

---

# A la recherche des ondes gravitationnelles

Frédérique MARION



Gap, 18 janvier 2006

# Plan

---

- La gravitation
  - » interaction fondamentale
- Le rayonnement gravitationnel
  - » les sources astrophysiques
  - » pourquoi vouloir l'apprivoiser?
- Un défi expérimental
  - » détecter les ondes gravitationnelles

# La gravitation (I)

---

- La gravitation est une des quatre **forces fondamentales de la nature**
- C'est de loin l'interaction la **moins intense**

TYPE	FORCE RELATIVE	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	$\sim 1$	noyau, nucléons
ELECTROMAGNETIQUE	$\sim 10^{-2}$	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^{-6}$	radioactivité $\beta$ énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	pesanteur systèmes planétaires

# La gravitation (II)

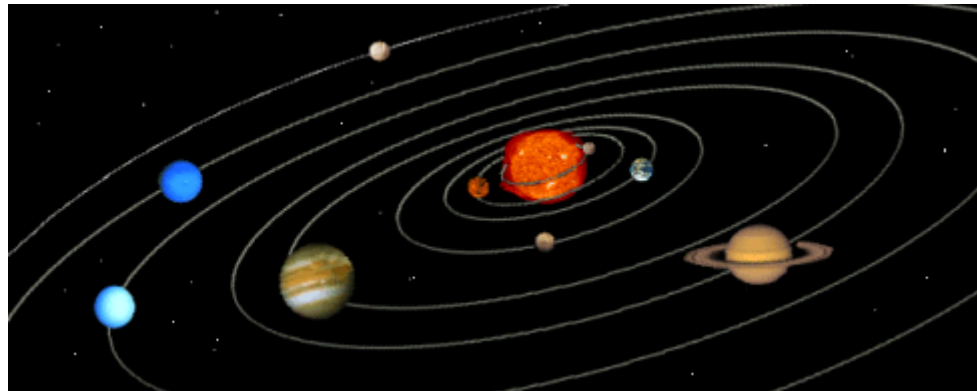
- Rapport d'intensité entre la force électromagnétique et la force gravitationnelle s'exerçant entre deux électrons  $\sim 4 \cdot 10^{42}$  !!



- La pesanteur



- Les systèmes planétaires
- La structure à grande échelle de l'Univers



# La théorie classique de la gravitation



- Attraction universelle de Newton

masses des deux corps

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

constante universelle de gravitation

distance entre les deux corps

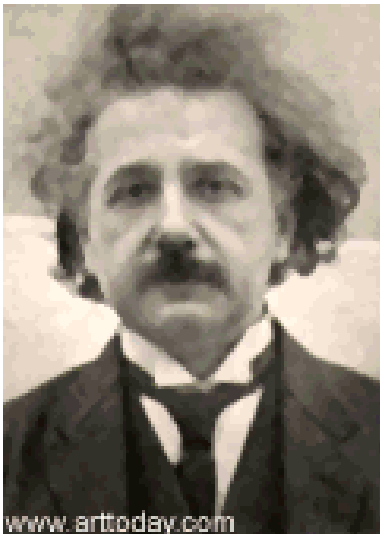
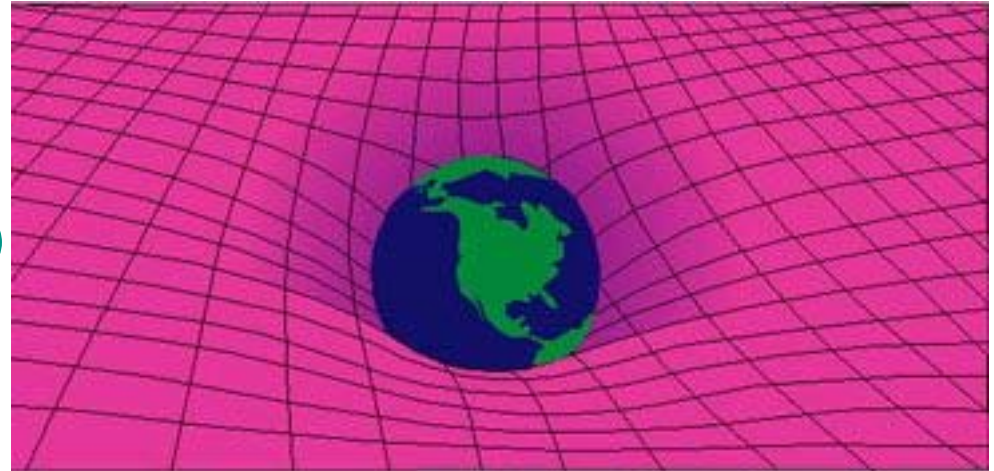
$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  unités SI

- Action à distance **instantanée**

# La théorie relativiste de la gravitation

---

- **Expérience de Michelson et Morley (1887)**
  - »  $c$  indépendante de la direction de propagation (pas d'éther)
- **Relativité restreinte (Einstein, 1905)**
  - »  $c$  constante fondamentale
  - » causalité : pas d'action à distance instantanée



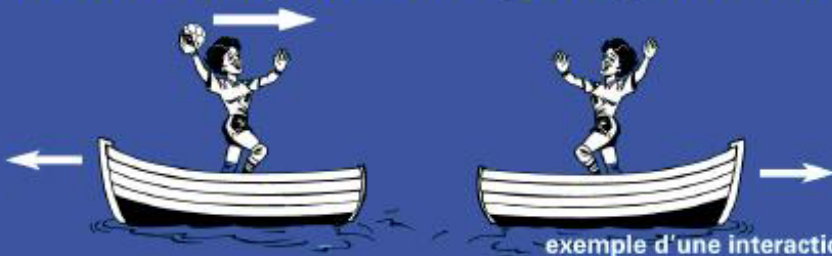
- **Relativité générale (Einstein, 1916)**
  - » masse : mesure de l'inertie & « charge » gravitationnelle  
⇒ principe d'équivalence
  - » la masse induit une **courbure de l'espace**
  - » attraction gravitationnelle :  
manifestation de la courbure de l'espace
  - » **fluctuations du champ gravitationnel** ⇒ ondes



# Une théorie quantique de la gravitation ?

**IN2P3**  
Institut National de Physique Nucléaire  
et de Physique des Particules

Les quatre interactions de la nature  
sont décrites par l'échange de particules



exemple d'une interaction répulsive

TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	$\sim 1$	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\sim 10^4$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\sim 10^5$	bosons $Z^0, W^+, W^-$	radioactivité $\beta$ énergie solaire
GRAVITATION	$\sim 10^{-39}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

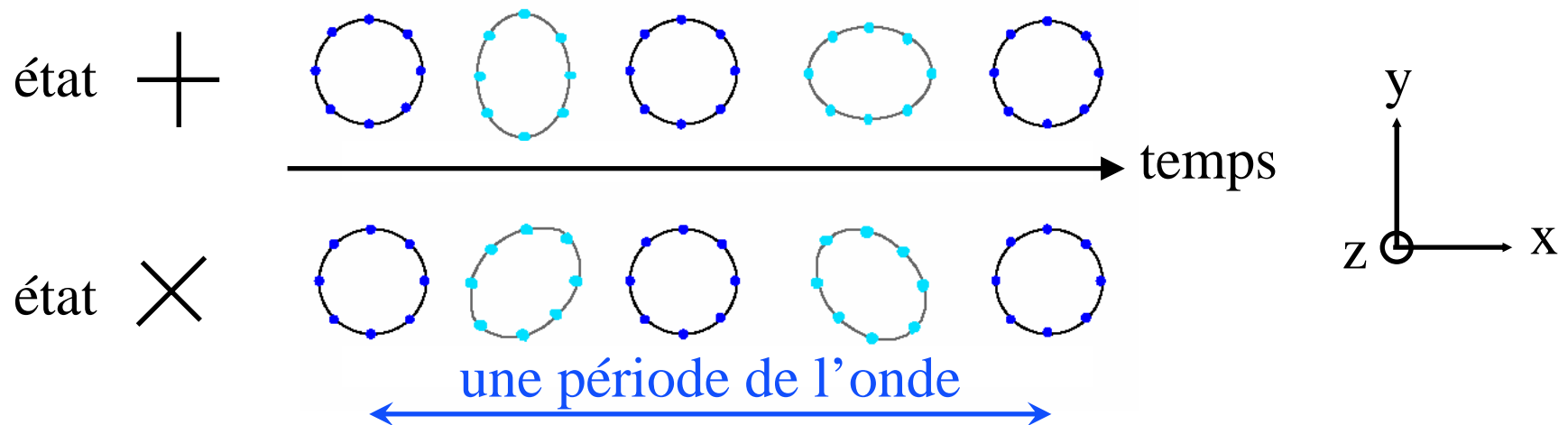
T10

- Un défi théorique

- » Une théorie quantique de la gravitation, avec le **graviton** comme médiateur
- » **Unifier** les quatre interactions fondamentales

# Les ondes gravitationnelles

- Fluctuation de la courbure de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière
  - » Modification de la « métrique » → modification de l'étalon de longueur
  - » Les distances séparant des masses libres changent !
- Une onde quelconque est la superposition de deux états indépendants
  - » Effet sur des masses libres disposées en cercle





# Amplitude des ondes

---

- Relation entre l'amplitude de l'onde et la variation de longueur

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

Plus la longueur  $L$  est grande, plus la variation de longueur  $\delta L$  est grande

- Au niveau de l'observateur

$$h \propto \frac{1}{d}$$

distance source - observateur



# Comment générer des ondes gravitationnelles ?

---

- Conditions pour qu'un système émette un rayonnement gravitationnel

- » Asymétrie
- » Accélération

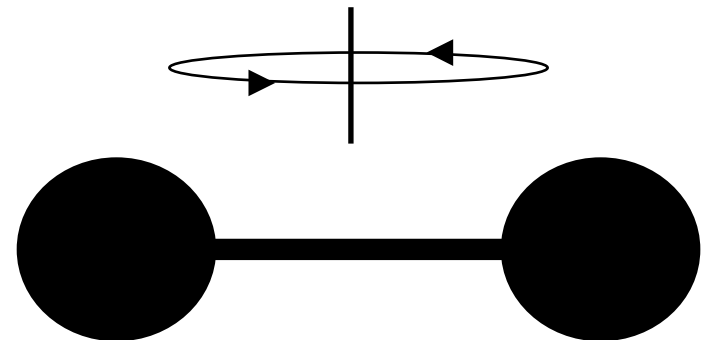
- Un générateur en laboratoire?

- » Un gros haltère en rotation rapide
  - 2 masses d'une tonne, séparées de 2 mètres
  - 1000 tours par seconde
  - Au niveau d'un observateur distant de 300 km

$$h \sim 10^{-38} !!!$$

- Considérer des sources où les masses et les accélérations mises en jeu sont importantes

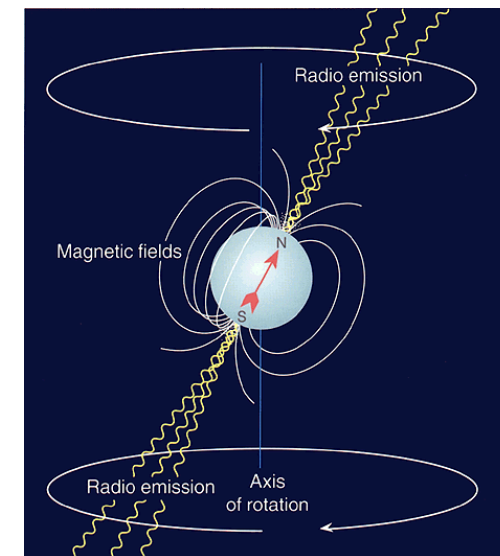
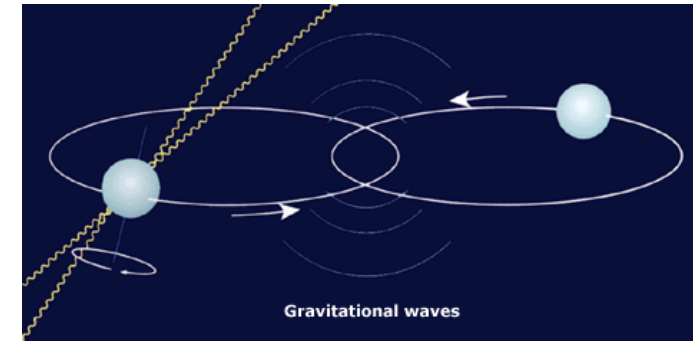
- » Sources astrophysiques
  - Prix à payer : éloignement de la source



# PSR 1913+16 : un couple star

- Découvert par R.Hulse et J.Taylor en 1974

- » Deux **étoiles à neutrons** en orbite l'une autour de l'autre
  - Étoile à neutrons :  $\sim 1,4$  fois la masse du Soleil dans un astre d'environ 30 km de diamètre !
  - Période orbitale du système  $\sim 8$  heures
- » Une des étoiles est un **pulsar**
  - Pulsar : étoile à neutrons en rotation émettant des faisceaux d'ondes radio le long de l'axe des pôles magnétiques
    - ➔ Phénomène de « phare »  
l'observateur reçoit des impulsions radio
  - La mesure du temps d'arrivée des impulsions permet de déterminer tous les paramètres du système

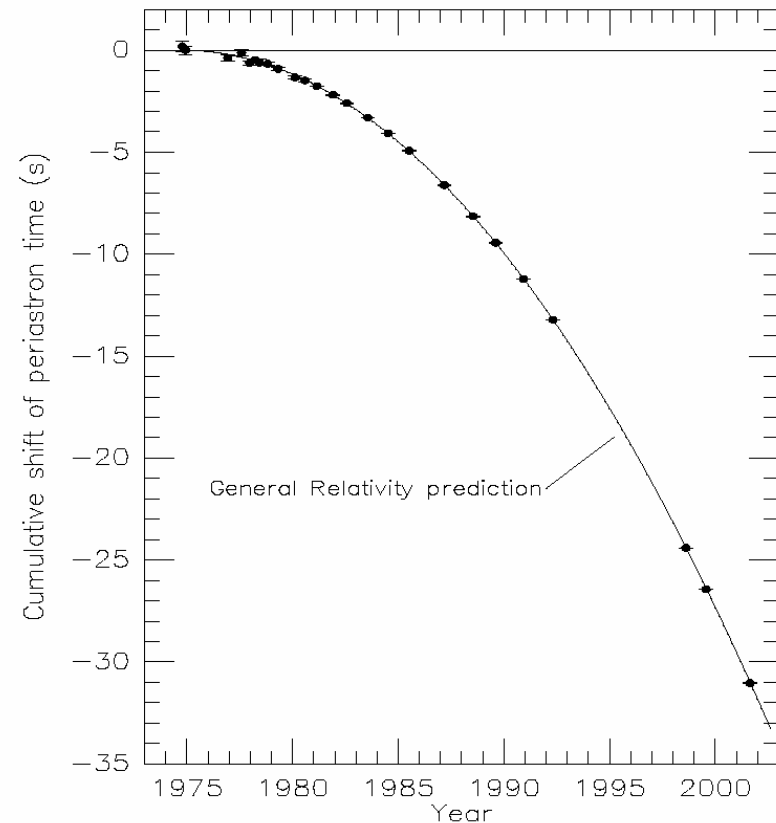


- Prix Nobel en 1993

# Les ondes gravitationnelles existent !

---

- La période orbitale du système décroît avec le temps
  - » L'orbite rétrécit :  $\sim -3$  mm par tour
- Le système perd de l'énergie par rayonnement gravitationnel
  - » Accord au millième près entre la décroissance de la période orbitale observée et la prédiction de la Relativité Générale
- Preuve indirecte seulement
  - » Reste à mettre en évidence les effets physiques d'une onde gravitationnelle



# Anticipons un peu...

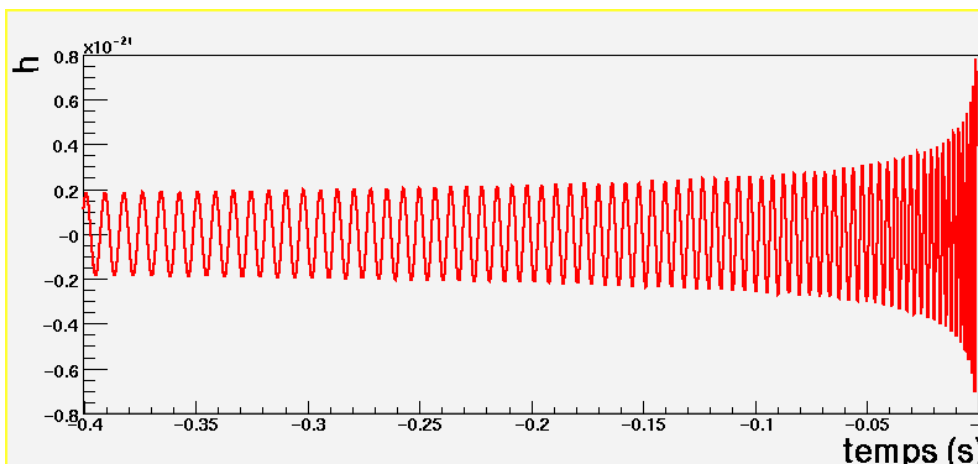
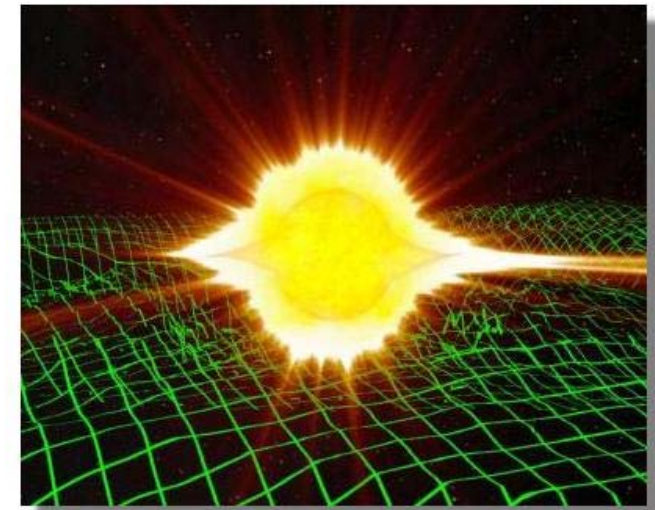
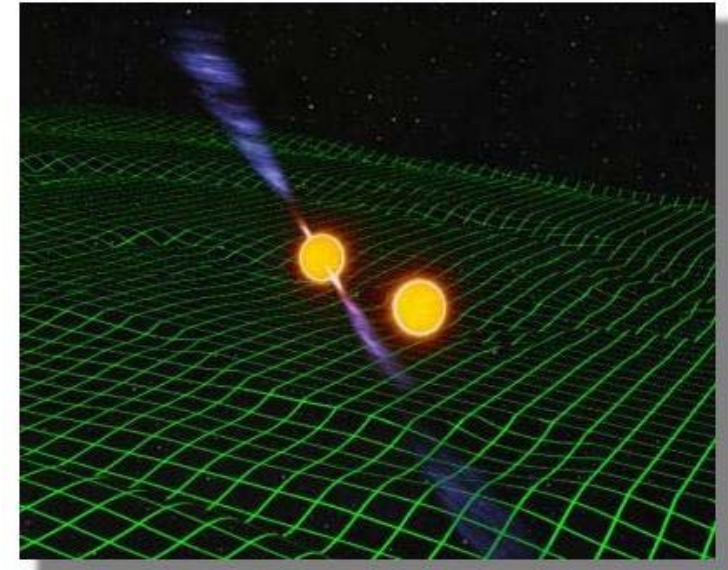
---

- La gamme de fréquence des détecteurs interférométriques terrestres est 10 Hz – 10 kHz
  - » C'est aussi la gamme de fréquence accessible à l'oreille humaine
    - Basse fréquence = son grave
    - Haute fréquence = son aigu
- La fréquence des ondes gravitationnelles émises par le système PSR 1913+16 est  $\sim 0,07$  mHz
  - » Inaccessible aux détecteurs terrestres
- Envisager d'autres sources
  - » Plusieurs questions à se poser
    - Quelle est l'amplitude typique des ondes émises ?
    - Quelle est la fréquence caractéristique des ondes émises ?
    - Est-ce un phénomène fréquent ?



# Les sources : coalescences binaires

- **Systemes binaires d'astres compacts en fin de vie**
  - » étoile à neutrons – étoile à neutrons
    - PSR 1913+16 dans des millions d'années
  - » étoile à neutrons – trou noir
  - » trou noir – trou noir
- **Amplitude typique  $h \sim 10^{-22}$** 
  - » à 20 Mpc (1 parsec = 3,26 années lumière)
- **Phénomène rare**
  - » ~ 1 événement par an - par décennie à cette distance
- **Forme d'onde très caractéristique**

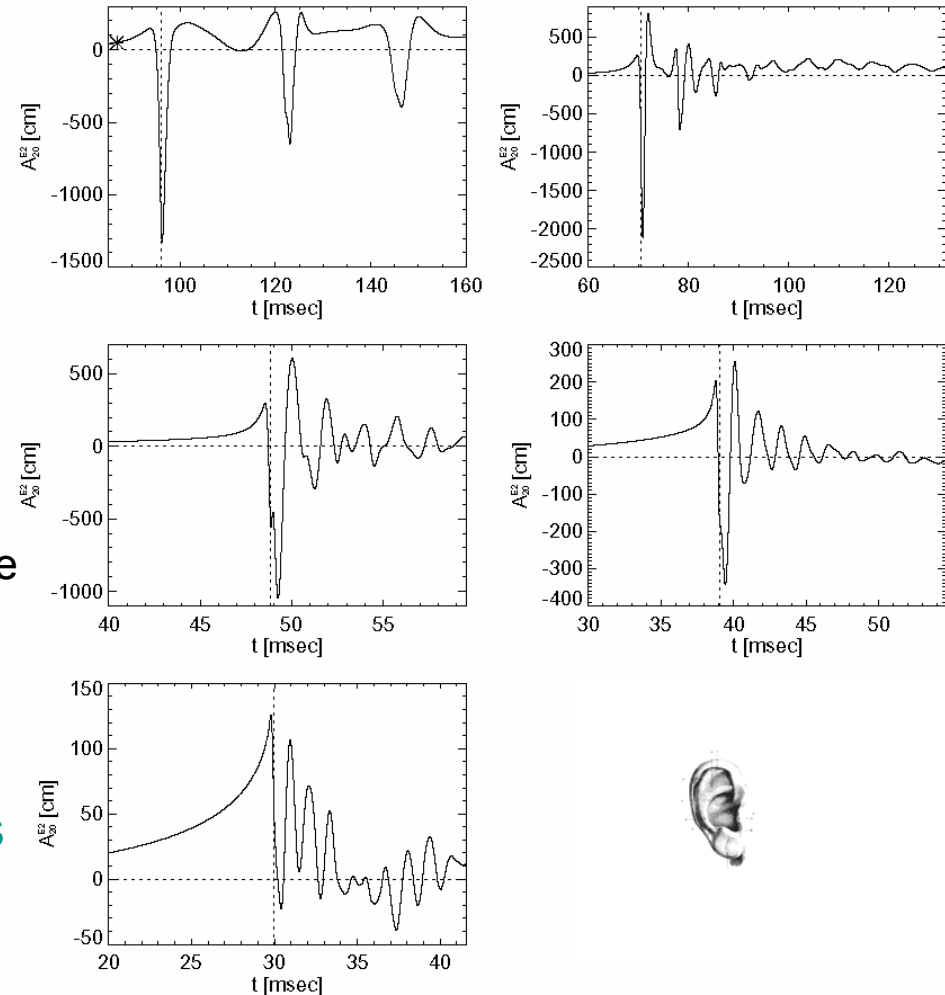




# Les sources : supernovae

- Effondrement gravitationnel d'étoiles massives en fin de vie
  - ⇒ étoiles à neutrons, trous noirs
- Peut s'accompagner de rayonnement gravitationnel
  - » amplitude incertaine
    - $h < 10^{-21}$  à 10 Mpc (?)
  - » forme d'onde difficilement prédictible
  - » phénomène peu fréquent
    - 3 - 4 / siècle dans la Galaxie
    - 1 - 10 / an dans l'amas de la Vierge
- Coïncidences avec d'autres moyens d'observation
  - » photons, neutrinos
- D'autres types de sources avec les mêmes caractéristiques
  - » phénomène impulsif
    - durée  $\leq 10$  ms

## Exemples de formes d'onde



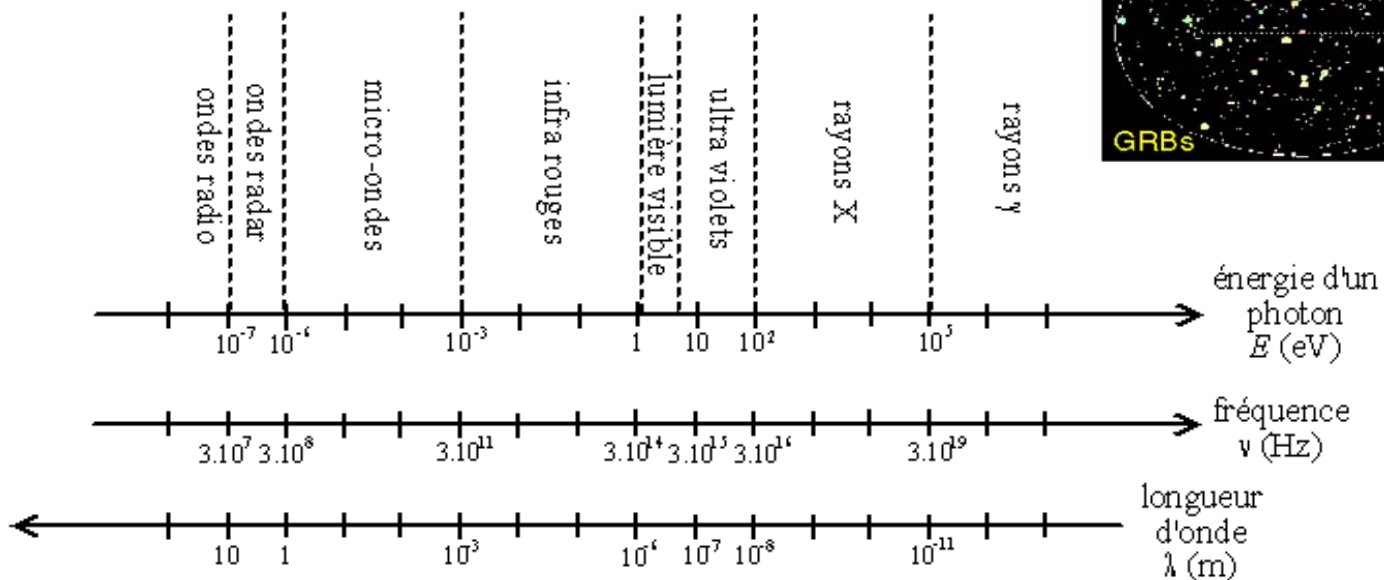
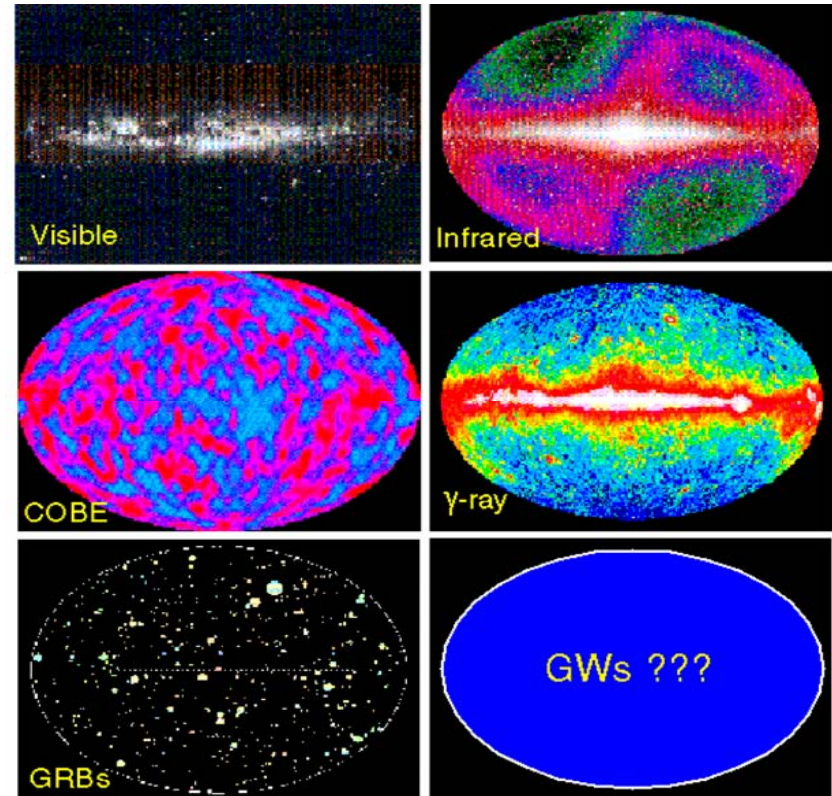
# Pourquoi détecter les O.G.? (I)

---

- Pour en savoir plus sur la gravitation
  - » Ces ondes existent-elles telles que prédites par la Relativité Générale ?
    - L'effet le plus « relativiste » de la théorie de la Relativité
    - Presque un siècle de résistance à l'expérimentation !
    - Mettre en évidence leur effet physique sur un récepteur
    - Vérifier leurs propriétés fondamentales
      - Propagation à la vitesse de la lumière
      - Existence de deux états indépendants
  - » Tests de la gravitation complémentaires des autres observations
    - système solaire
      - champ gravitationnel faible
    - pulsars en système binaire
      - champ fort
    - ondes gravitationnelles
      - champ très fort
      - effets relativistes importants
      - Observer « directement » les trous noirs à l'œuvre !

# Pourquoi détecter les O.G.? (II)

- Pour ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers
  - » produites dans des régions très denses
  - » très peu absorbées par la matière
- Aujourd'hui l'observation de l'Univers est fondée sur le rayonnement électromagnétique
  - » + neutrinos, rayons cosmiques



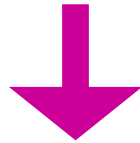
# Un nouvel outil pour quoi faire ?

---

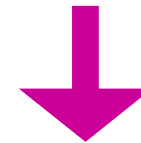
- De l'astronomie et de l'astrophysique

- » Un exemple : les **sursauts gamma**

brèves impulsions de rayonnement gamma à très haute énergie  
visibles partout dans l'Univers



Sursauts gamma **longs**  
Durée moyenne ~ 30 s  
**Hypernovae**



Sursauts gamma **courts**  
Durée moyenne ~ 0,3 s  
Hypothèse « tendance » :  
**coalescences d'astres compacts**  
2 étoiles à neutrons  
étoile à neutrons et trou noir  
→ **rayonnement gravitationnel associé ??**

- De la cosmologie

- » Structure et dynamique de l'Univers

# Le challenge expérimental

---

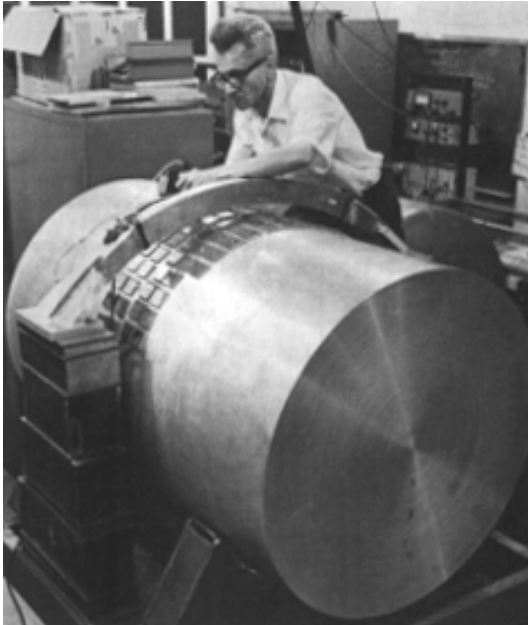
- Résumons la tâche qui attend l'expérimentateur

- » Mesurer une variation relative de longueur de  $\sim 10^{-23}$ 
  - ≡ Mesurer la distance Terre – Lune avec une précision de l'ordre de la taille d'un proton !

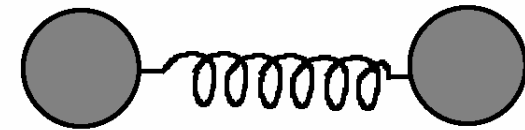
- Sensibilité du récepteur

- »  $h$  minimal pouvant être mis en évidence
  - ➔ distance maximale à laquelle un type de source donné est observable
  - ➔ volume de l'Univers accessible

# Les détecteurs résonnants



- Historiquement, les premiers détecteurs
  - » J.Weber, années 1960



- Passage d'une onde gravitationnelle détecté par la mise en résonance d'un solide massif
  - » Gamme de fréquences accessibles limitées
    - Quelques dizaines de hertz autour de 900 Hz
  - » Sensibilité limitée
    - $h > 10^{-21}$

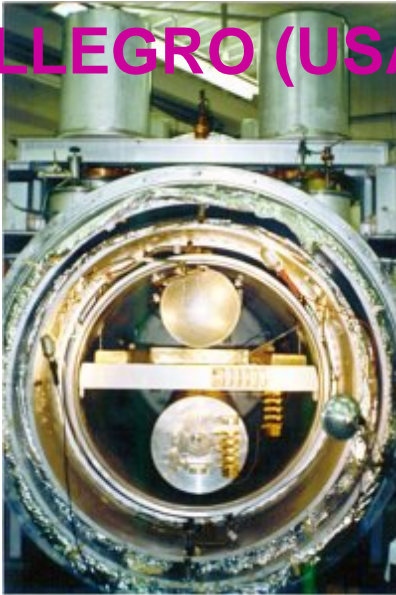




# Les détecteurs résonnants en activité

---

ALLEGRO (USA)



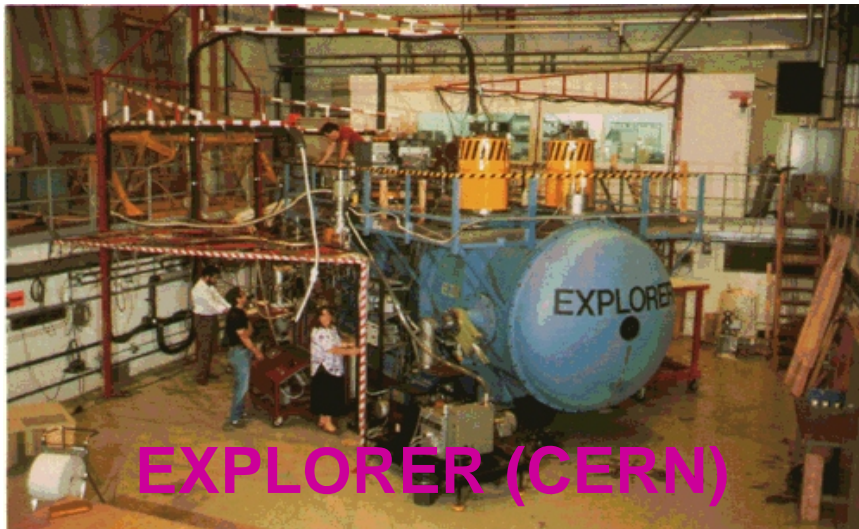
NAUTILUS (Italie)



AURIGA (Italie)



EXPLORER (CERN)



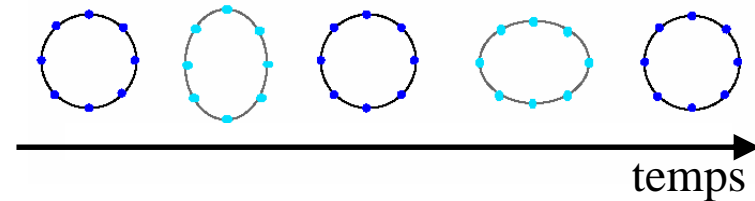
NIOBE (Australie)



# Principe de détection interférométrique

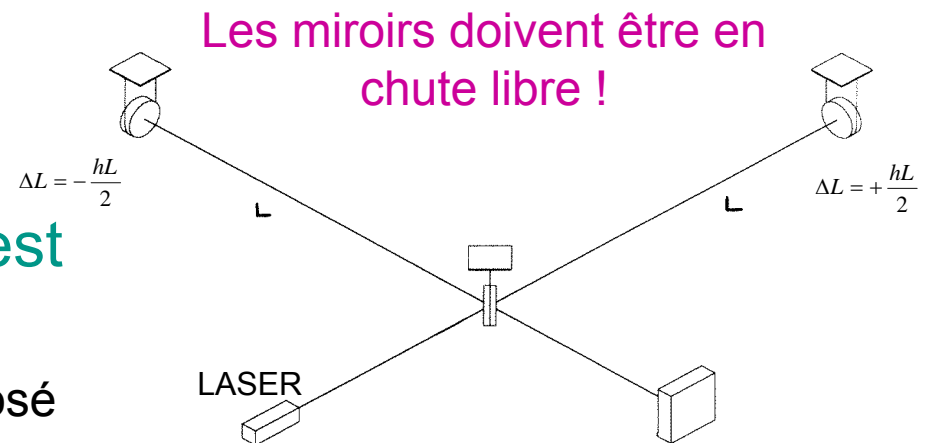
- Mesurer une variation de distance entre des masses libres

- » Mesurer le temps mis par la lumière pour parcourir cette distance
- » L'interférométrie est une bonne technique
  - Mesure comparative



- L'interféromètre de Michelson est particulièrement adapté

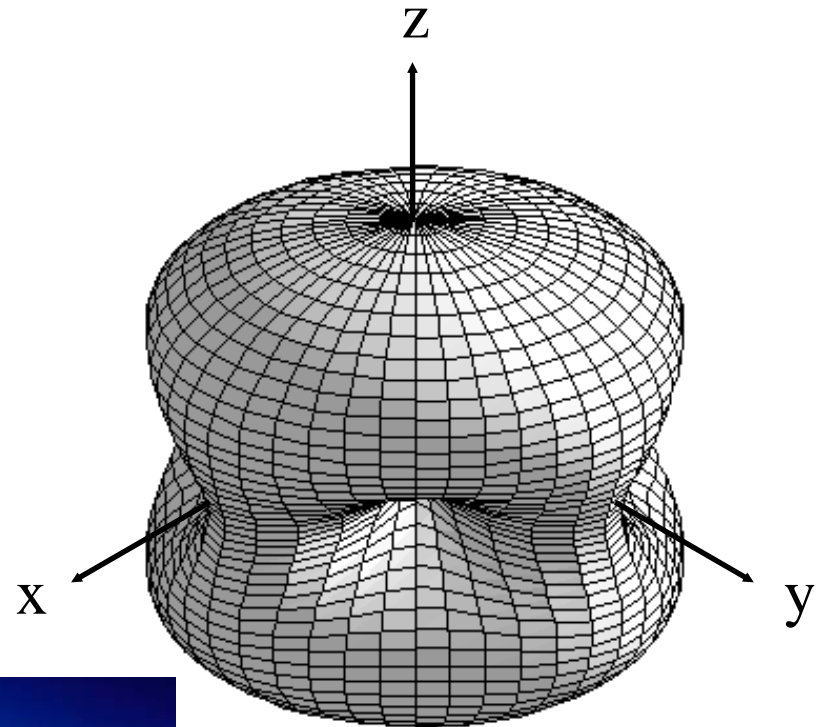
- » Effet d'une onde gravitationnelle opposé sur deux axes orthogonaux
- » Intensité lumineuse des faisceaux interférant dépend de la différence de chemin parcouru dans les deux « bras »



L'interféromètre doit être grand :  $\Delta L$  proportionnel à L  
→ bras de plusieurs km !

# Une direction privilégiée ?

- Réponse d'un interféromètre de Michelson en fonction de la direction de la source
  - » pas véritablement de direction privilégiée
  - » Un interféromètre ressemble davantage



à une



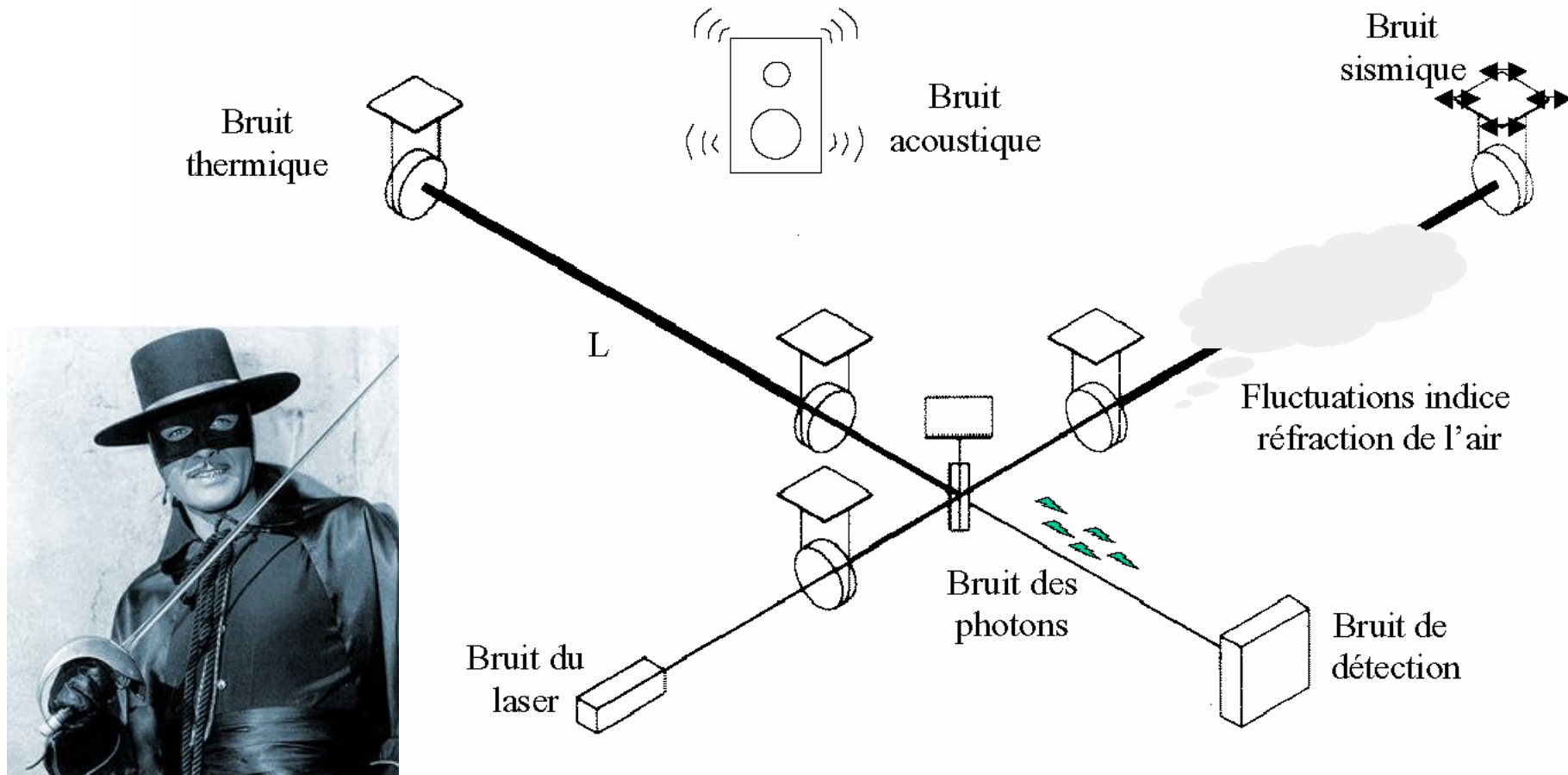
qu'à un



- A la fois une bénédiction et une malédiction !



# Les sources de bruit



# Le bruit de photons

- Mesurer une intensité lumineuse

= Compter un nombre de photons

» Les photons sont des particules quantiques qui ne peuvent être dénombrées exactement

➔ Incertitude sur la mesure

–  $N$  photons  $\Rightarrow$  fluctuation  $\delta N = \sqrt{N}$

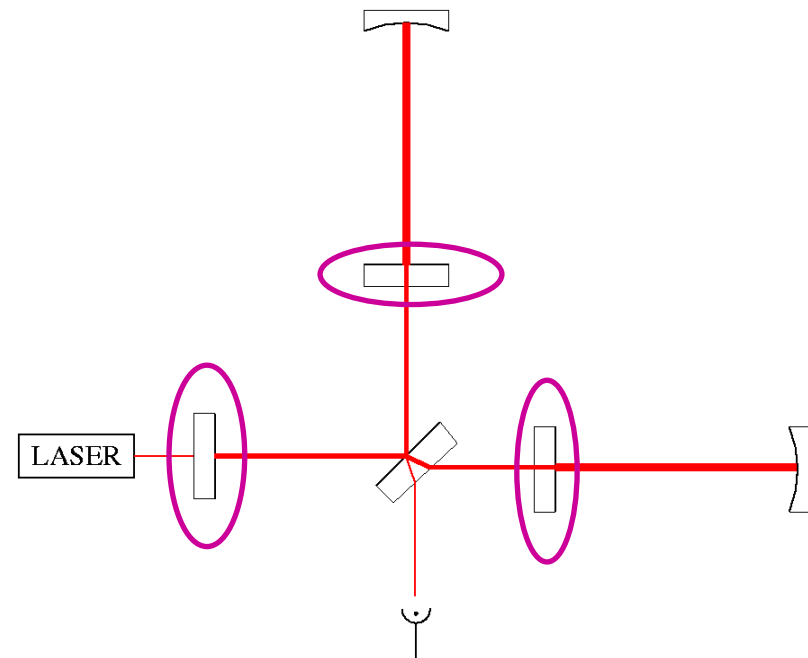
– Puissance lumineuse  $P \Rightarrow$  fluctuation  $\delta P = \sqrt{P}$

» Le signal engendré par le passage d'une O.G. est proportionnel à  $P$

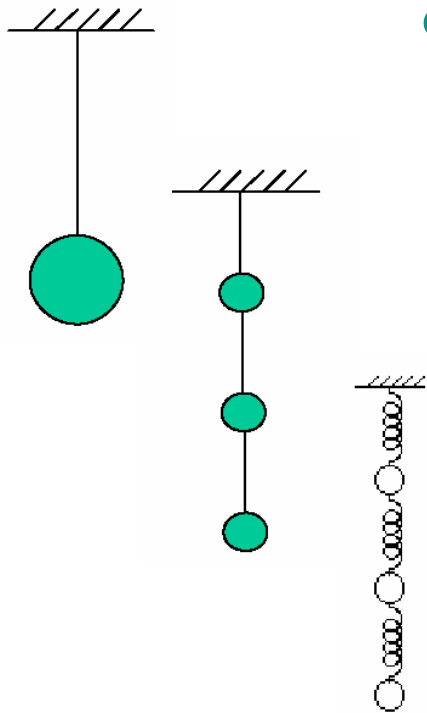
➔ augmenter  $P$

- Modifier la configuration optique

» Astuces pour amplifier le signal d'onde gravitationnelle par rapport au bruit de photons



# Le bruit sismique



- Un miroir suspendu est « isolé » des vibrations d'origine sismique
  - » A des fréquences supérieures à la fréquence propre du pendule, les mouvements du sol ne sont transmis qu'atténués au miroir dans le plan horizontal
  - » Plusieurs pendules en cascade permettent d'augmenter l'atténuation
  - » Il faut aussi atténuer les mouvements verticaux
- Les miroirs continuent à bouger à basse fréquence, est-ce un problème ?

» Réponse 1 : Non !



– Un signal à basse fréquence ne masque pas un signal à plus haute fréquence

» Réponse 2 : Oui !

– L'interféromètre doit être maintenu à son point de fonctionnement

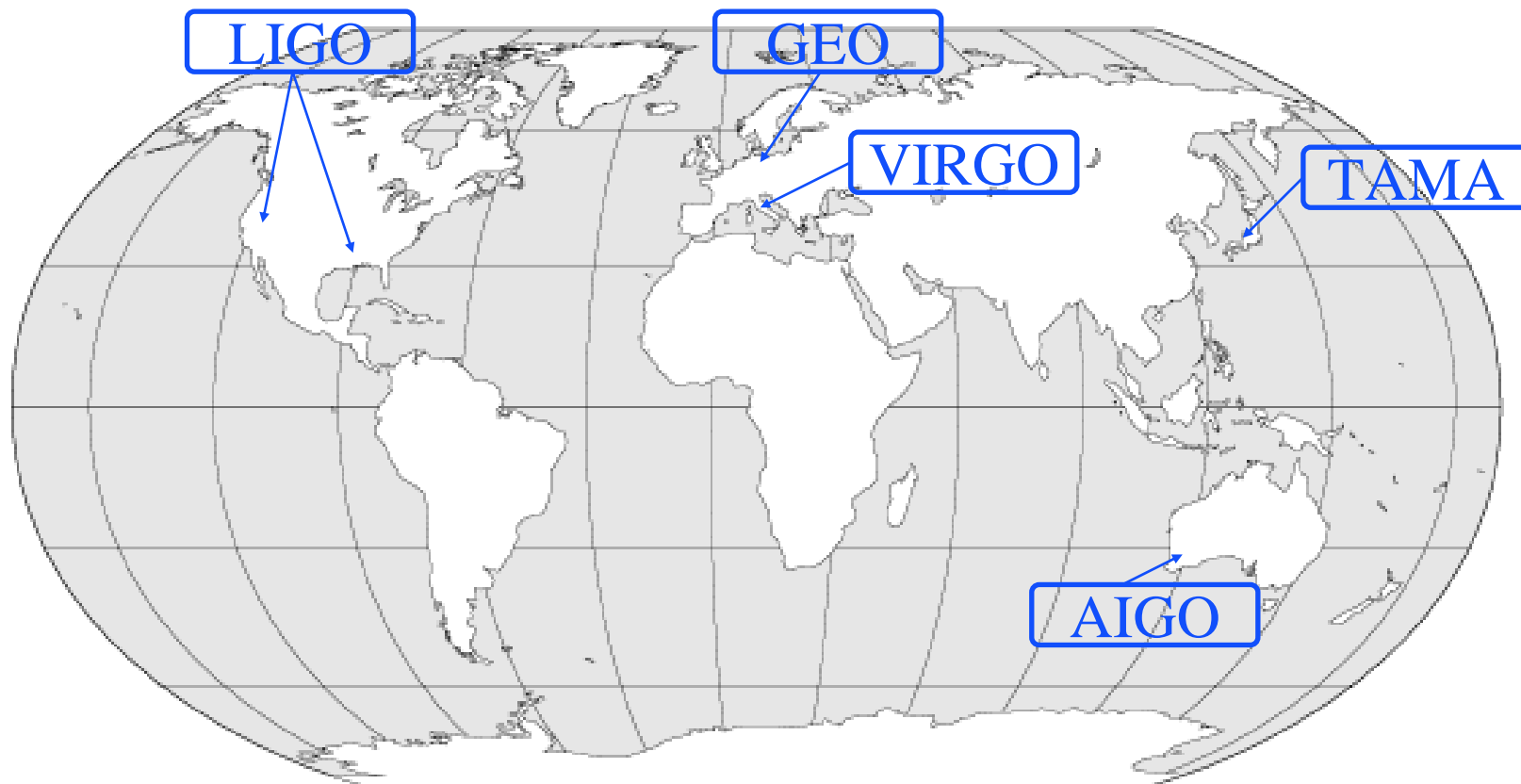
- contrôle des conditions d'interférence



# Du principe à la réalité

---

Les antennes gravitationnelles à travers le monde



# LIGO (États-Unis)



3 interféromètres !

- » 1 interféromètre de 4 km en Louisiane
- » 2 interféromètres de 2 km et 4 km dans l'état de Washington





# Virgo près de Pise en Italie

---

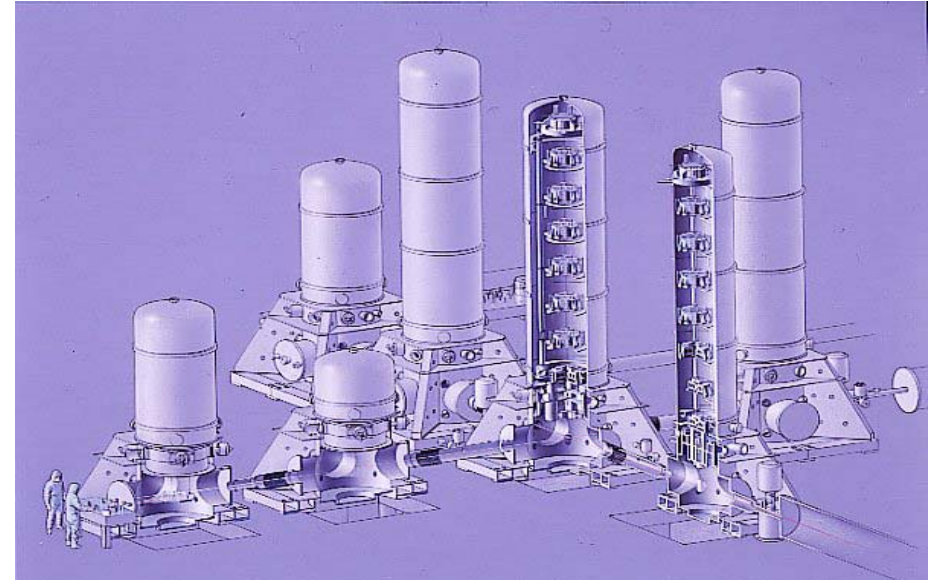
- Collaboration franco-italienne
  - » 5 laboratoires français (CNRS)
  - » 6 laboratoires italiens (INFN)



# Enceintes à vide

- Ultra-vide nécessaire

- » Se protéger du bruit acoustique
- » Éviter le bruit de mesure qui proviendrait des fluctuations d'indice de réfraction de l'air
- » Conserver la propreté des miroirs





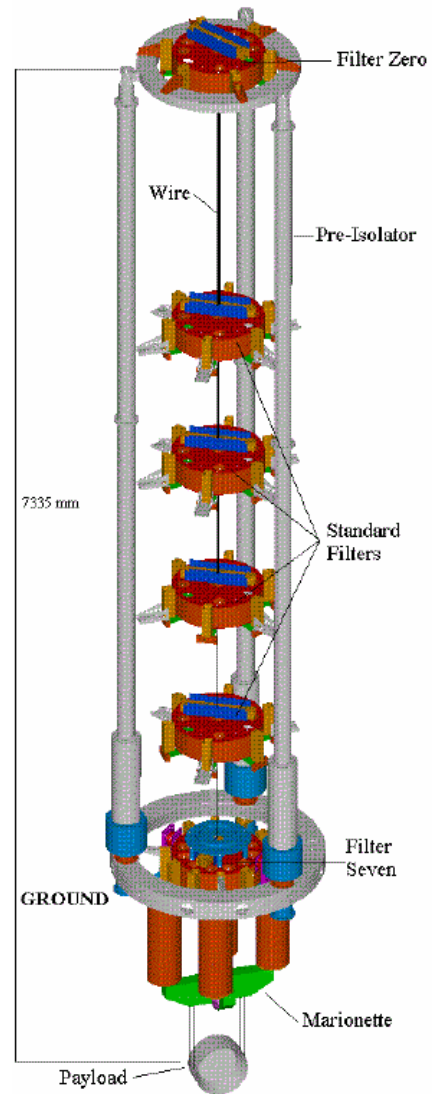
# Miroirs

---

- Grande taille
  - » diamètre = 35 cm
  - » épaisseur = 10 cm
  - » masse = 20 kg
- Exigence de qualité extrême
  - » Maîtrise de la surface
  - » Absorption
  - » Diffusion
- Manipulés en salles blanches



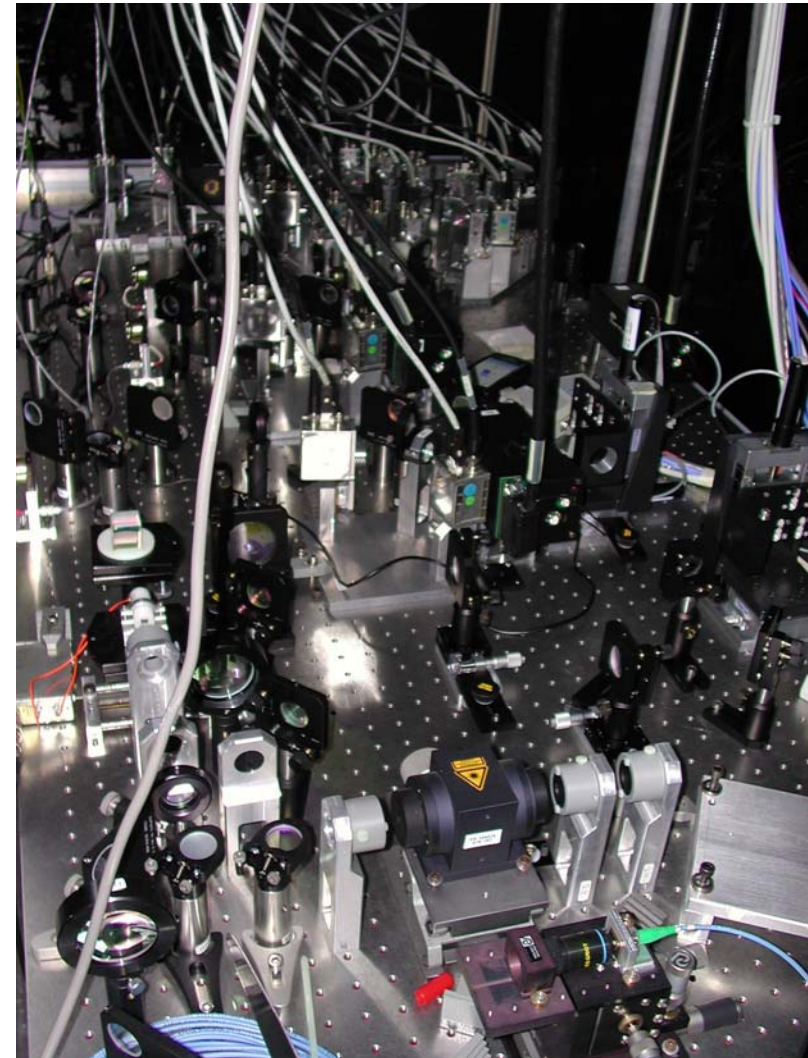
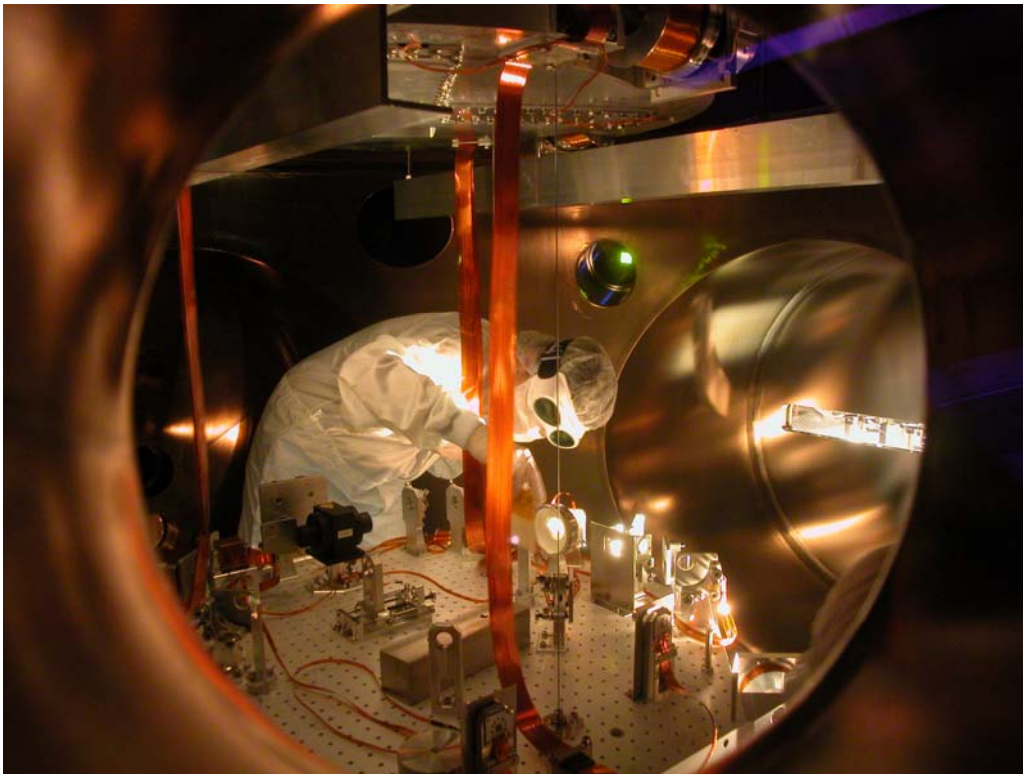
# Suspensions





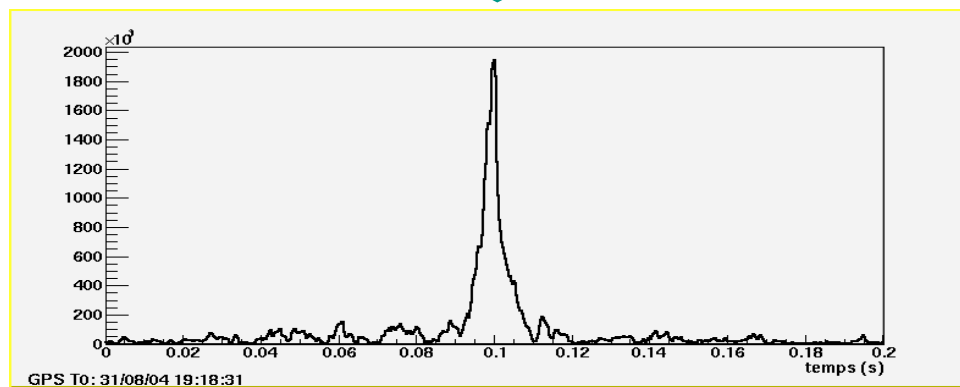
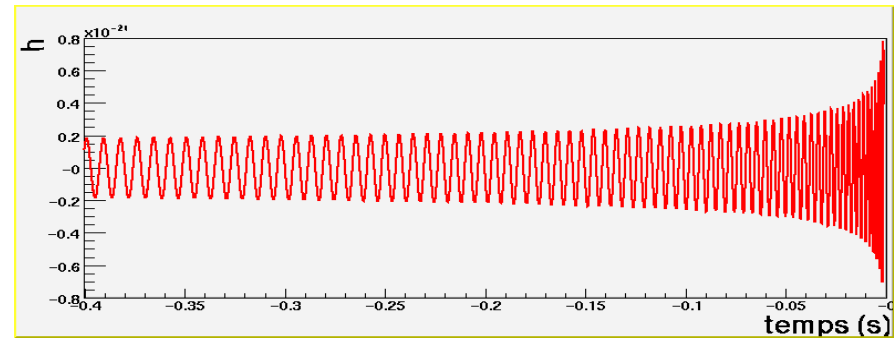
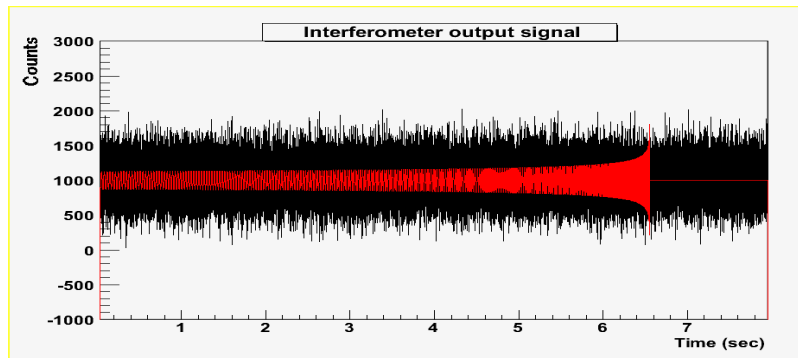
# Le système de détection

- Dans le principe
  - » un photo-détecteur
- Dans la pratique
  - » Beaucoup d'optique, d'électronique, d'informatique



# Analyser les données

- Exemple: extraire un signal de coalescence binaire
  - » La connaissance de l'évolution temporelle du signal peut être exploitée



# Un réseau de détecteurs

---

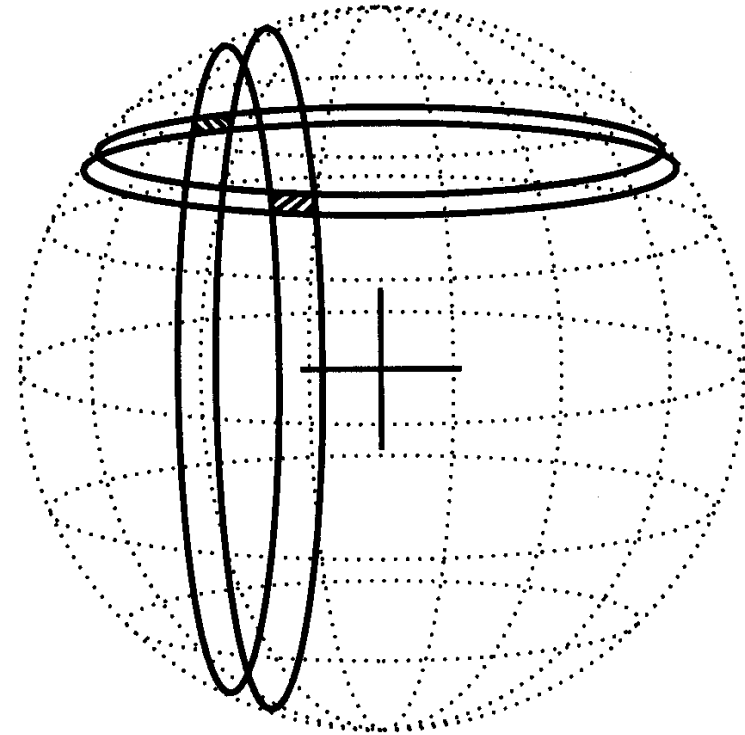
- Détecter des événements en **coïncidence**

- » Événements rares et de faible amplitude

- Déterminer les **paramètres de la source**

- » Direction de la source
- » Au moins 3 détecteurs sur des sites distincts

**La collaboration  
doit l'emporter sur  
la compétition !**



# Une autre voie : l'espace

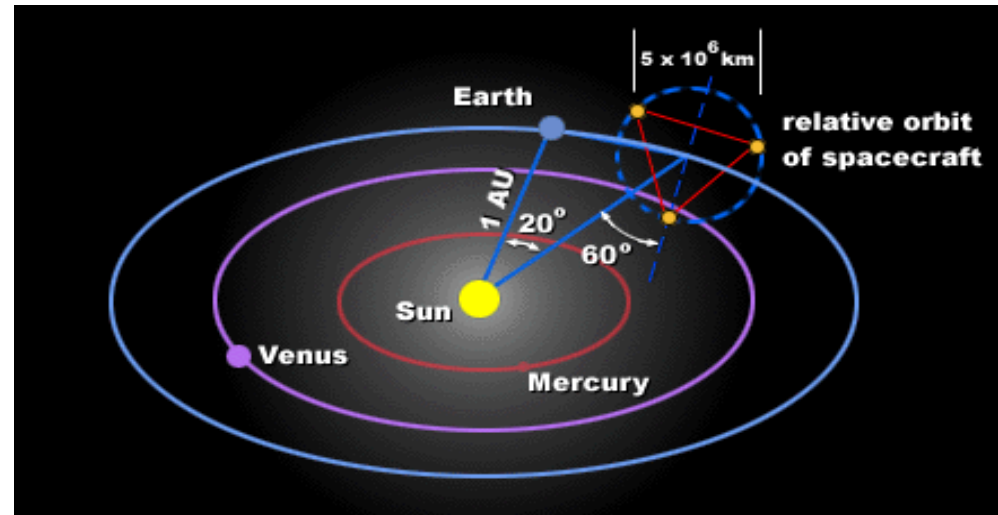


- Un interféromètre de taille illimitée ?
- S'affranchir du bruit sismique ?

← La solution

- Projets d'interféromètres spatiaux **LISA**
  - » États-unis, Europe
  - » ~ 2015

- Orbite héliocentrique
- Trois satellites distants de 5 millions de km !
- Une gamme de fréquence très différente
  - » 0,1 mHz – 1 Hz
  - » D'autres types de sources



# Conclusion

---

Détecter les ondes gravitationnelles, c'est :

- Important

- » Un des aspects les plus fascinants de la théorie d'Einstein
- » A long terme un nouvel outil puissant pour observer l'Univers

- Possible

- » Construire des antennes offrant un potentiel de découverte
  - C'est fait
- » Les faire fonctionner à la sensibilité prévue
  - C'est presque fait
- » Réaliser une première détection
  - Cela ne dépend pas que de nous !
  - Dans 1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans ???
- » Aller plus loin
  - Transformer un réseau de détecteur en observatoire
- » Une aventure internationale

