

## Détection des ondes gravitationnelles : Où en sont LIGO et Virgo ?

R. Gouaty   
Séminaire SPP, Saclay



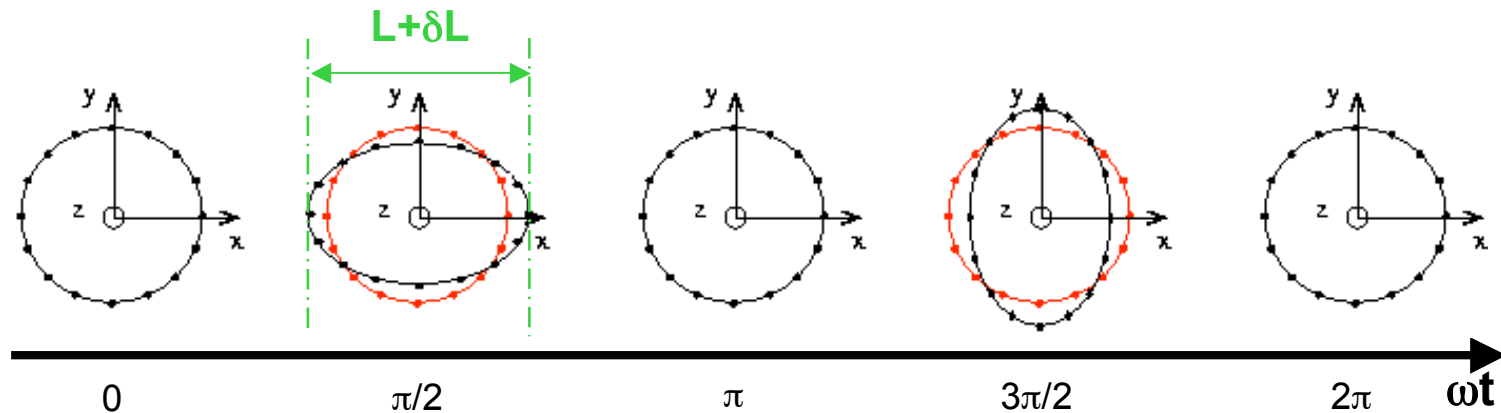
- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**

Ondes gravitationnelles = perturbations de la métrique induites par matière accélérée

- Prédiction de la Relativité Générale :
  - Ondes planes, transverses
  - Propagation à la vitesse de la lumière
  - 2 états de polarisation

• **Modification des distances entre des masses libres**

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



- **Rayonnement de quadrupôle** ⇒ nécessite des mouvements asymétriques de matière
- **Faibles Amplitudes** ⇒ nécessite des sources compactes, massives, relativistes
- **Objets astrophysiques privilégiés** : trous noirs, étoiles à neutrons, pulsars

## Les coalescences de systèmes binaires

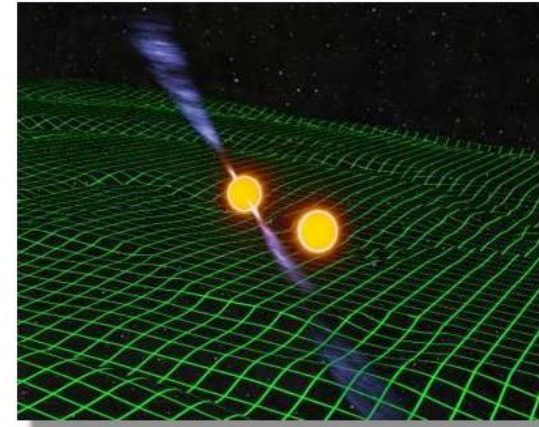
- **Système binaire formé de 2 astres compacts : EN-EN, EN-BH, BH-BH**

Exemple : **PSR 1913+16**

→ mesure de la décroissance de la période orbitale

$$\dot{P}_{observe} / \dot{P}_{predit} = 1.0013 \pm 0.0021$$

→ **une preuve indirecte de leur existence**



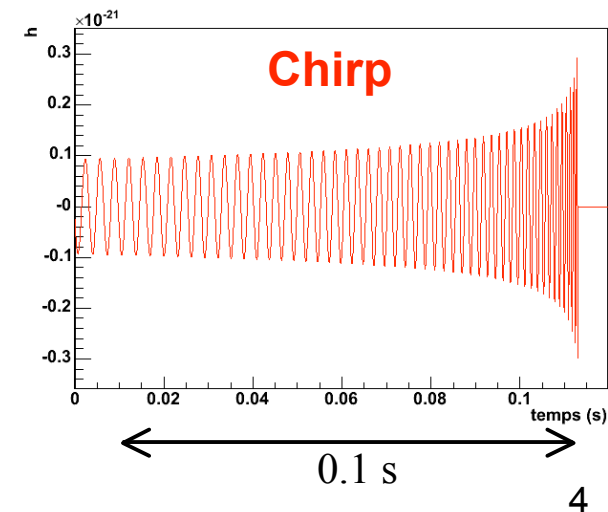
- **Dans les derniers instants précédant la fusion des 2 astres = phase de coalescence**

- Signal atteignant quelques centaines de Hertz  
(dans la bande passante des détecteurs terrestres)

- **Forme d'onde connue** (fonction des masses)

- Sources détectables hors de la Galaxie,  
taux d'évènements faibles et incertains

- **GRB courts** peut-être des coalescences



→ **Supernovae**

Amplitude incertaine

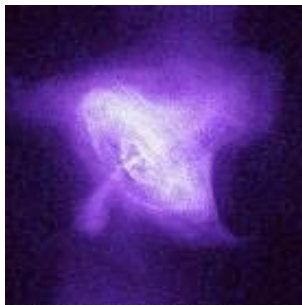
Phénomènes rares

(3 - 4  $10^{-2}$  / an dans la Galaxie)

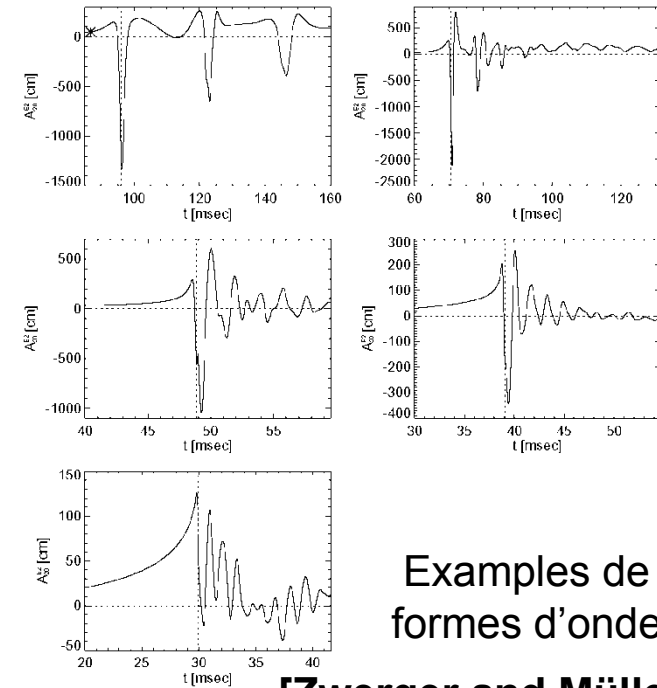


→ **Sources continues**

**(étoiles à neutrons en rotations)**

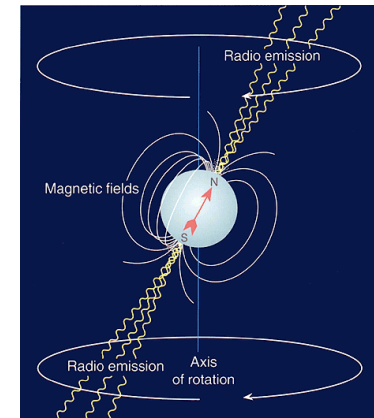


- Objets communs, mais amplitude difficile à prédire (limites supérieures)
- Intégration du signal



Exemples de formes d'onde

[Zwinger and Müller]

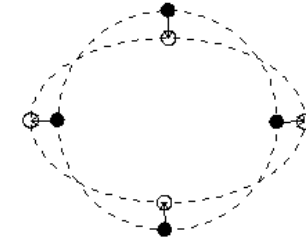


- Réaliser la première détection directe des ondes gravitationnelles
- Etude de l'interaction gravitationnelle
  - Vérification des propriétés des OG (vitesse, polarisation)
  - OG émises par des Trous Noirs  $\Rightarrow$  test en champ fort de la Relativité Générale
- Une nouvelle fenêtre d'observation de l'univers
  - Coïncidences avec d'autres moyens d'observations : photons (GRB?), neutrinos
  - Meilleure compréhension des objets astrophysiques observés
  - Observation de régions opaques aux ondes électromagnétiques
  - Fond stochastique d'ondes gravitationnelles primordiales ?
  - Coalescences binaires « chandelles standard » visibles à distance cosmologique par des interféromètres de deuxième génération



- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**

- Variation de distance entre des masses libres



⇒ **Mesure possible avec un interféromètre de Michelson**

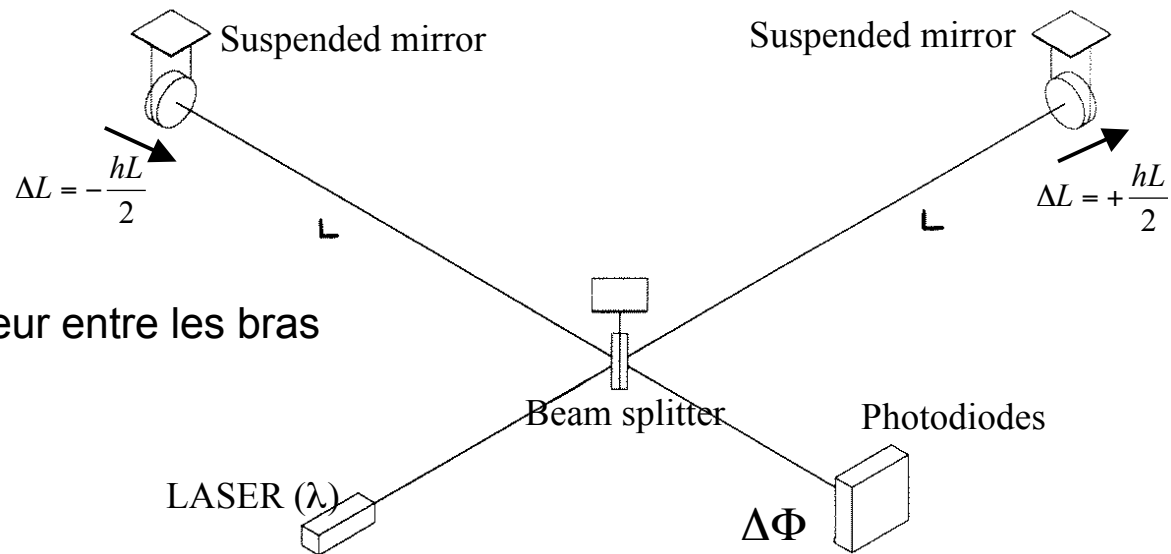
- miroirs suspendus = masses en chute libres
- onde gravitationnelle ⇒ variation de la différence de phase entre faisceaux

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} hL$$

$$h = \Delta L / L$$

$\Delta L$  = différence de longueur entre les bras

$L$  = longueur de bras







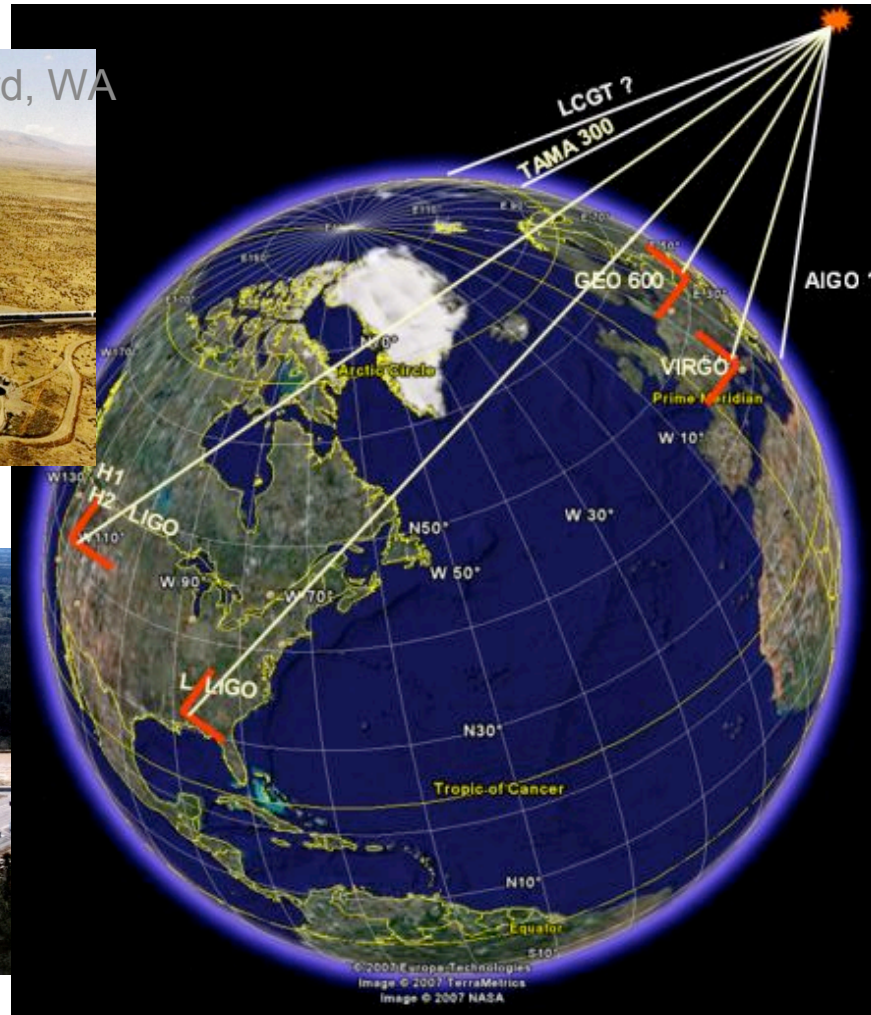
LIGO – Hanford, WA



GEO600, Hanovre, Allemagne



LIGO – Livingston, LA



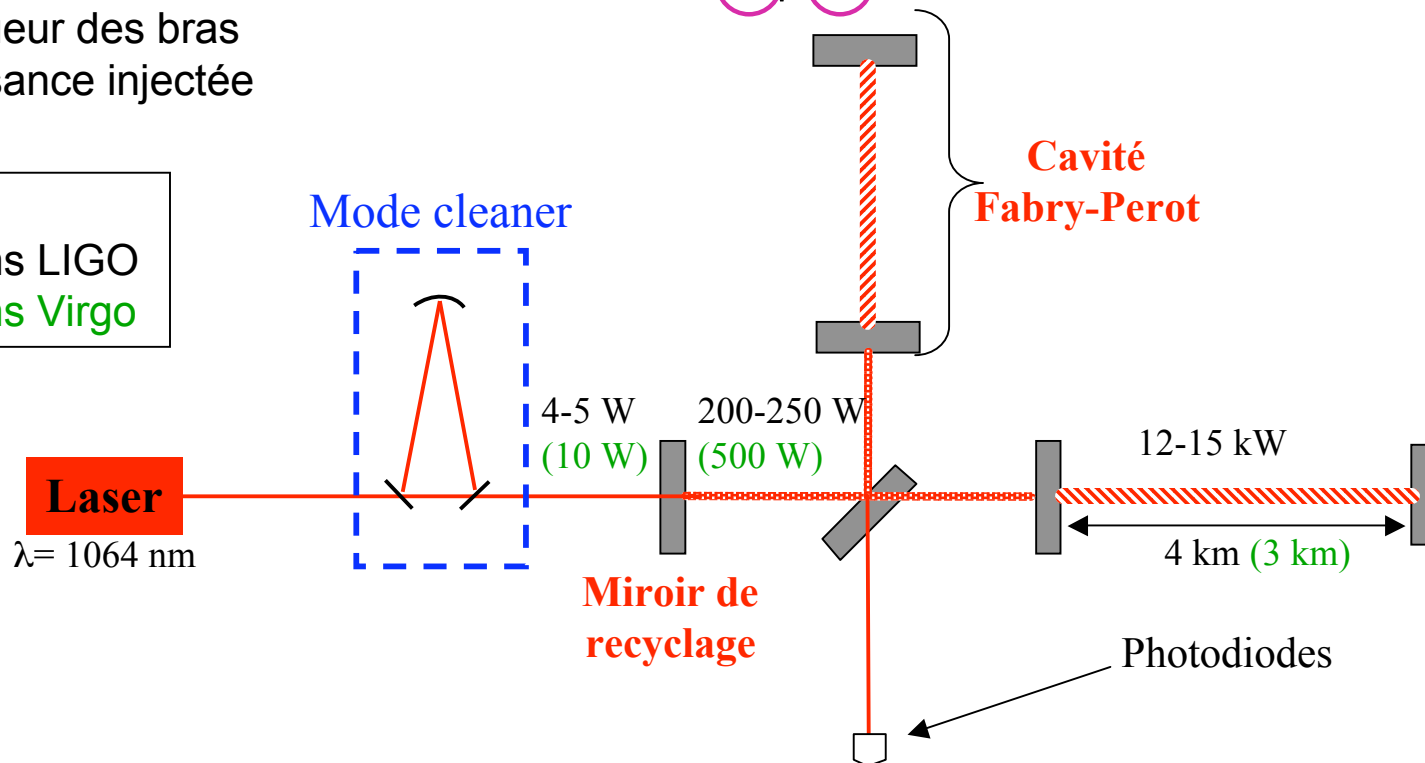
VIRGO, Pise, Italie

**Sensibilité d'un interféromètre limitée par le bruit de photons:**

**Plus petit déplacement mesurable:** 
$$\tilde{h} \geq \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{P}}$$

L: longueur des bras  
P: puissance injectée

**Légende:**  
Spécifications LIGO  
Spécifications Virgo

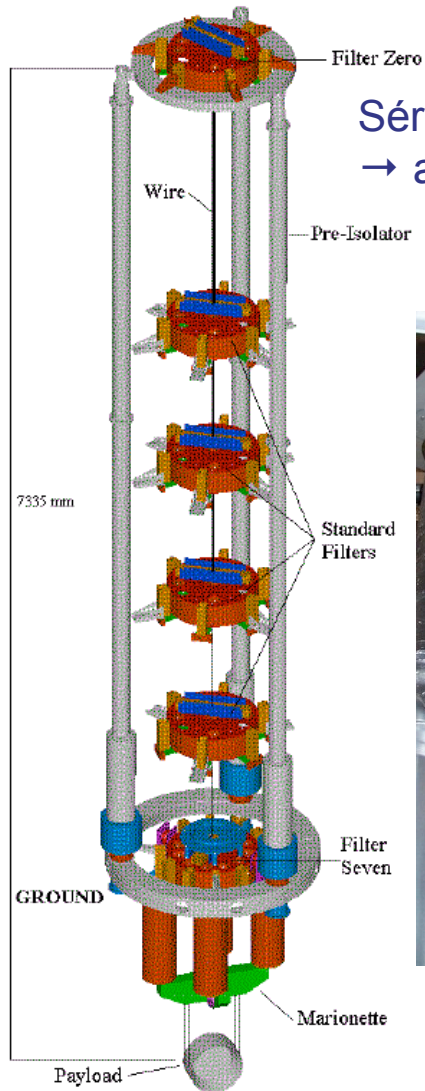


- Fabry-Perot : ~125 (32) allers-retours  $\Rightarrow$  chemin optique effectif = 500 km (100 km)
- Cavité de recyclage: puissance x 50



- **Bruit sismique** → Suspensions des miroirs

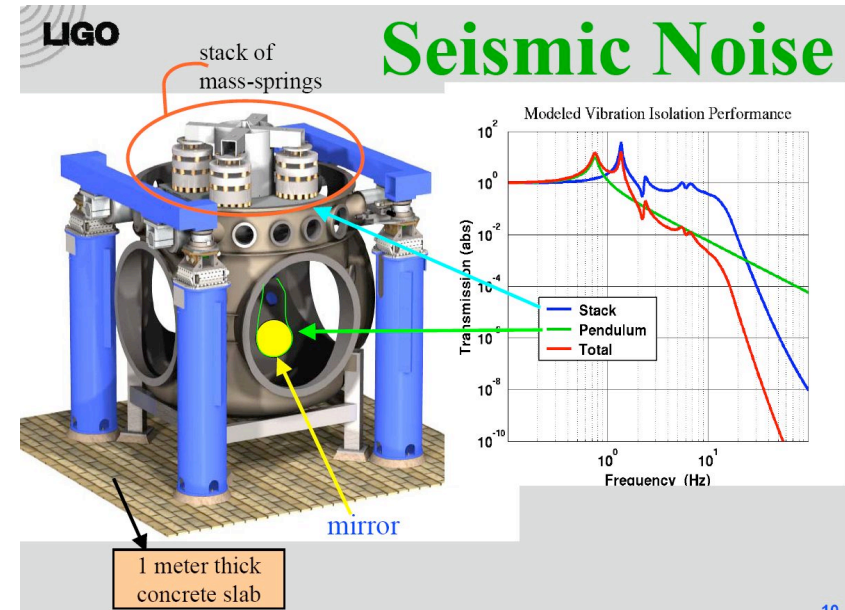
## Virgo



Série de 7 pendules en cascade  
→ atténuation  $> 10^{14}$  @ 10 Hz

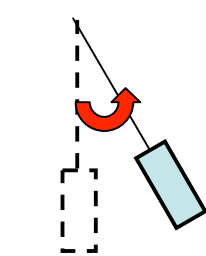


## LIGO



→ atténuation  $> 10^8$  @ 40 Hz

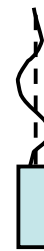
- **Bruit thermique** : mouvement aléatoire des miroirs et de leurs suspensions relié à la dissipation d'énergie thermique



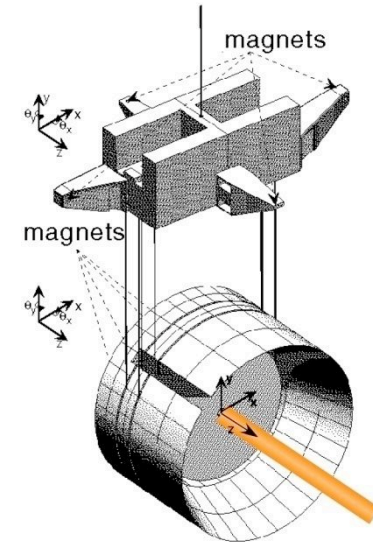
Bruit de pendule



Bruit de miroir



Modes violons (résonances h fréquence)



→ Requiert des miroirs de faible absorption

### Exemple: miroirs de Virgo

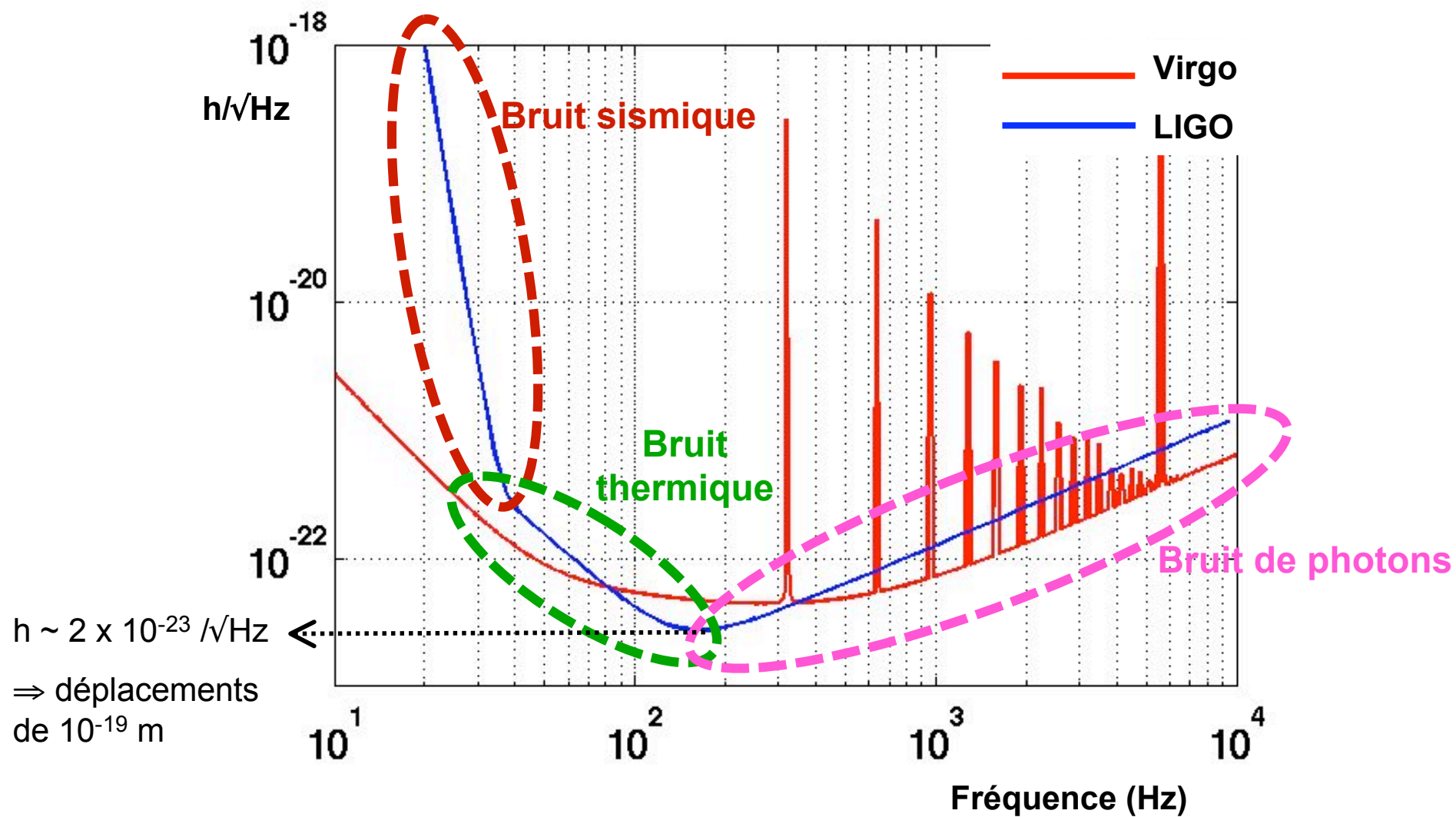
- Miroirs cylindriques de silice revêtus d'un traitement de surface réalisé par le LMA
- Dimensions dans les cavités FP: Ø 35 cm; épaisseur 10 cm, 20 kg
- Uniformité sur de larges surfaces (défauts de planéité < qqs nm dans partie centrale)
- Faibles pertes par absorption et par diffusion





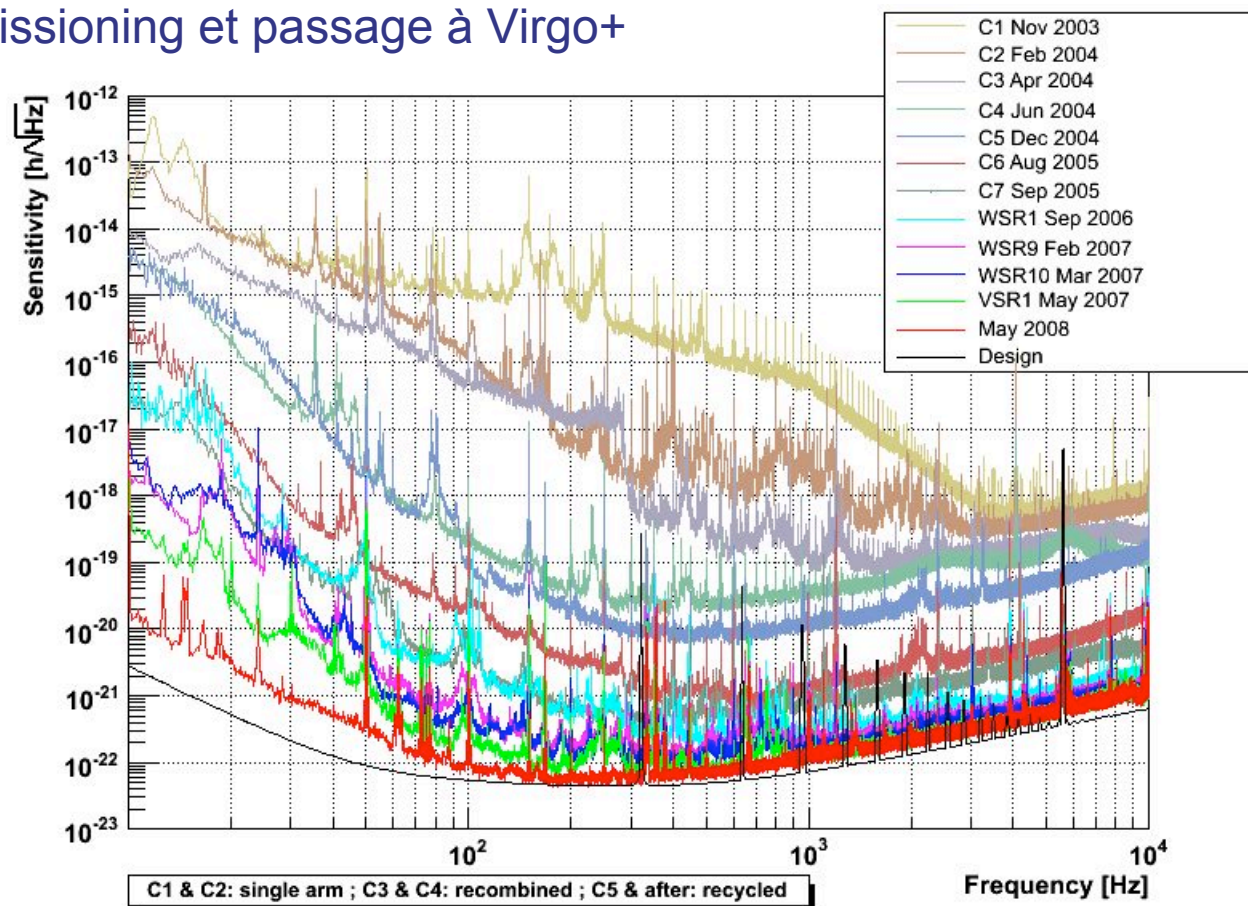
- **Bruit acoustique + fluctuations d'indice**  
→ enceinte à vide ( $\approx 10^{-8}$  mbar)





## Virgo

- De février 2001 à juillet 2002: commissioning de la partie centrale (CITF)
- Fin de la construction des bras de 3 km en 2003
- Phase de Commissioning (2003-2007)
- **VSR1: Mai – Octobre 2007**
- Commissioning et passage à Virgo+



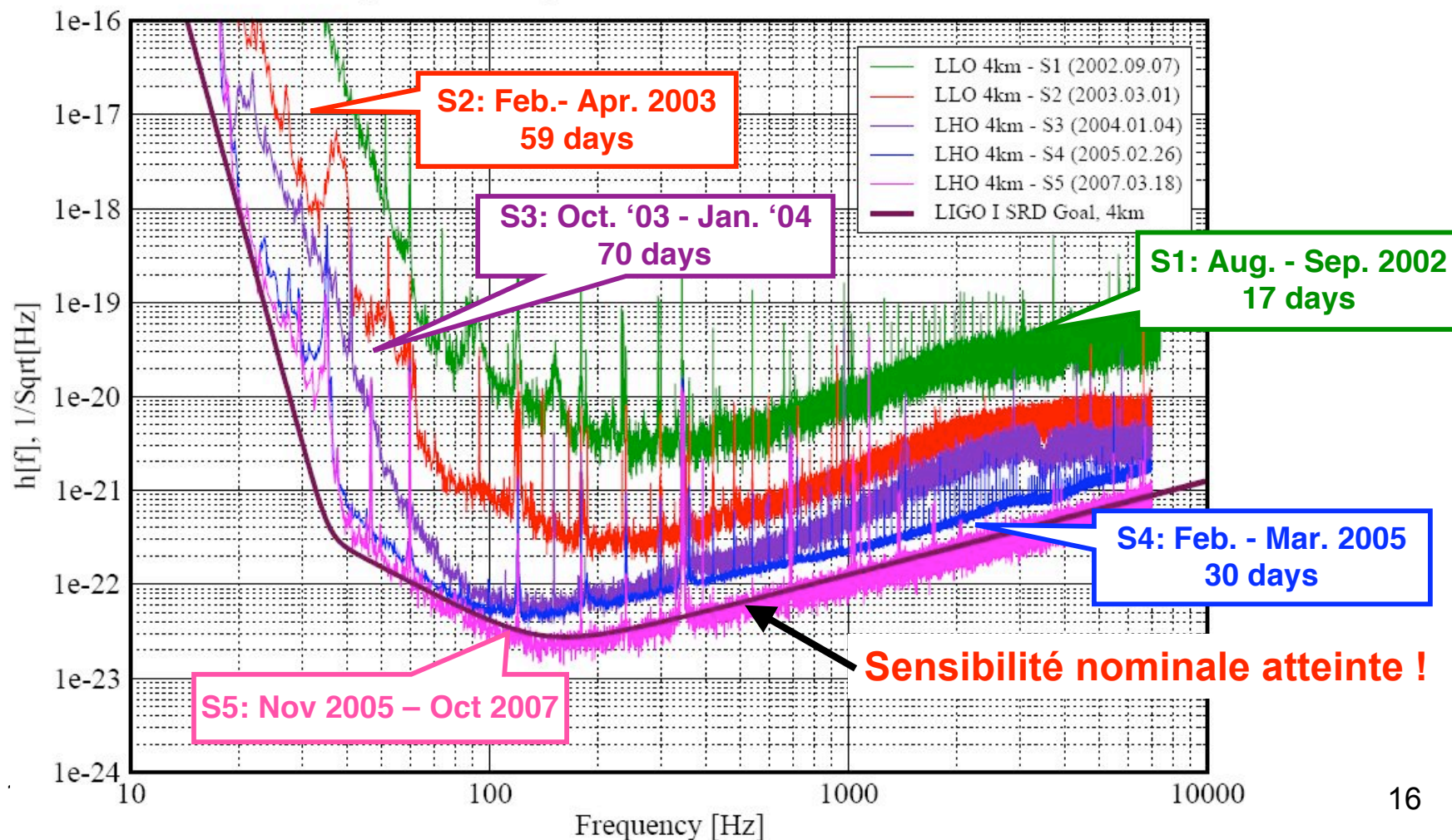


## LIGO

- 6 ans d'effort pour atteindre la sensibilité nominale
- Prises de données plus précoces

### Best Strain Sensivities for the LIGO Interferometers

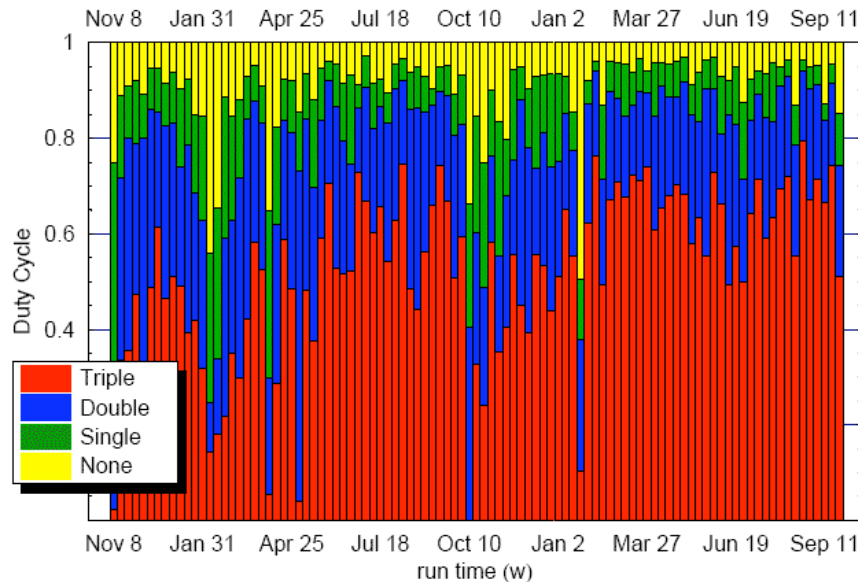
Comparisons among S1 - S5 Runs LIGO-G060009-03-Z



- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**

## S5 (LIGO)

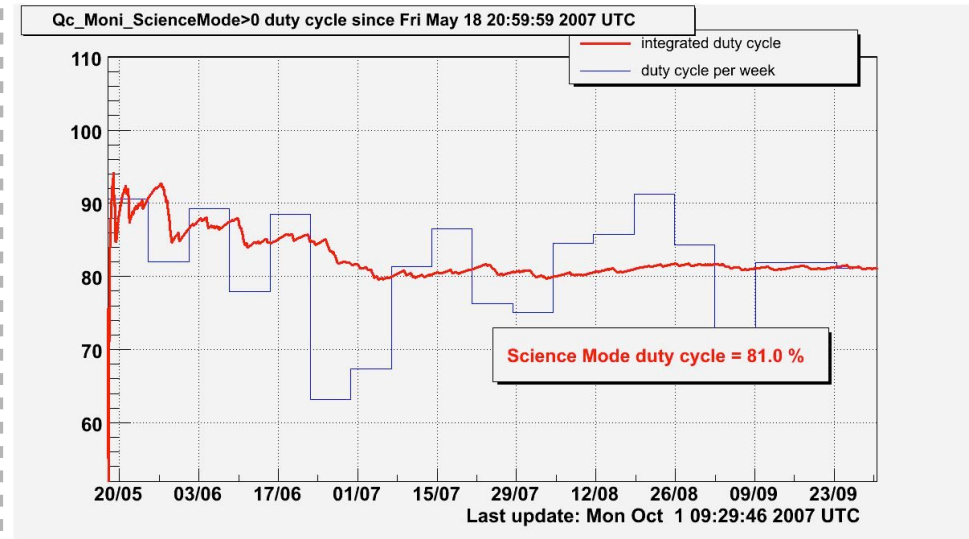
- De Novembre 2005 à Octobre 2007
- Acquisition d'une année de données avec les 3 interféromètres LIGO en coïncidence



- Cycle utile
- 52.8 % en coïncidence triple
  - 57.0 % en coïncidence H1L1
  - Total pour H1: 77.7 %
  - Total pour H2: 78.2 %
  - Total pour L1: 65.7 %

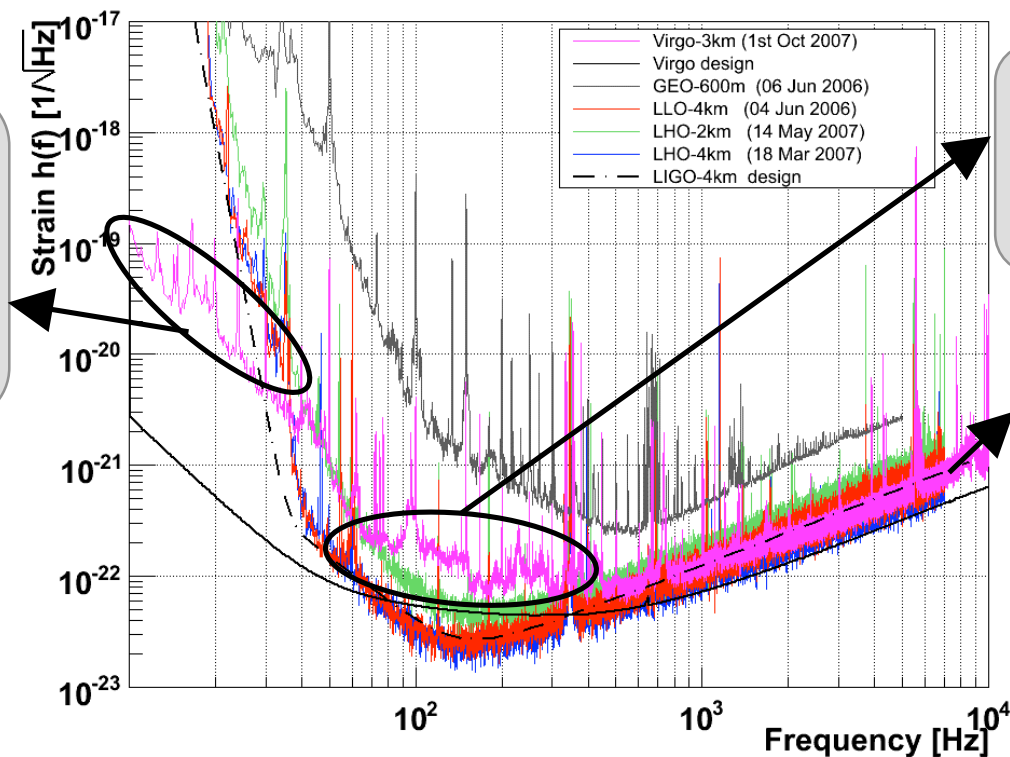
## VSR1 (Virgo)

- Du 18 Mai au 1er Octobre 2007
- En coïncidence avec la fin de S5



- Cycle utile :
- 84% verrouillé, 81% en « science mode »

Les prémisses  
d'une bonne  
sensibilité à  
basse fréquence  
(pulsars)



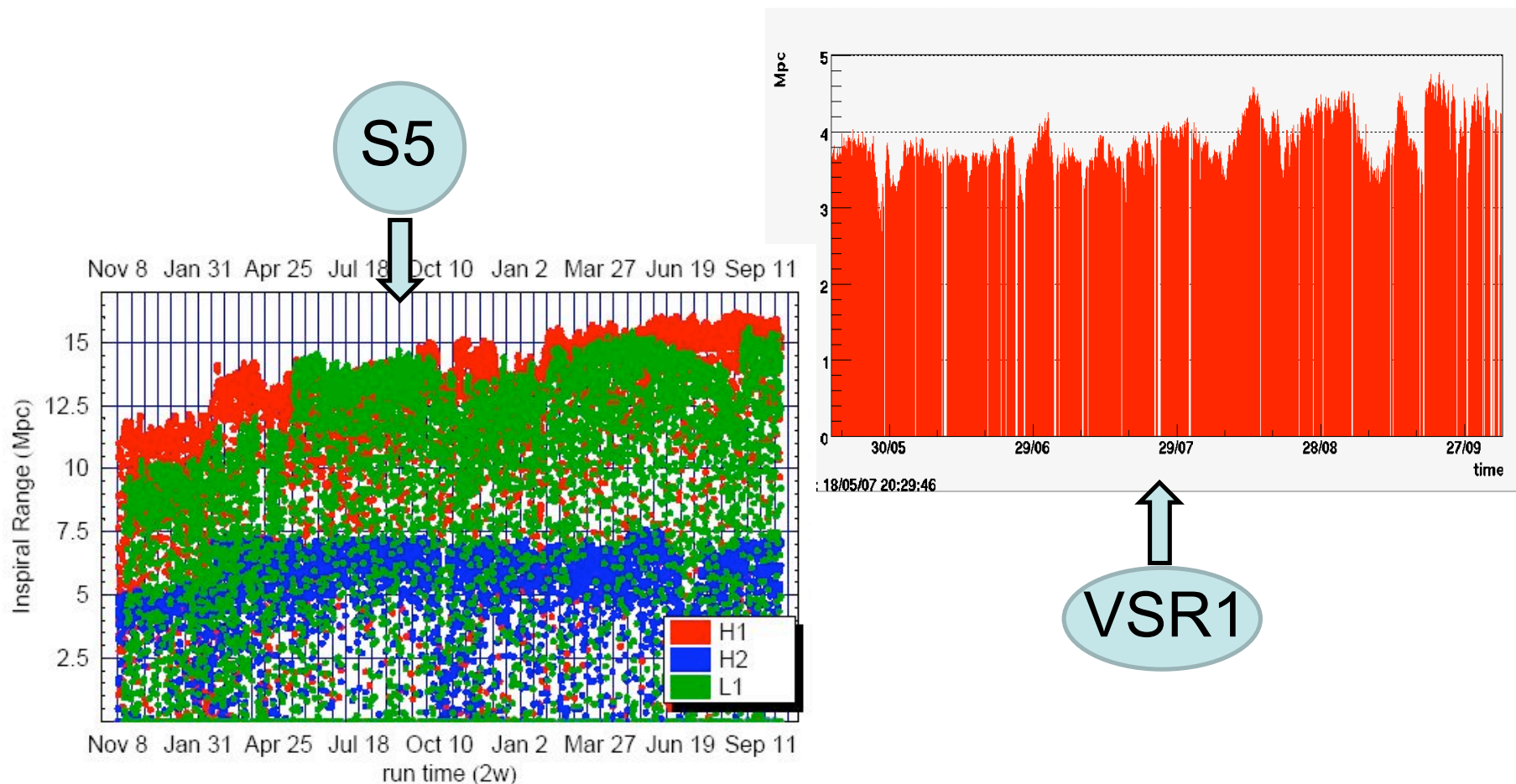
Un facteur 2 à 4 en  
deçà de LIGO pour  
les coalescences

Compétitivité pour les  
sources impulsives à  
haute fréquence



## Les sensibilités traduites en horizon

**Horizon** = Distance moyenne d'une coalescence d'étoiles à neutrons visible avec un SNR de 8



- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**

- **Signé début 2007**
  - Pour trois ans, mais s'inscrit dans la durée

We enter into this agreement in order to lay the groundwork for decades of world-wide collaboration. We intend to carry out the search for gravitational waves in a spirit of teamwork, not competition. Furthermore, we remain open to participation of new partners, whenever

- **Termes**
  - Accord exclusif pour l'analyse de données collaborative
  - Accord non exclusif pour les autres travaux collaboratifs
- **Echange des données**
  - Activé à partir de mai 2007 (début de VSR1)
- **Impact profond sur l'organisation**
  - **Groupes d'analyse conjoints**
  - Structures de pilotage conjointes

→ **Profiter des bénéfices d'un réseau mondial d'interféromètres:**

- Réduction du taux de fausses alarmes par des analyses en coïncidence
- Une meilleure couverture du ciel
- **Indispensable pour l'astronomie gravitationnelle** : direction de propagation, meilleure reconstruction des paramètres du signal



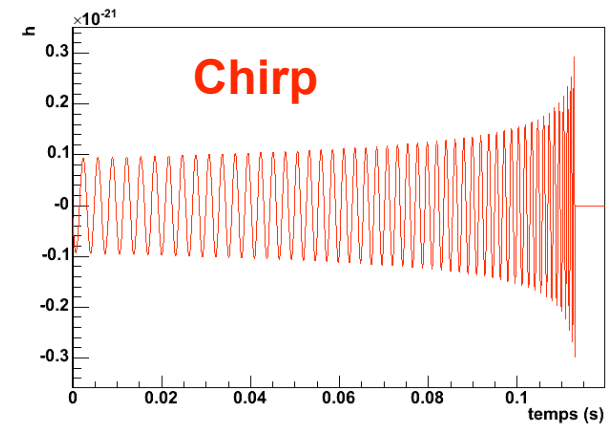
## 1. Signaux de courte durée

- « Compact Binary Coalescences »
  - Forme d'onde connue → filtrage adapté

$$z(t) = 4 \int_0^{\infty} \frac{\tilde{s}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df$$

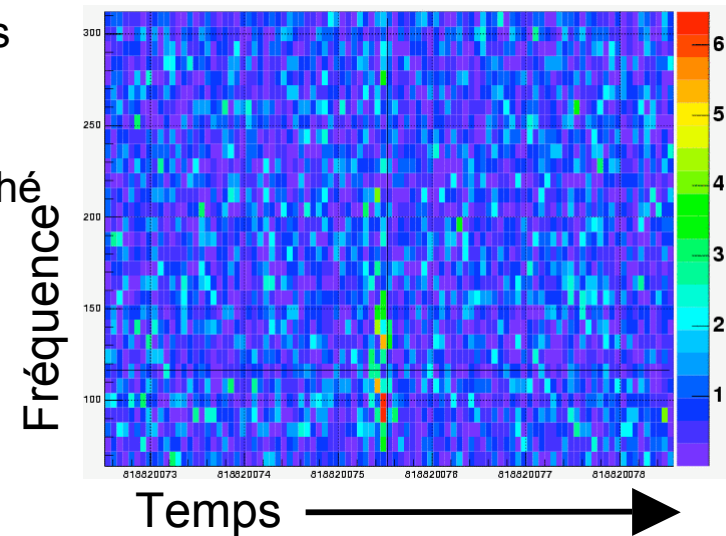
Diagram illustrating the matched filter equation. Arrows point from the labels to the corresponding terms in the equation:

- Data** points to  $\tilde{s}(f)$
- Template(m1,m2)** points to  $\tilde{h}^*(f)$
- Noise power spectral density** points to  $S_n(f)$



- Coïncidence requise entre au moins 2 détecteurs

- « Bursts »
  - Peu d'hypothèses sur la forme du signal recherché
  - Recherche de signaux impulsifs (< 1s)
  - Décomposition temps-fréquence des données et recherche d'excès d'énergie parmi les pixels
  - Corrélation-croisée entre détecteurs



## 2. Signaux de longue durée

- **Sources périodiques (pulsars X ou Radio)**

Méthode de filtrage adapté

→ Recherche ciblée de pulsars connus (exemple: Crabe)

→ Recherche non-biaisée de signaux sinusoïdaux modulés par le mouvement de la Terre – coût de calcul élevé



<http://www.einsteinathome.org/>

**Einstein@Home**

~175000 utilisateurs

~75 Tflops en moyenne

- **Fond stochastique**

Corrélation croisée entre détecteurs

## BEATING THE SPIN-DOWN LIMIT ON GRAVITATIONAL WAVE EMISSION FROM THE CRAB PULSAR

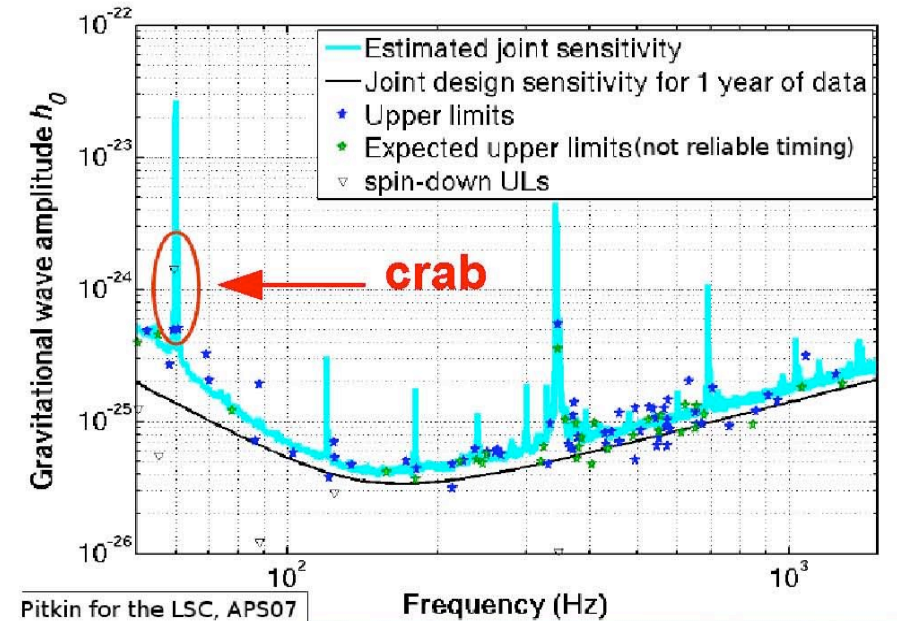
The LIGO Scientific Collaboration

Draft version May 30, 2008

### ABSTRACT

We present direct upper limits on gravitational wave emission from the Crab pulsar using data from the first nine months of the fifth science run of the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO). These limits are based on two searches. In the first we assume that the gravitational wave emission follows the observed radio timing, giving an upper limit on gravitational wave emission that beats indirect limits inferred from the spin-down and braking index of the pulsar and the energetics of the nebula. In the second we allow for a small mismatch between the gravitational and radio signal frequencies and interpret our results in the context of two possible gravitational wave emission mechanisms.

*Subject headings:* gravitational waves - pulsars



→ Limite supérieure sur l'émission d'OG par le pulsar du Crabe inférieure à la limite dérivée du ralentissement de l'étoile

→ Limites meilleures sur certains pulsars (données de S4):

$$h < 2.6 \cdot 10^{-25} \text{ pour PSR J1603-7202}$$

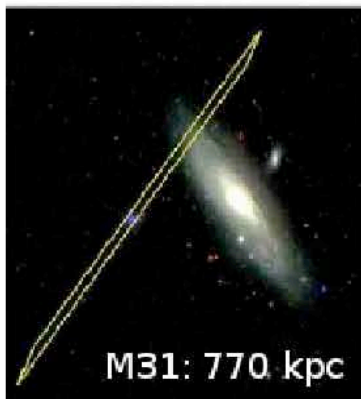
$$\text{Ellipticité équatoriale} < 10^{-6} \text{ pour PSR J2124-3358}$$

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

## Sursauts gamma

Sursauts gamma **courts**  
Durée moyenne ~ 0,3 s  
Hypothèse plausible :  
**coalescences d'astres compacts**  
2 étoiles à neutrons  
étoile à neutrons et trou noir

➔ Rayonnement gravitationnel associé ??

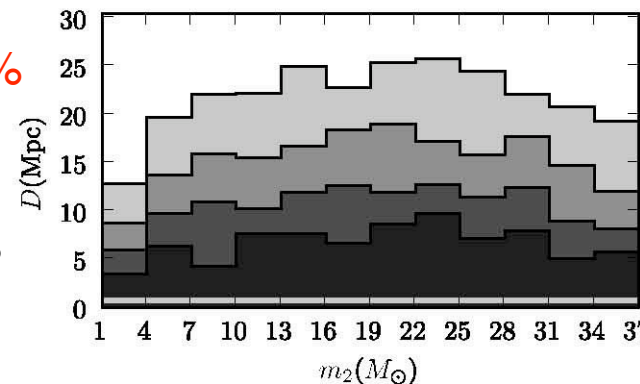


LIGO

### GRB 070201

- ◆ « Compact Binary » dans Andromède?
- ◆  $1 M_{\odot} < m_1 < 3 M_{\odot}$  et  $1 M_{\odot} < m_2 < 40 M_{\odot}$  **exclu à 99% confiance**

- 213 GRBs pendant S5/VSR1, dont 33 GRBs courts  
→ **Analyse en cours**



## Taux de coalescences attendus

### Binaires d'étoiles à neutrons (BNS)

→ taux calculés à partir de 4 pulsars binaires connus

Taux le plus probable ~ 0.015 par an

+/- un ordre de grandeur d'incertitude

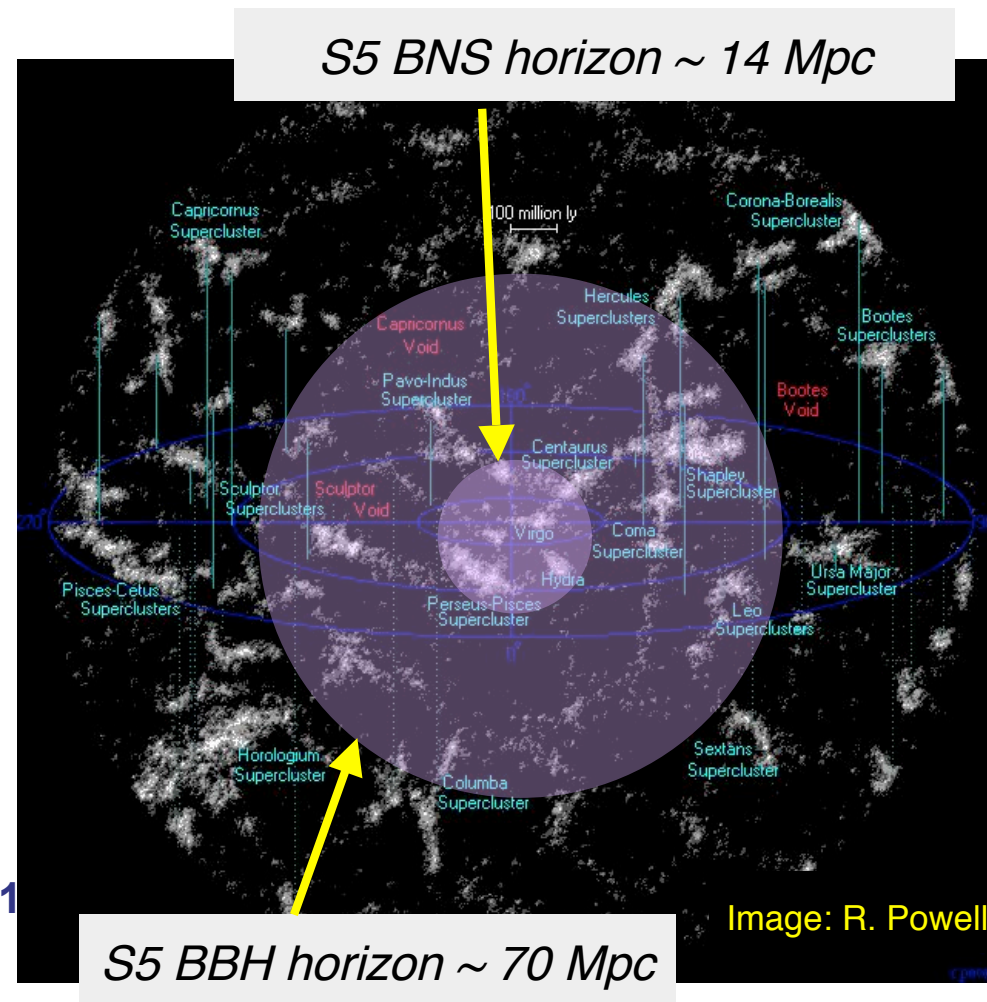
### Binaires de trous noirs (BBH)

→ taux calculés par synthèse de population, très incertains

Taux le plus probable ~ 0.01 par an

Avec au moins 2 ordres de grandeurs d'incertitude

→ Détection peu probable avec S5 ou VSR1



→ Améliorer la sensibilité au-delà du design

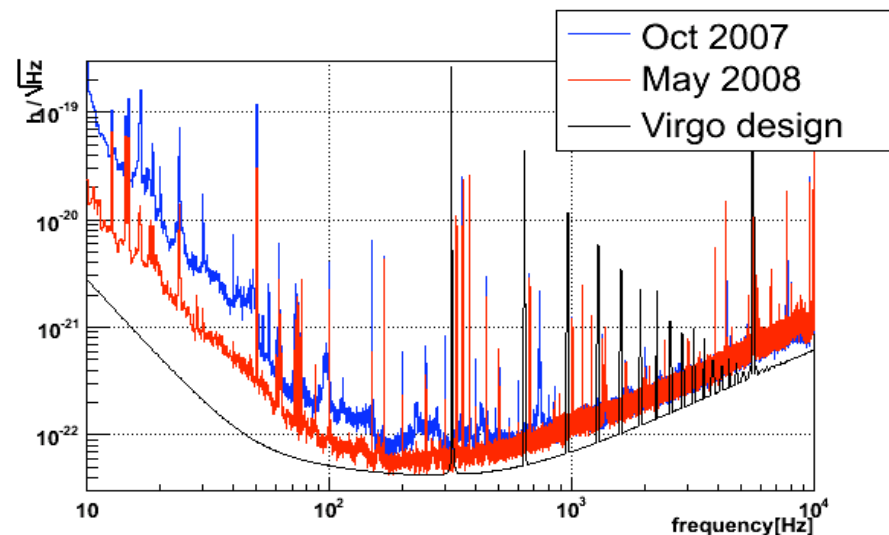
- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**



- Amélioration des contrôles longitudinal et angulaire  
Niveau ~OK pour Virgo+
- Compréhension et réduction des bruits d'environnement
  - Réduction de la lumière diffusée (bancs optiques externes)
  - Bruit magnétique (changement des aimants sur les miroirs)
  - Réduction des fluctuations de positionnement (« Jitter ») du faisceau
- Effets thermiques  
Système de compensation thermique partiellement installé et testé

→ Un contre-temps dû à l'accident du 9 Mai 2008 (implosion d'un hublot)

→ miroir du bras nord et principaux hublots remplacés

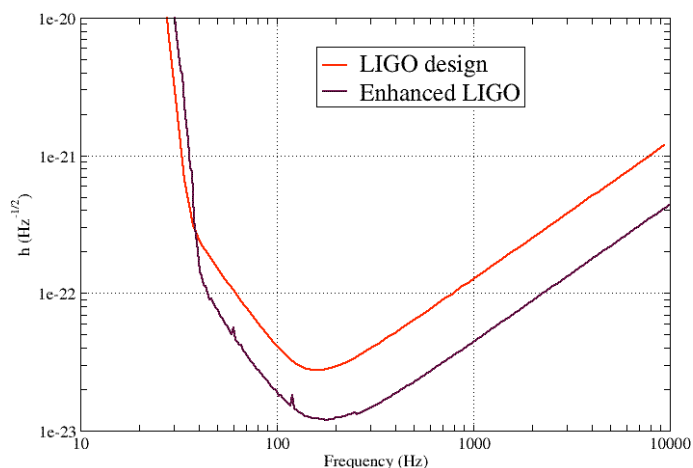




- Mettre en œuvre les technologies disponibles pour augmenter la sensibilité d'un facteur 2 à 3 → **probabilité de détection  $\times \sim 10$**
- Tester des solutions pour les détecteurs de 2<sup>ème</sup> génération

## Enhanced LIGO

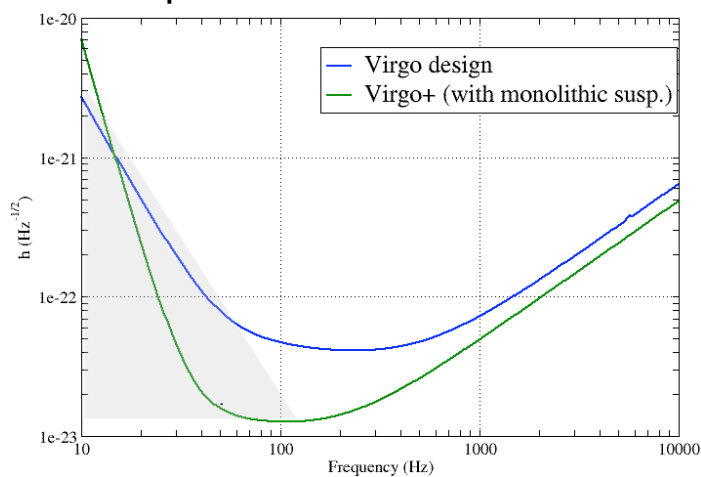
- Augmentation de la puissance laser
- Réduction des bruits environnementaux
- Détection directe (homodyne)



2009

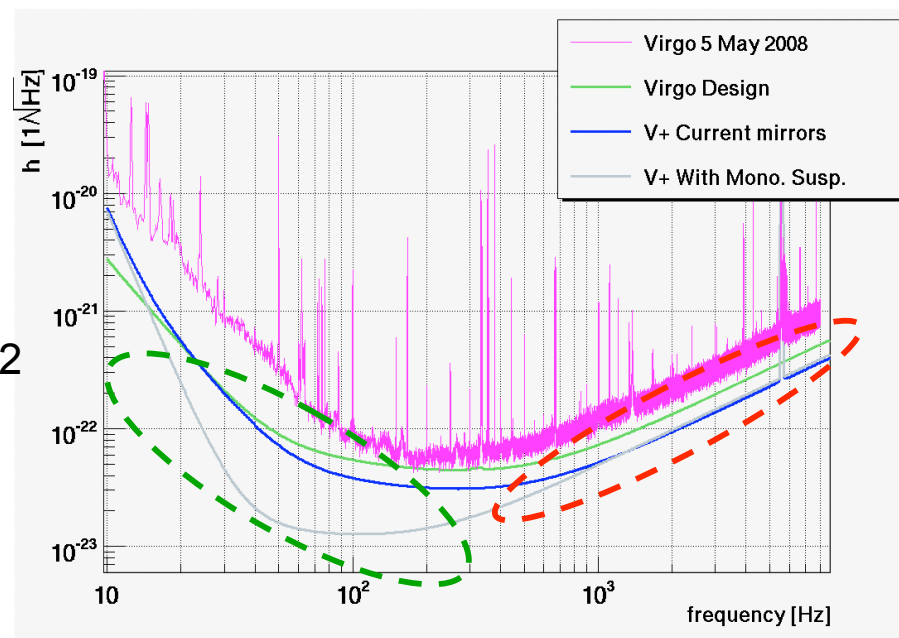
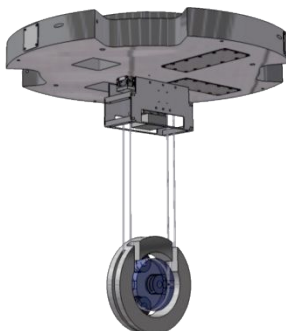
## Virgo+

- Augmentation de la puissance laser et compensation thermique
- Augmentation de la finesse des cavités
- Réduction éventuelle du bruit thermique des suspensions



- **Combattre le bruit de photons**
  - Laser de 50 W
  - Système de compensation thermique

- **Réduire le bruit thermique**
  - Suspensions monolithiques
  - Installation lors d'une interruption de VSR2



- **Autres améliorations**
  - Augmenter la finesse des cavités (miroirs)
  - Nouvelle électronique de contrôle (plus de souplesse)
  - Réduction des bruits d'environnement (photodiodes principales sous vide)

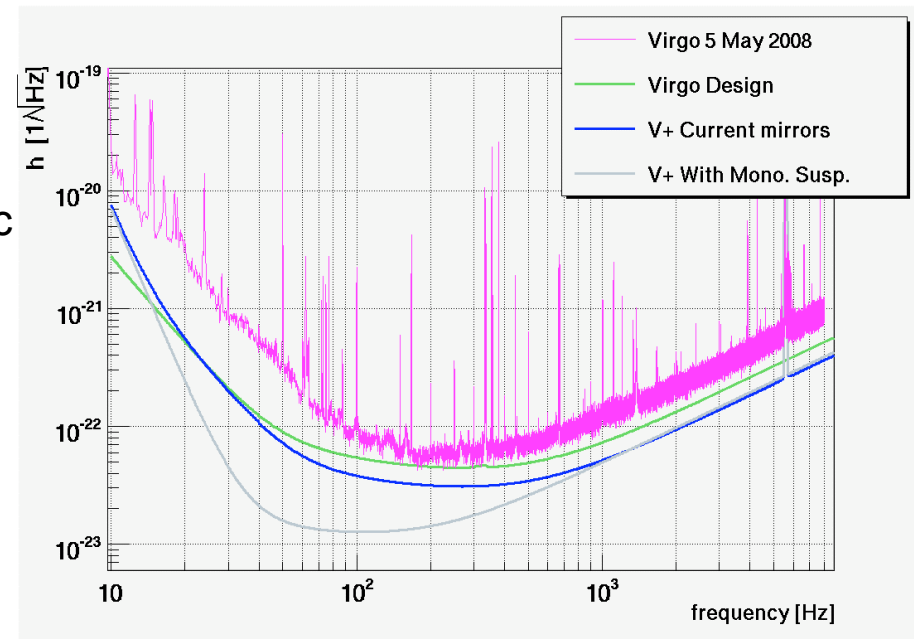
Payload solution	Crab (60Hz)	BNS range	BBH range	Burst; 1kHz
Virgo design	$7.7 \cdot 10^{-23}$	13 Mpc	63 Mpc	$7.5 \cdot 10^{-23}$
V+ Current mirrors, no E.C.	$5.6 \cdot 10^{-23}$	15 Mpc	76 Mpc	$5.1 \cdot 10^{-23}$
V+ Steel Wires; new mirrors	$4.6 \cdot 10^{-23}$	21 Mpc	109 Mpc	$5.0 \cdot 10^{-23}$
V+ Mon Suspension	$1.4 \cdot 10^{-23}$	49 Mpc	250 Mpc	$5.0 \cdot 10^{-23}$

*Comparison of the effect of the payload improvement for different type of signals. The CW Crab*

- Démarrage de VSR2 à l'été 2009
- Taux d'évènements attendus:
  - **BNS**: Horizon moyen de 15 à 49 Mpc  
→ de 1/60 ans à 0.6 par an
  - **BBH**: 0.01 à 0.5 par an

### Enhanced LIGO

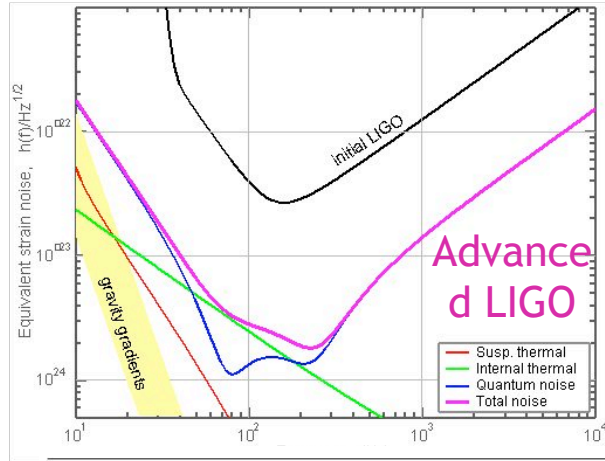
- Installation quasiment complète
- Commissioning en cours
- Début de S6 au printemps 2009



- **Les ondes gravitationnelles et les enjeux de leur détection**
- **La détection par interférométrie : LIGO et Virgo**
- **Performances pendant les prises de données S5 et VSR1**
- **Analyse de données et potentiel scientifique actuel**
- **Vers les prises de données S6 et VSR2**
- **Les détecteurs avancés**

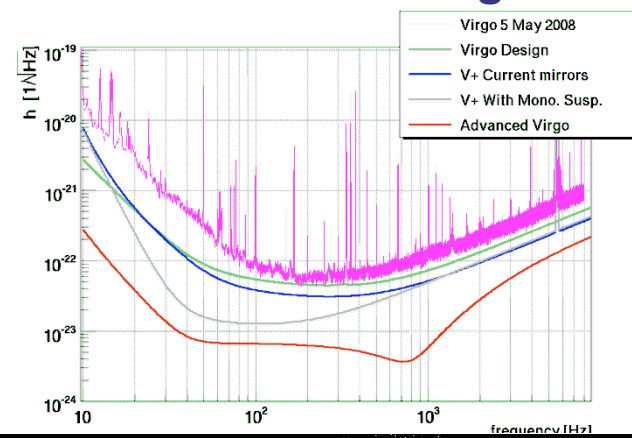
**Objectif : Gagner un facteur 10 en sensibilité par rapport à LIGO/Virgo → volume x 1000**

## Advanced LIGO



Inspirational range (Mpc)	BNS	BBH
Virgo (design)	13	58
Virgo+ (with mon. susp.)	49	250
Advanced LIGO	175	975
AdV (no SR, fig.2)	97	265
AdV (with SR, fig.3)	121	856

## Advanced Virgo

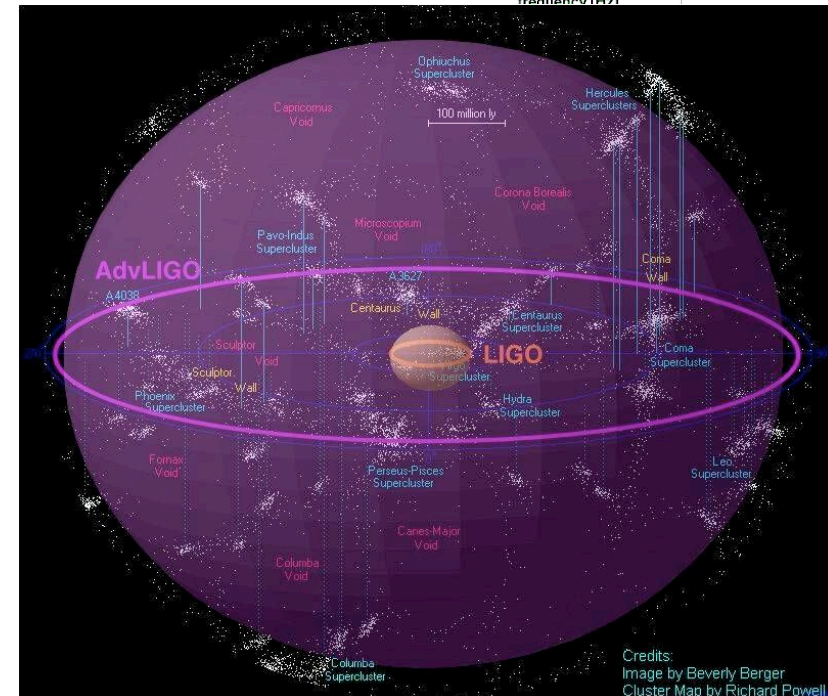


## Détection très probable

Ex. taux attendus pour Adv. Virgo

- BNS : ~ 10 par an
  - BBH : ~ 20 par an jusqu'à  $z \sim 0.1$
- On peut faire de la cosmologie !

- Pulsars : écart à la sphéricité  $\epsilon \sim 10^{-8}$



**Réduction des bruits à haute fréquence (bruit de photons)**  
**Réduction des bruits à basse et moyenne fréquence (bruit thermique)**

- **Baseline**

- Interféromètre avec dual-recycling
- Laser 200 W
- Compensation thermique
- Détection DC
- Faisceau gaussien, waist au milieu des cavités FP
- Miroirs de 42 kg, avec traitement de surface amélioré
- Améliorations du super-atténuateur, suspension monolithique

- **Options possibles**

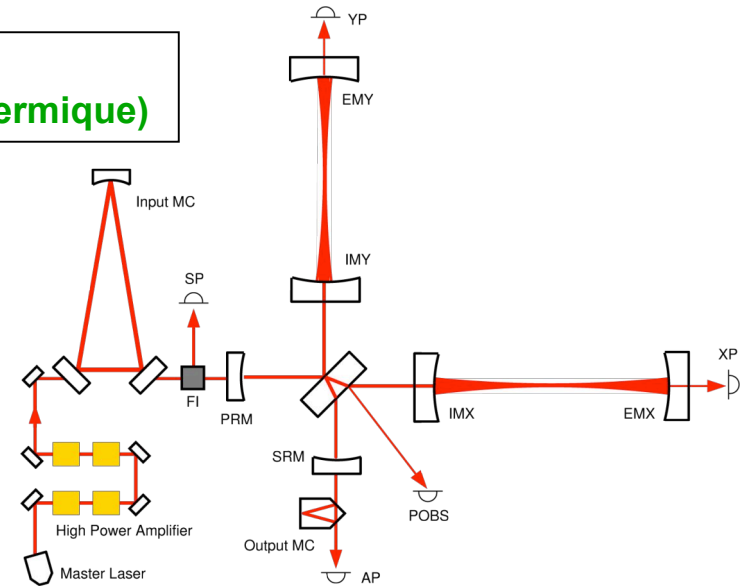
- Laser et IMC fibrés, miroirs plus lourds, actionneurs électrostatiques
- Faisceau non-gaussien, squeezing de la lumière

- **Planning**

- Construction en 2011-12, mise au point en 2013-14, prise de données en 2015

- **Evolution en deux étapes possible**

- Première étape sans signal recycling, ou avec SR mais à puissance réduite

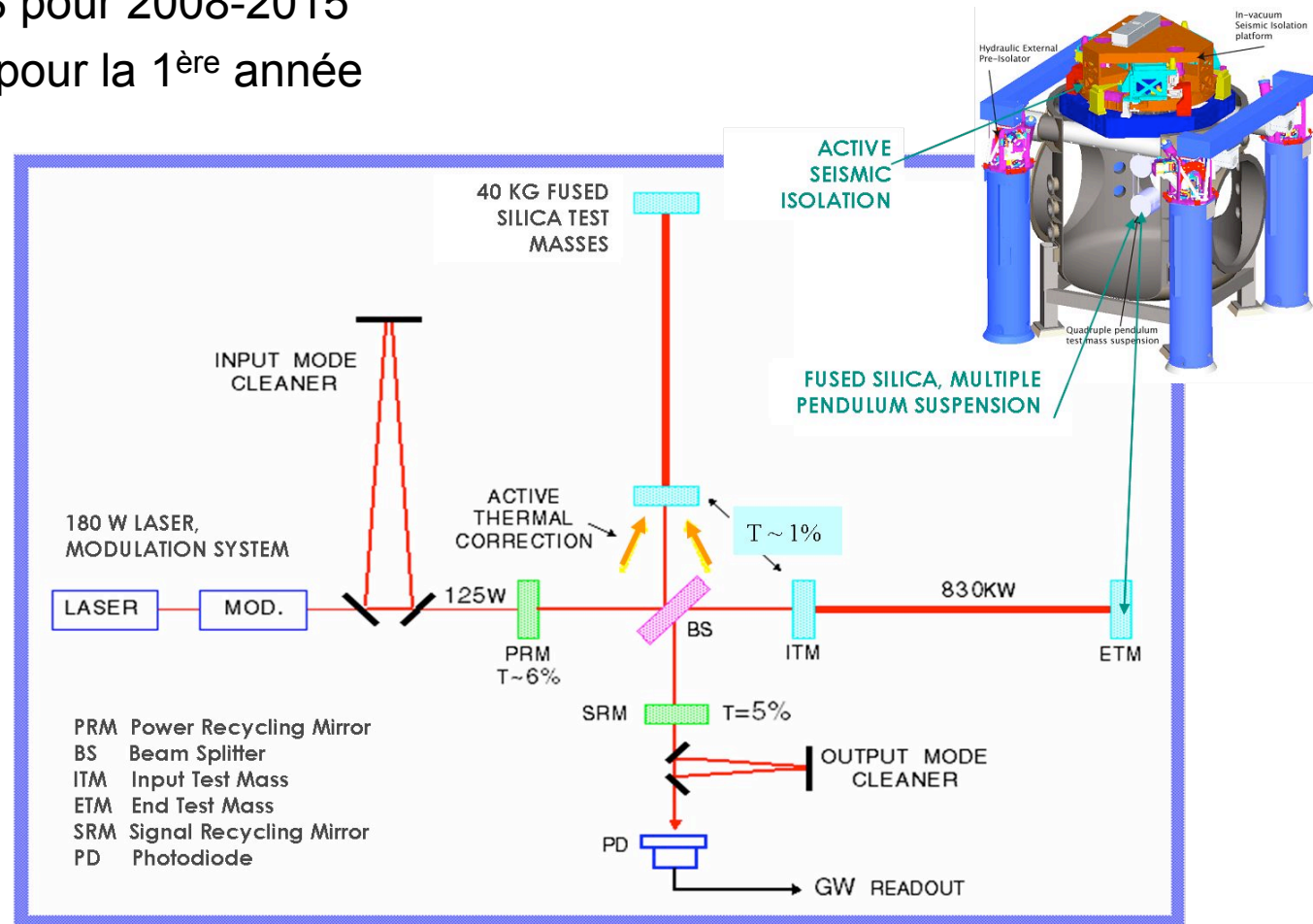




Le projet a officiellement démarré le 1<sup>er</sup> avril 2008  
 Budget approuvé

- » 205 M\$ pour 2008-2015
- » 32 M\$ pour la 1<sup>ère</sup> année

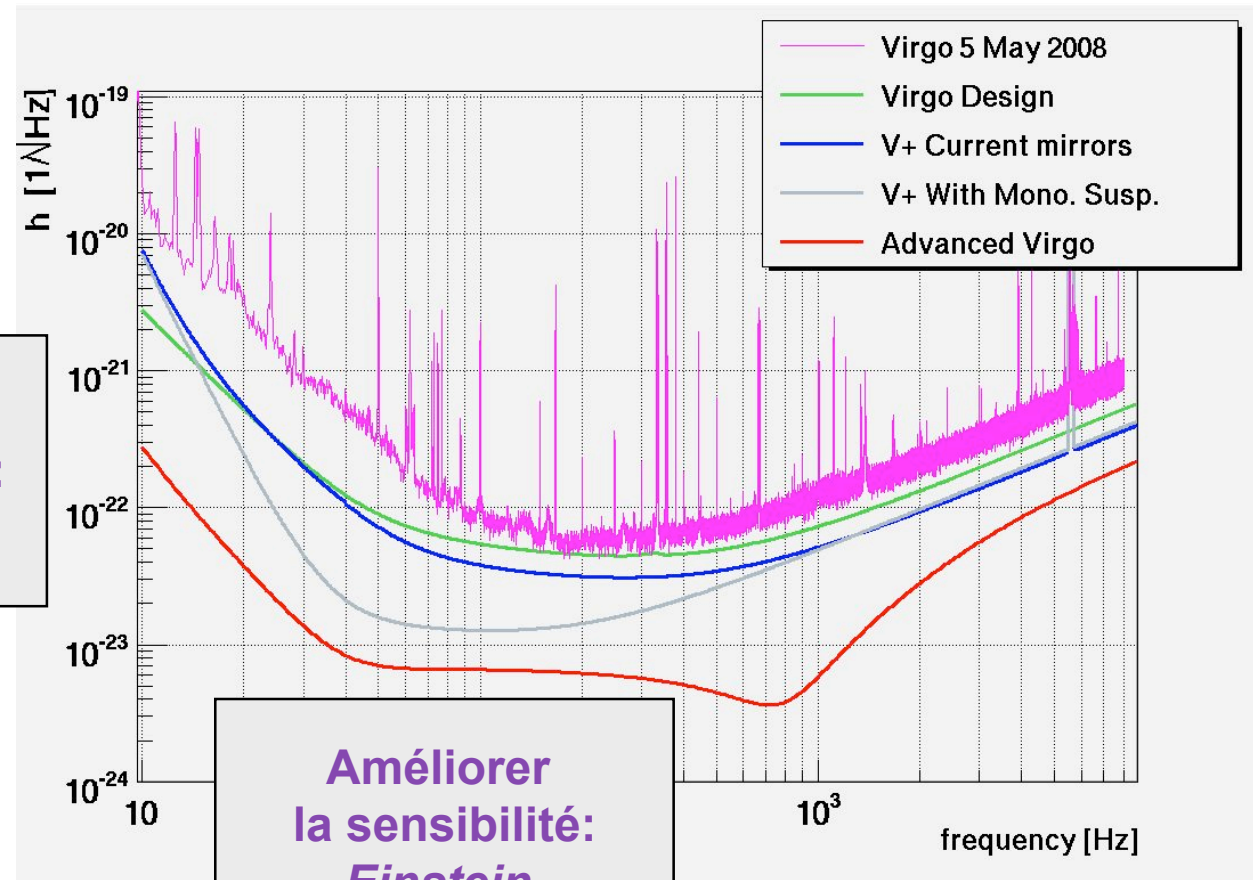
**Isolation sismique active**  
 Mur sismique: 40 Hz → 10 Hz





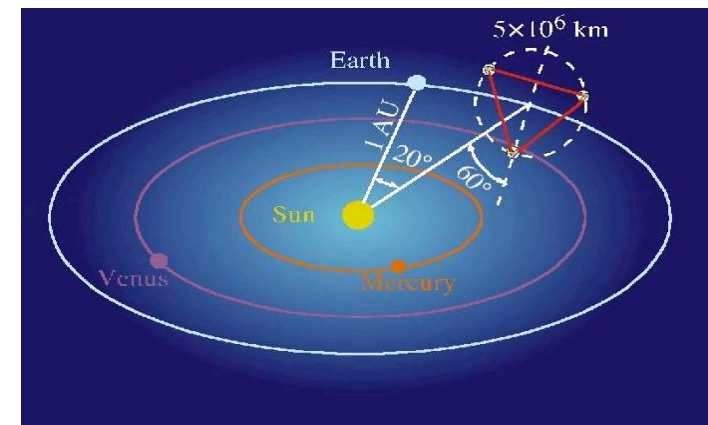
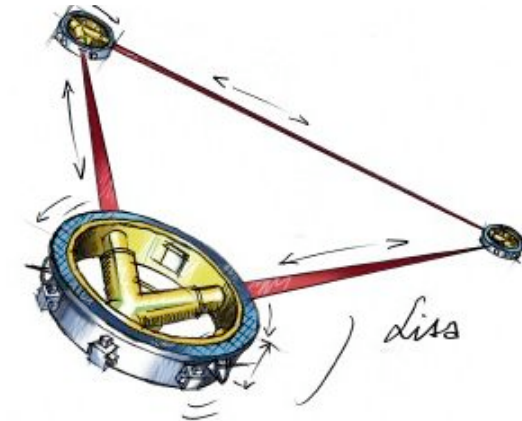
- **Conceptual design**
  - **Preliminary Cost Plan and Project Execution Plan**
  - **Technical design en préparation pour la fin de l'année**
- } délivrés en  
octobre 2007
- **Les raisons d'être optimiste**
    - Recommandation positive du conseil EGO (novembre 2007)
    - Le CNRS et l'INFN ont renouvelé le consortium EGO pour 5 ans
    - Virgo figure dans le plan stratégique du CNRS « Horizon 2020 »
  - **Les motifs d'inquiétude**
    - Décision du conseil EGO : revue du projet par un comité extérieur
      - En deux temps : fin 2008 et au printemps 2009
      - Pour une décision formelle au conseil de juin 2009
      - Nous avons besoin d'engager les premières dépenses en 2009
    - L'INFN a de sérieux soucis budgétaires
    - Nous prenons du retard par rapport à Advanced LIGO

**Elargir la  
 Bande passante:  
 LISA**



**Améliorer  
 la sensibilité:  
 Einstein  
 Telescope  
 (E.T.)**

- 3 satellites en orbite autour du Soleil
  - ◆ 3 bras de 5 millions de km
    - » Basses fréquences:  $\sim 0.1\text{mHz} - 1\text{Hz}$
- Challenges
  - ◆ Stabilisation en fréquence
  - ◆ Masses libres, asservissement des satellites
  - ◆ Environnement spatial
- Etape préliminaire: LISA Pathfinder
  - ◆ Lancement prévu en 2010
- Mission NASA + ESA
  - ◆ En compétition avec d'autres...
- Données au plus tôt en 2020
  - ◆ Durée finie (5 ans)





# EINSTEIN TELESCOPE

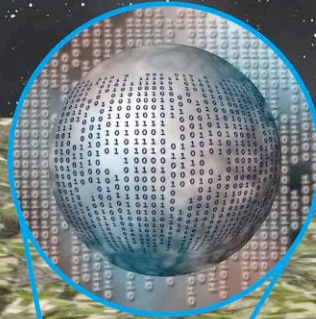
gravitational wave observatory



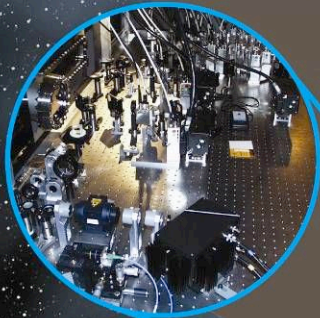
CENTRAL FACILITY



COMPUTING CENTRE



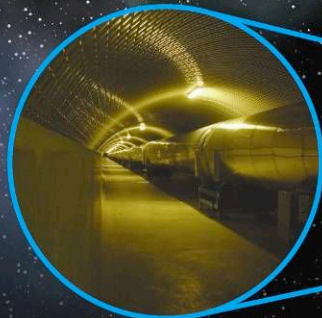
DETECTOR STATION



END

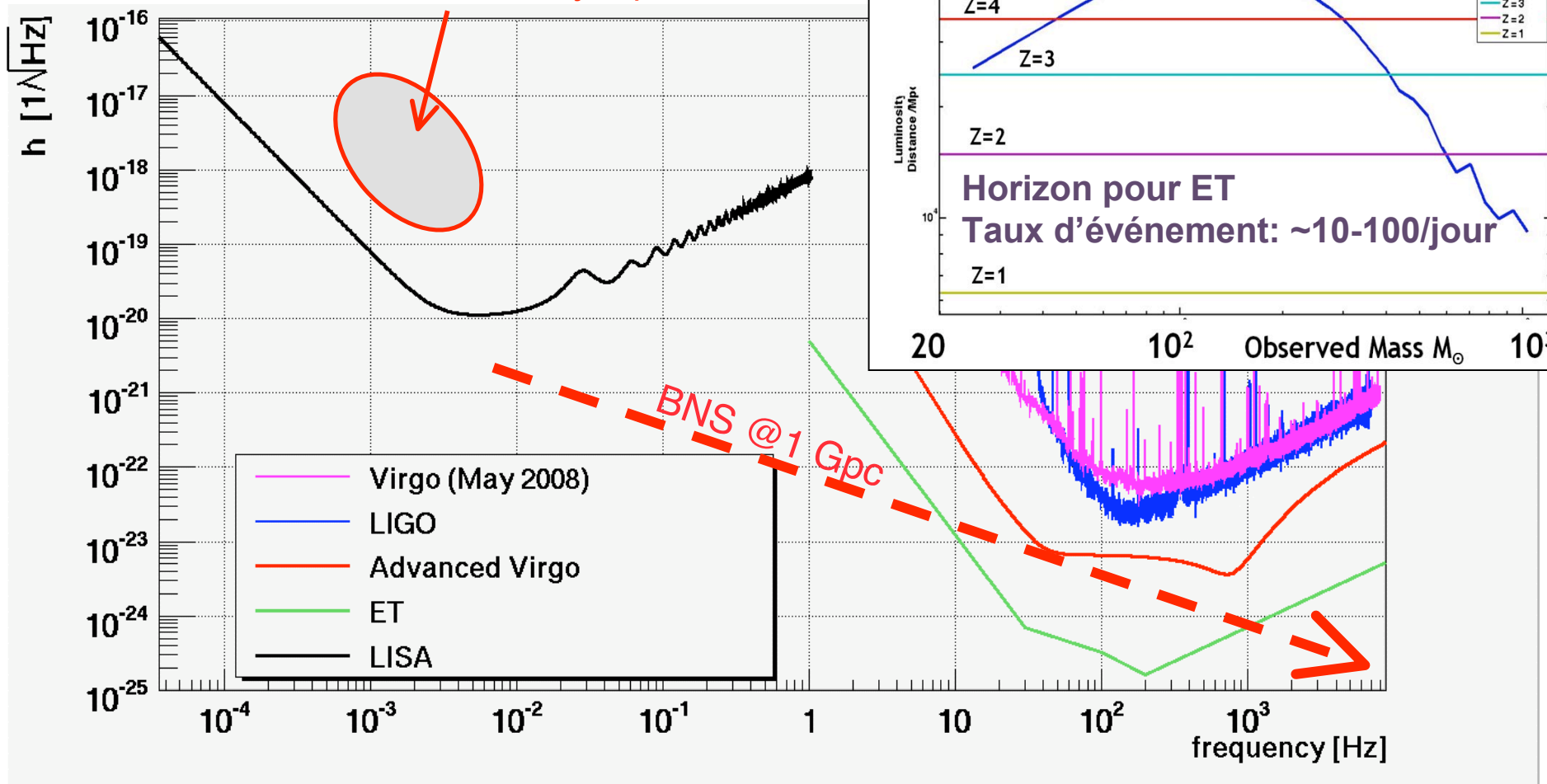


Length ~10 km



TUNNEL  $\varnothing$  ~5 m

Coalescences de trous noirs supermassifs,  
taux  $\sim 1$  / semaine, jusqu'à  $z \sim 15$





- **2007 fut une bonne année:**
  - Fin du run S5 (un an de données en triple coïncidence)
  - Accord LIGO-Virgo
  - Première prise de données conjointe S5/VSR1
- **Les détecteurs de 1<sup>ère</sup> génération fonctionnent à sensibilité nominale**
- **Prochaines prises de données au printemps/été 2009**
  - Une étape importante vers les détecteurs avancés
  - Sensibilité x 2-3
- **Deuxième génération de détecteurs en cours de préparation**
  - Prise de données vers 2015
  - Une détection très probable (10 évènements/an pour BNS)
  - Début de l'astronomie gravitationnelle
- **Des liens de plus en plus étroits entre LIGO et Virgo**
  - Evolution parallèle Virgo+/eLIGO, AdV/Advanced Virgo