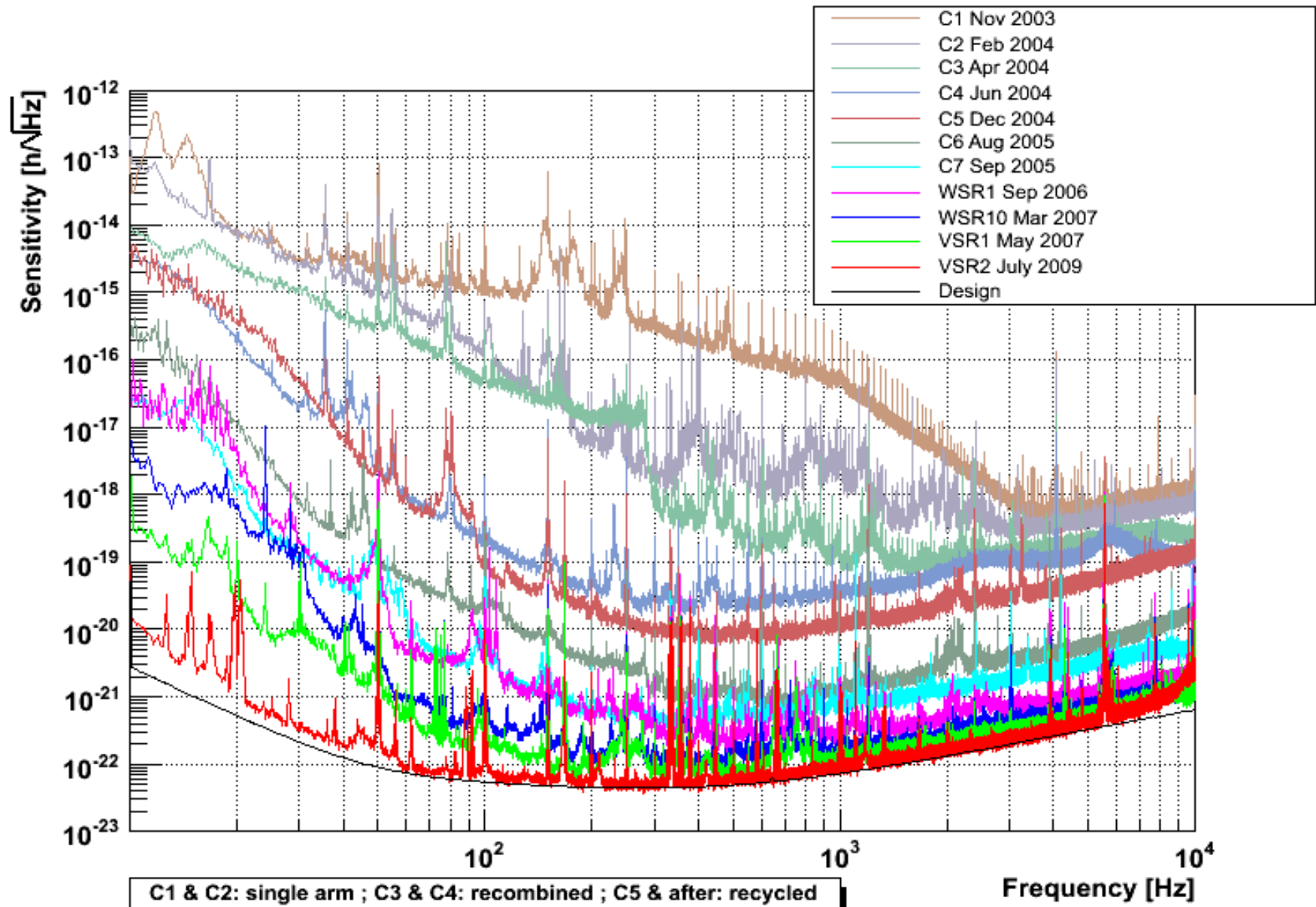
- miroir en silice (SiO_2)
- diamètre : 35 cm
- épaisseur : 10 – 20 cm
- masse : 20-30 kg



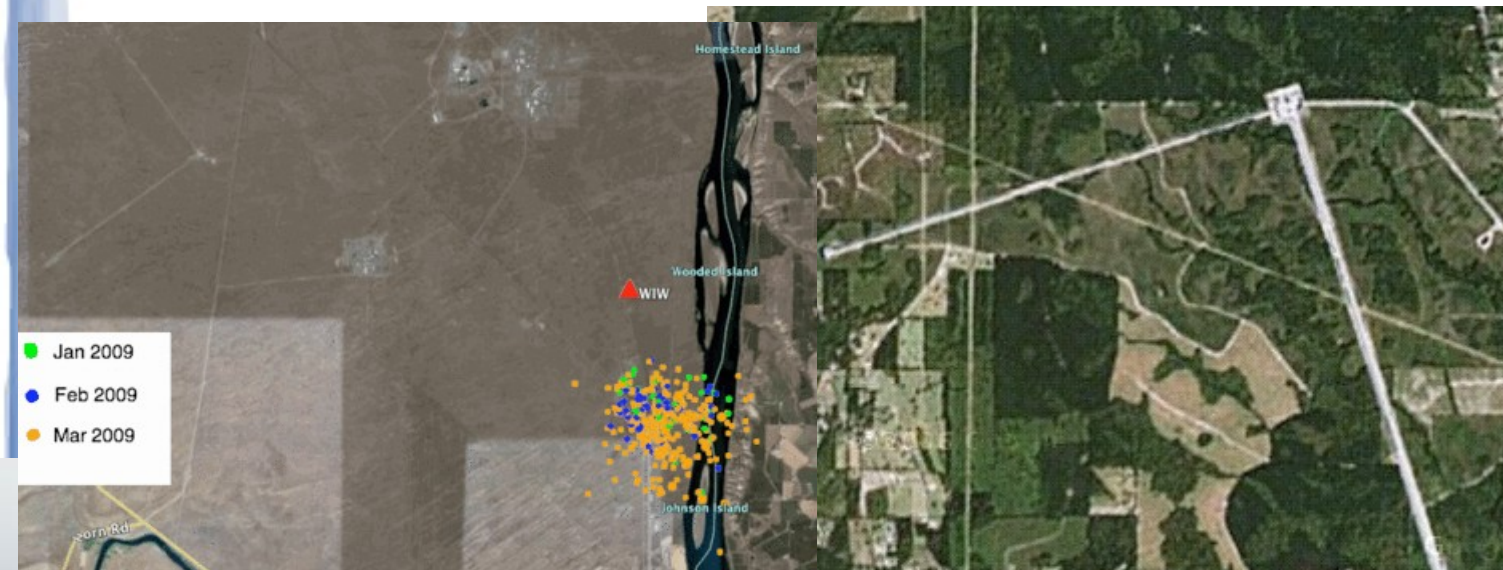
Autres problèmes possibles

- 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

Cela ne se fait pas tout seul



Expériences dans la vie réelle



Exemples de LIGO
@ Sam Waldman



Performances malgré tout ça

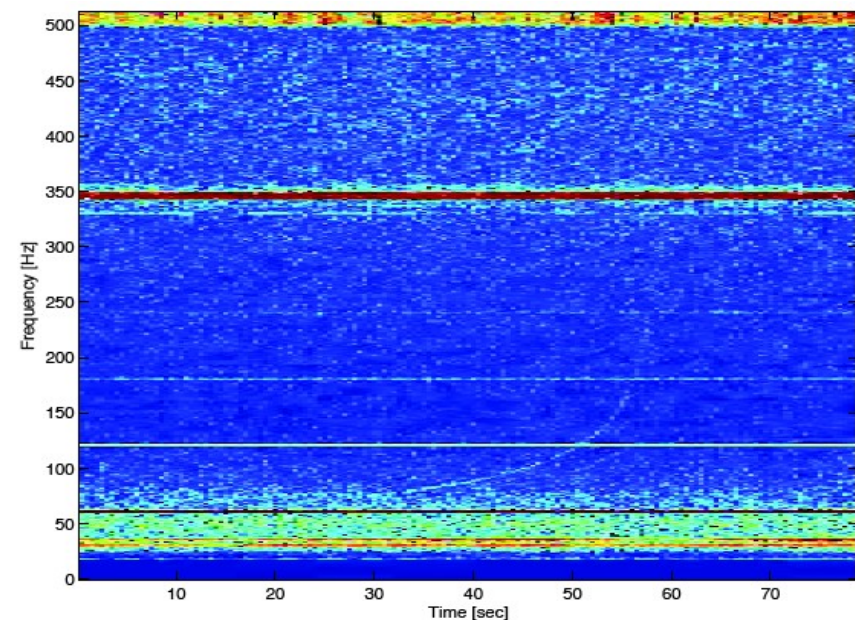
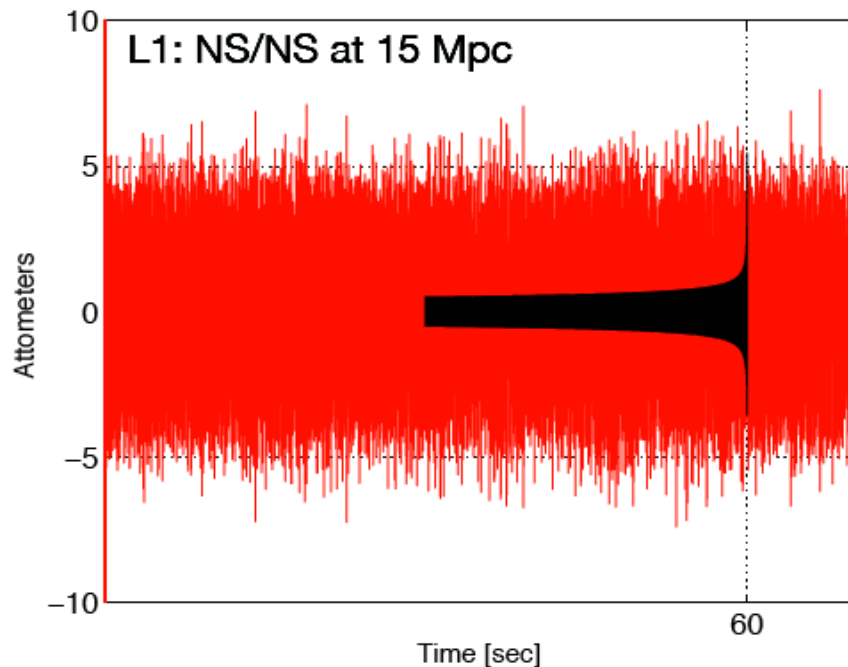
- Record de la plus longue durée de lock : 143 hrs (juillet 2009 – Virgo)
- Première prise de données commune en 2007:
 - LIGO S5 : nov 2005 – oct 2007 (3 ITFs)
 - Au moins 2 instruments : 70 %
 - Triple coïncidence : 52 %
 - Virgo VSR1 : mai 2007 – oct 2007
 - Temps utile : 80 %
 - Coïncidence entre les 3 sites : 55 %
- Depuis juillet 2009 :
 - Virgo : 80 % de temps utile
 - LIGO : ~50 % (par ITF)
 - Triple coïncidence : ~ 25 %

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

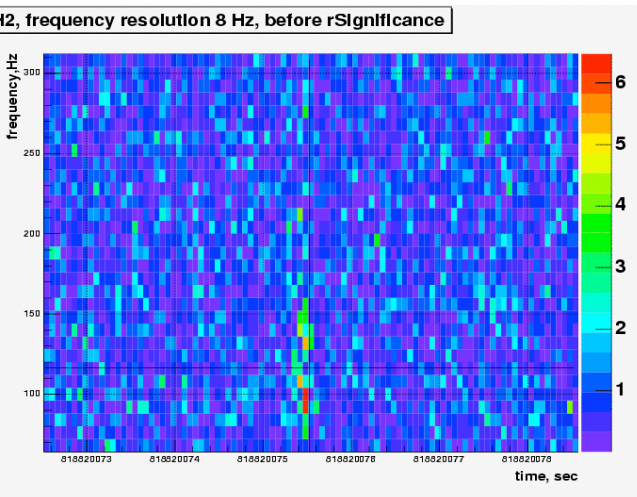
- Signaux courts :

- 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:

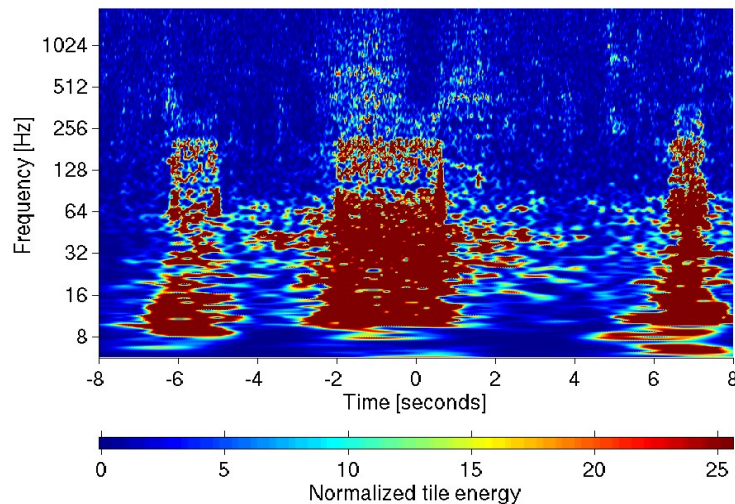
- Recherche de lignes dans le spectre du bruit en tenant compte mouvement terrestre

- Suivi des pulsars connus en rayonnement électromagnétique
 - Recherche en aveugle

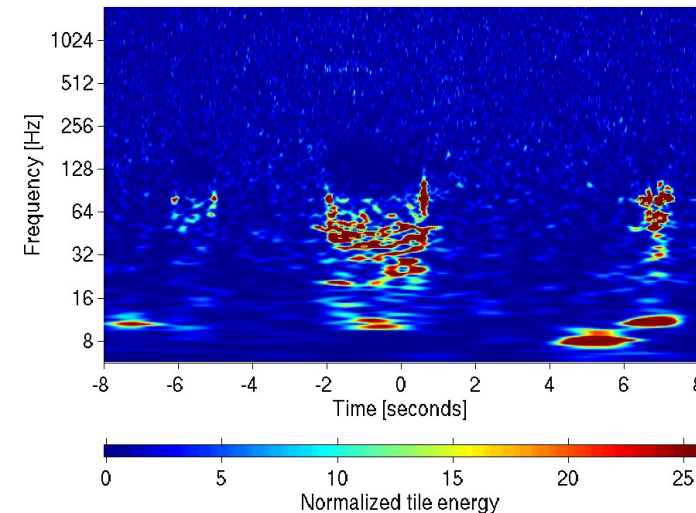
Nettoyer les données

- 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



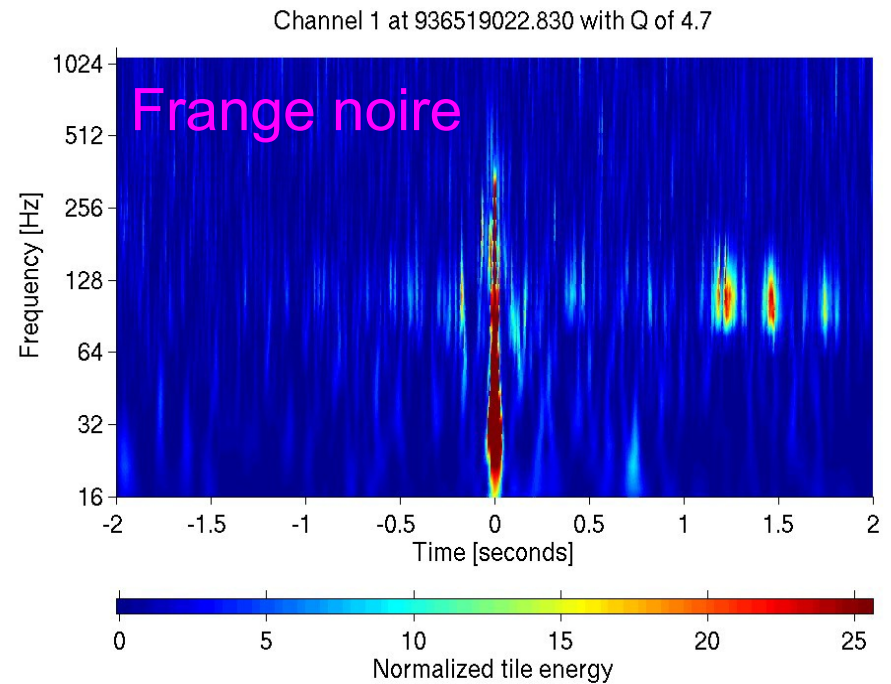
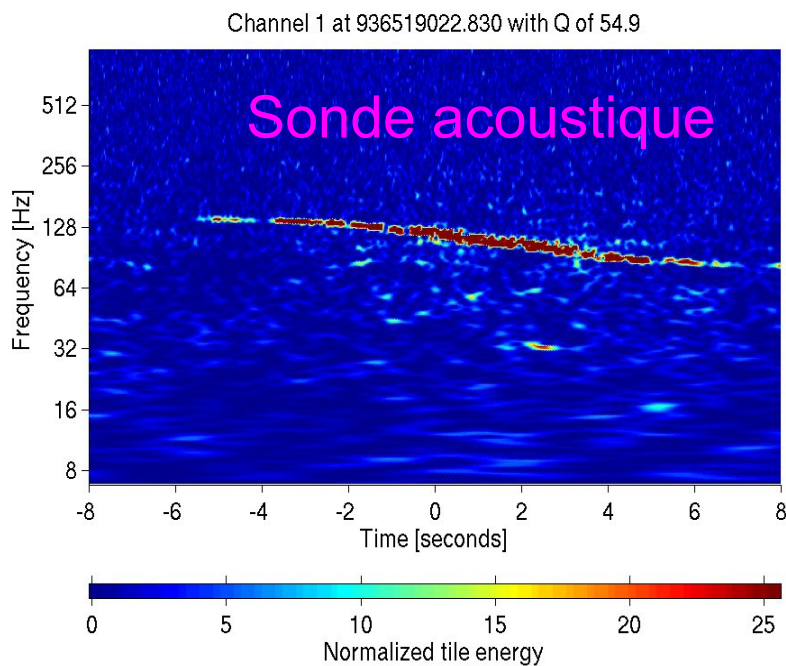
Courant envoyé sur une bobine



- Travail important sur la compréhension des bruits du détecteur

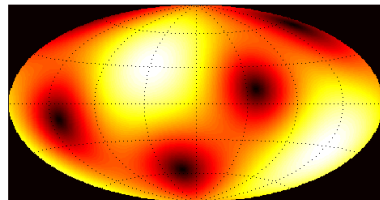
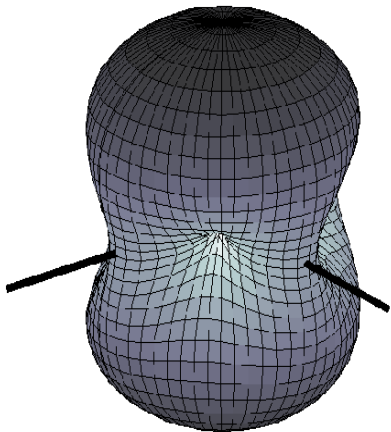
D'autres problèmes

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

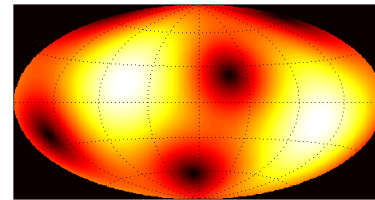


Analyse en réseau

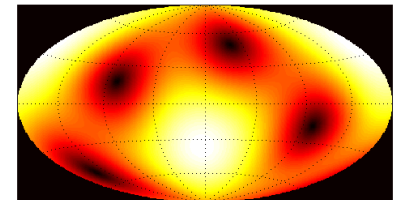
- Beaucoup d'avantages:
 - Meilleure discrimination des faux événements
 - Les ITFs ne sont pas directionnels mais n'ont pas la même couverture sur l'ensemble du ciel
 - 3 sites permet de reconstruire l'événement
 - Position de la source, précision $< 1^\circ$
 - Reconstruction de la forme d'onde



Hanford



Livingston

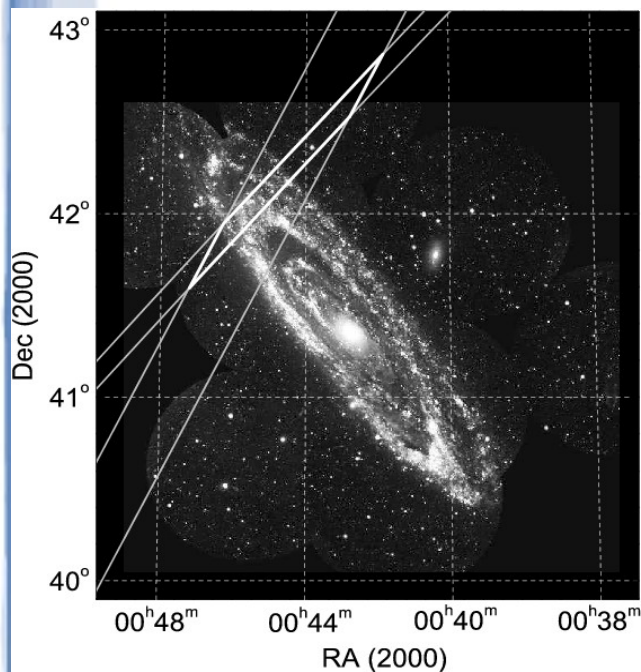


Virgo

Premiers résultats scientifiques

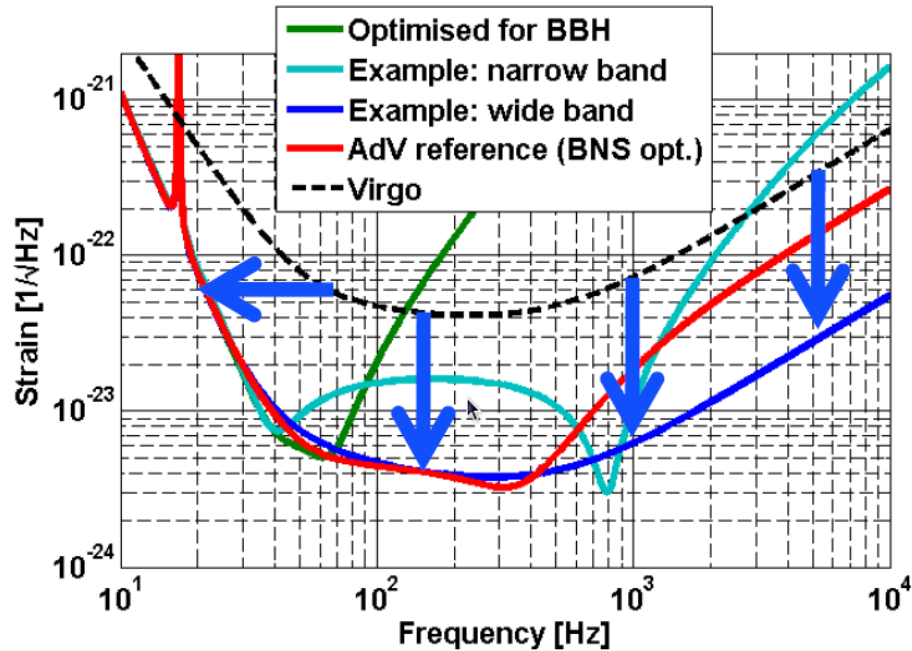
- Toujours pas d'OG détectée
- Mais le domaine commence à sortir des résultats contraignant:

GRB 070201

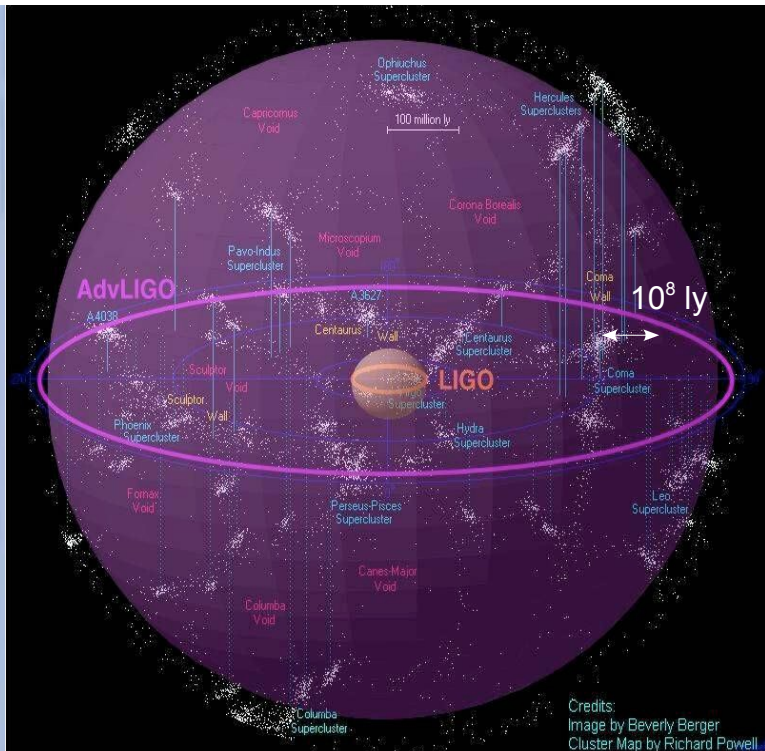


- Pulsar du Crabe : le ralentissement ne peut pas être expliqué uniquement par les OG ($\varepsilon < 10^{-4}$)
- Limites sur les sursauts gamma
- Premières contraintes sur les modèles cosmologiques

Et pour plus tard



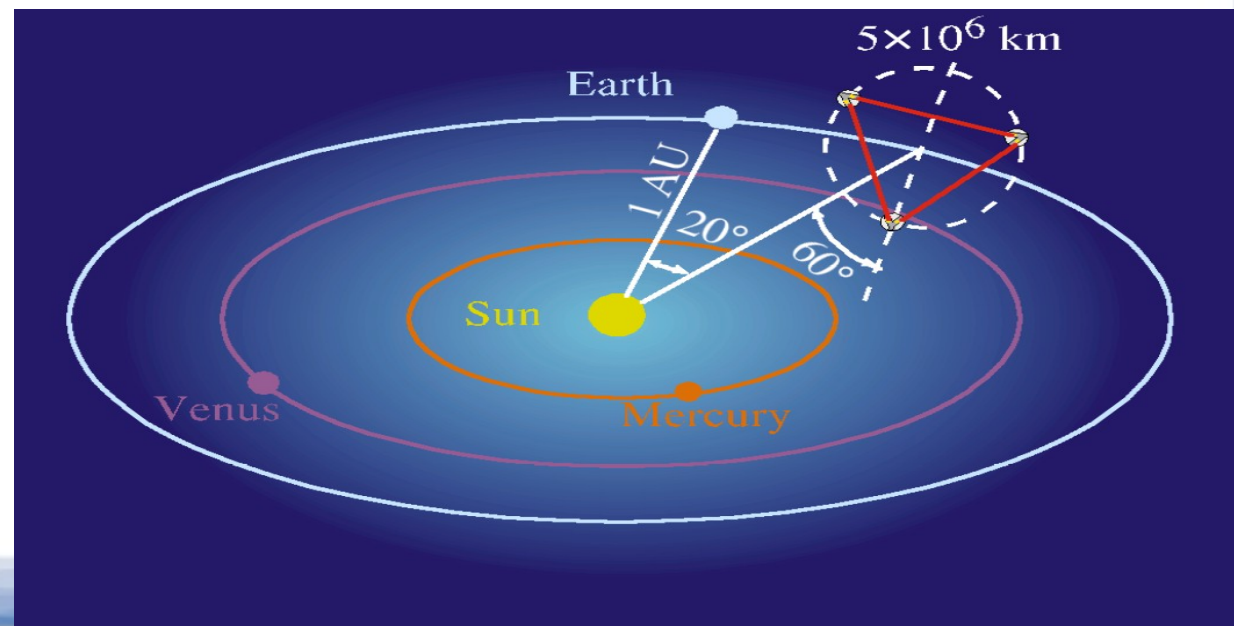
- La prochaine génération de détecteurs est déjà en route:
 - Idée : gagner un facteur 10 par rapport a LIGO/Virgo -> gain 1000 volume



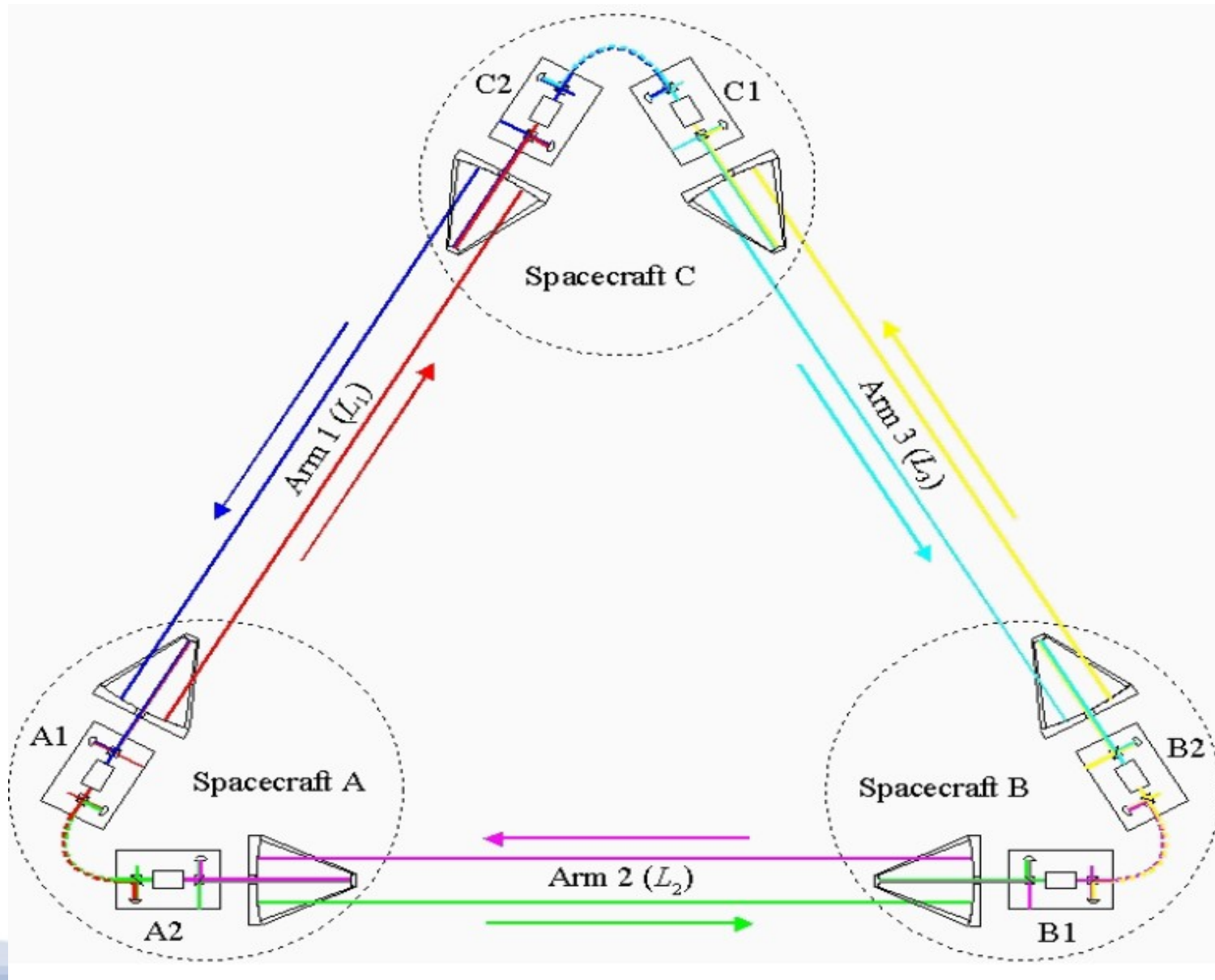
- Différents choix de configuration étudiés
- Distance probable pour coalescence :
 - ~150 Mpc NS/NS
 - ~900 Mpc BH/BH
- **Détection probable : plusieurs événements/an**

Changeons de taille ...

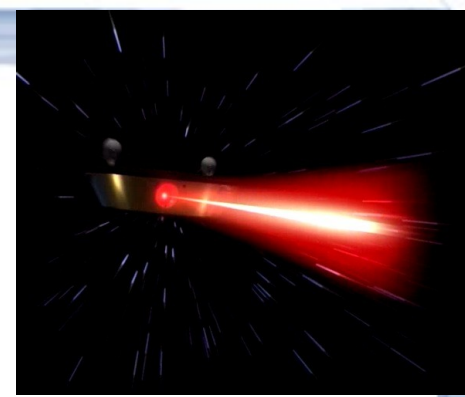
- Essayons-nous au spatial avec LISA
- Objectif : observer les OG entre 10^{-4} et 0.1 Hz
 - Trous noirs supermassifs
 - Début de la coalescence des binaires galactiques
- Utiliser des bras de 5 **millions** de km avec 3 satellites



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 ...

Une première étape

- LISA Pathfinder – décollage prévu en 2015
- 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 !