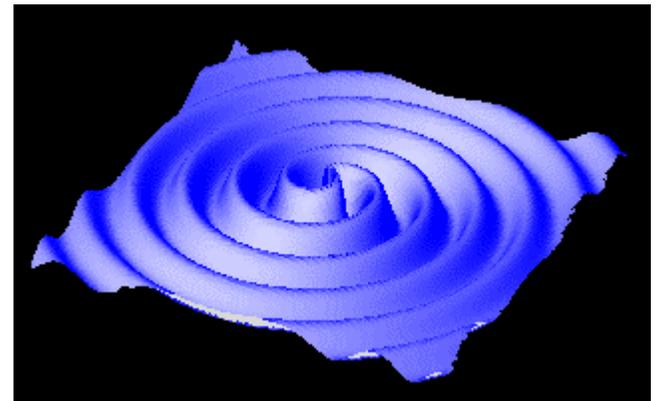


# Le Fond Gravitationnel Stochastique: Sources et Detection



Tania Regimbau  
*ARTEMIS - OCA*

# Le Fond Gravitationnel Stochastique

➤ 2 composantes:

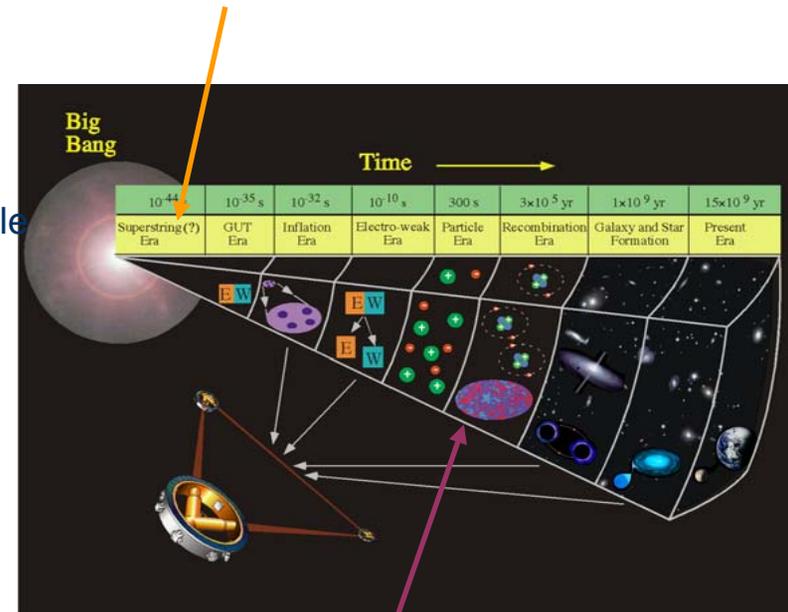
➤> **cosmologique**: signature de l'Univers primordial  
*inflation, cordes cosmiques, transitions de phase...*

➤> **astrophysique**: superposition des sources depuis le  
debut de l'activité stellaire:  
*systemes binaires denses, supernovae, formation de  
trous noirs, trous noirs supermassifs ...*

➤ caractérise par le **paramètre de densité d'énergie**:

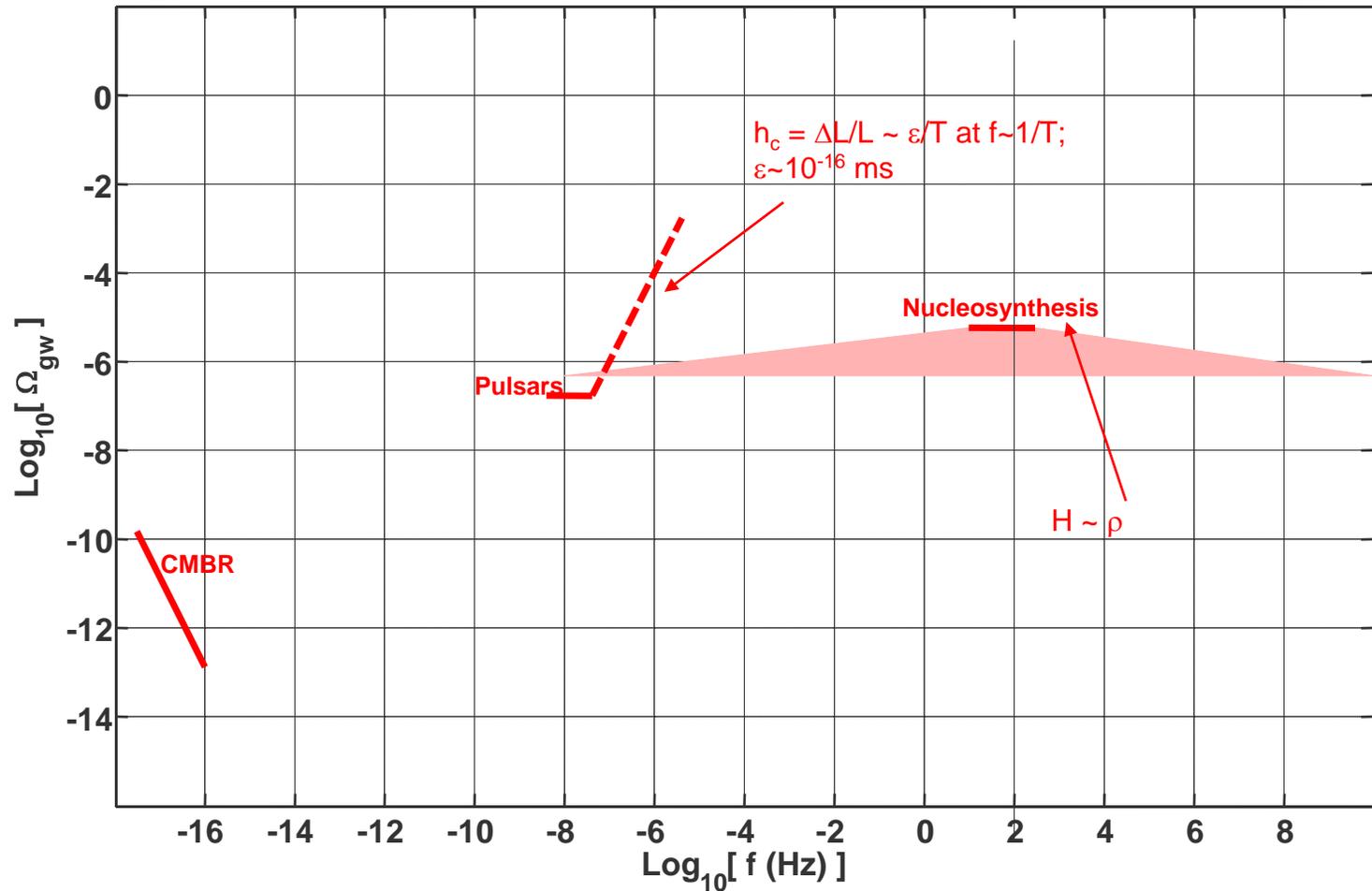
$$\Omega_{gw}(f) = \frac{d\rho_{gw}(f)}{\rho_c d(\ln f)} = \frac{10\pi^2 f^3}{3H_0^2} S_{gw}(f)$$

10<sup>-43</sup>s: découplage des **gravitons** (T = 10<sup>19</sup> GeV)

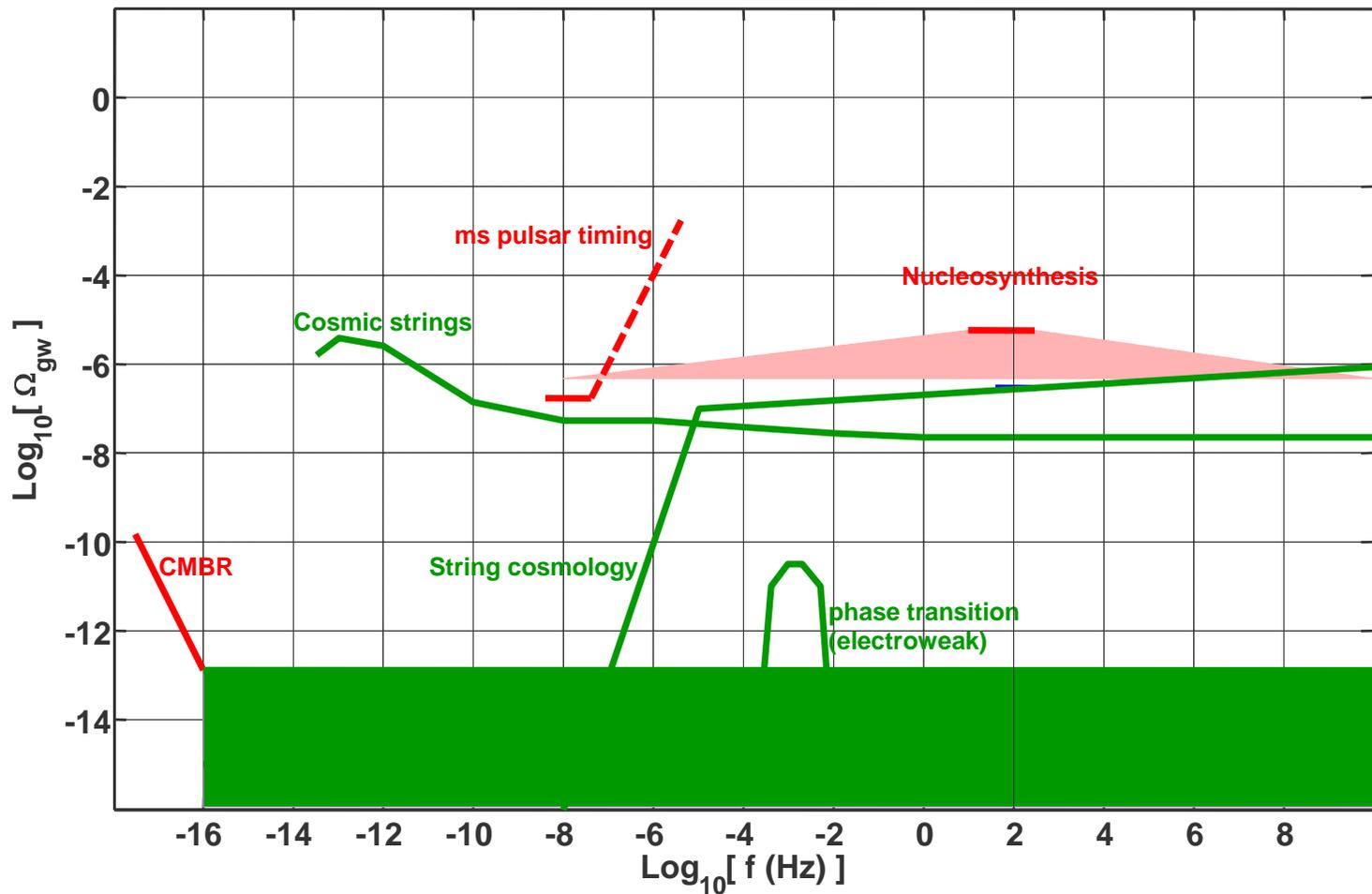


300000 ans: découplage des **photons** (T = 0.2 eV)

# Contraintes Observationnelles



# Predictions Cosmologiques



# Predictions Astrophysiques

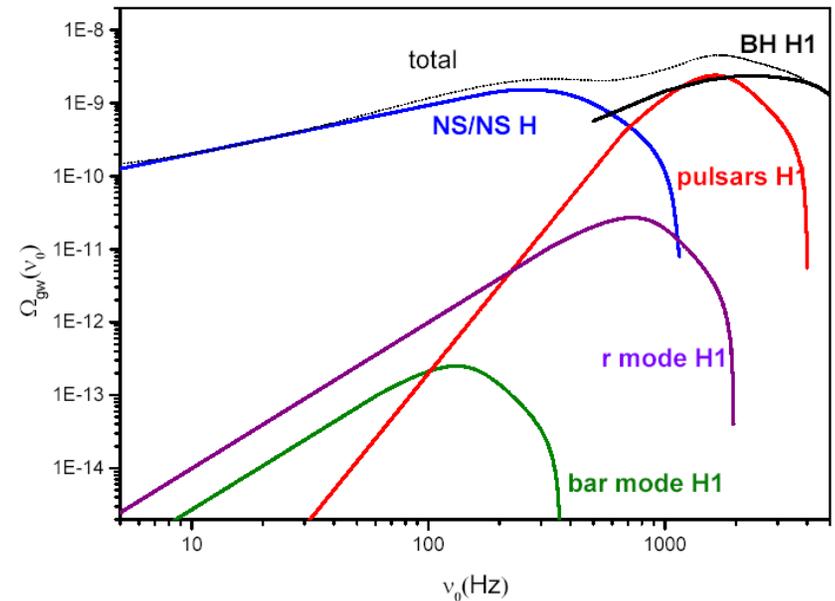
Pour une source astrophysique donnée,  
le fond gravitationnel stochastique est déterminé par:

- le modèle cosmologique ( $H_0, \Omega_m, \Omega_v$ )
- le taux de formation des sources
- la densité spectrale d'une source individuelle

$$\Omega_{gw}(f) = \frac{1}{\rho_{critical}} \frac{v_0 F_{v_0}}{c^3} \quad \text{ou} \quad F_{v_0} = \int_0^{z_{max}} \frac{1}{4\pi d_L^2} \frac{dE_{gw}}{dv_0} dR(z)$$

La nature d'un fond stochastique astrophysique est déterminée par le rapport entre la **durée moyenne d'un événement** individuel et **l'intervalle de temps moyen** entre deux événements consécutifs

- $t_{ev} \gg \Delta t$  : fond continu 
- $t_{ev} \sim \Delta t$  : fond pop-corn 
- $t_{ev} \ll \Delta t$  : shot noise 



# Methode de Detection

Le fond stochastique ne se **differenciant** pas du bruit du detecteur, la methode de detection optimale consiste a **correler** entre eux les signaux de sortie de deux (ou plus) detecteurs.

## hypotheses:

- isotrope, gaussien, stationnaire (origine cosmologique)
- signal et bruit, bruit entre detecteurs **independants**

## Cross correlation statistic:

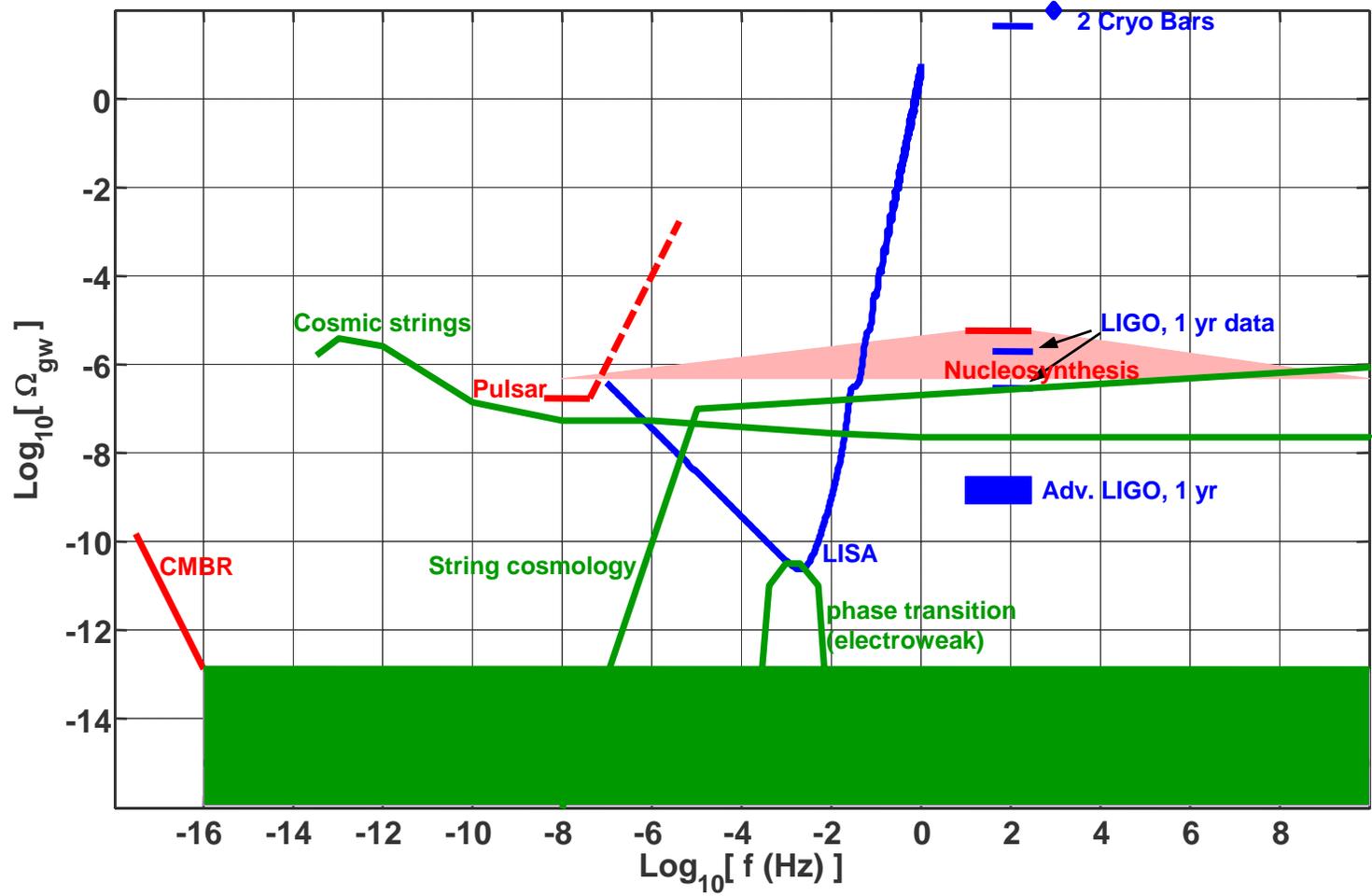
- combiner les signaux de sortie en utilisant un **filtre adapte** pour optimiser le rapport signal a bruit

$$Y = \int \tilde{s}_1(f) \tilde{Q}(f) s_2(f) df \quad \text{avec} \quad \tilde{Q}(f) \propto \frac{\gamma(f) S_{gw}(f)}{P_1(f) P_2(f)}$$

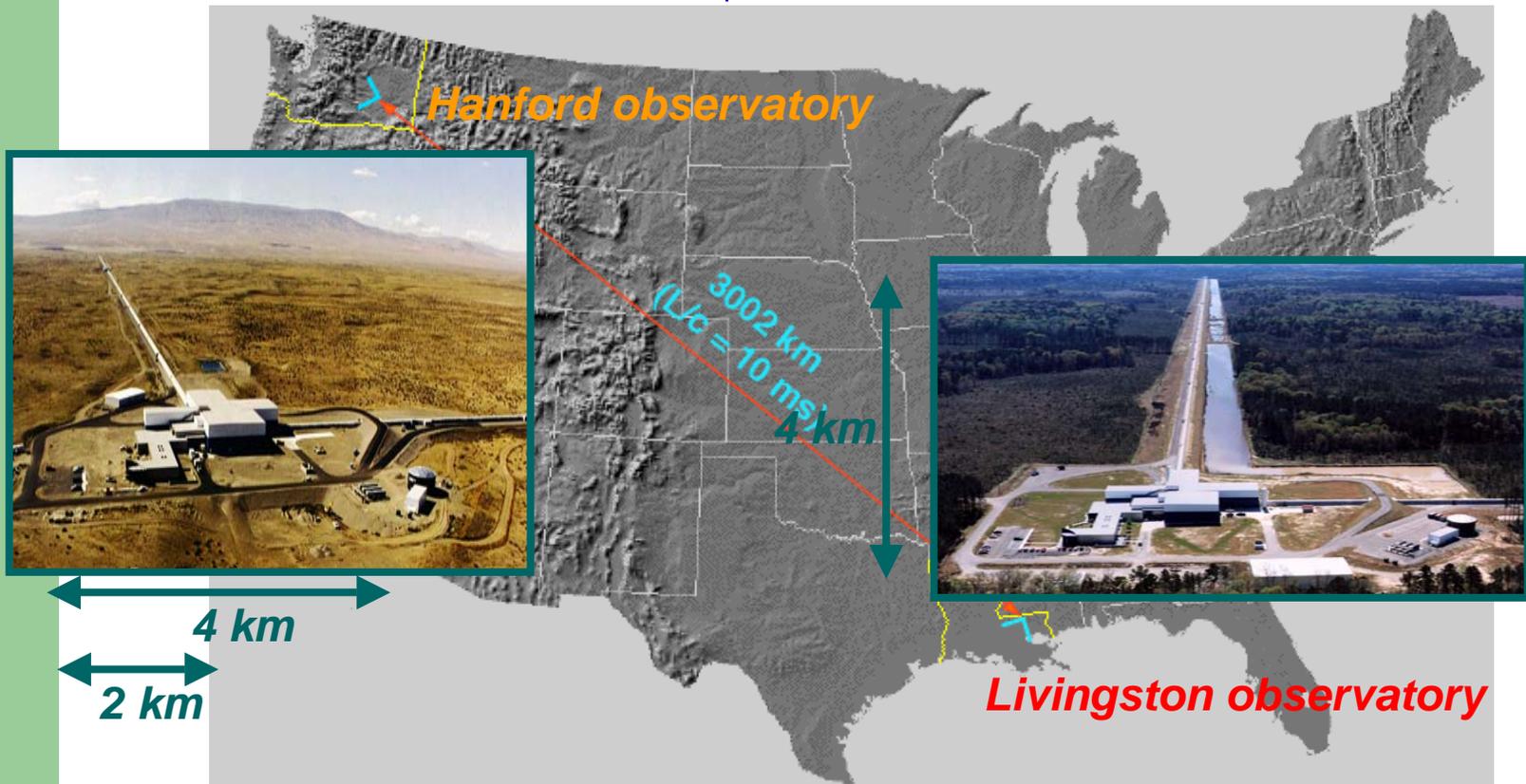
- le **signal** est donne par la **moyenne**  $\mu = \langle Y \rangle$  et le **bruit** par la **variance**  $\sigma^2 = \langle (Y - \mu)^2 \rangle$

## Limite superieure:

La **limite superieure** a **90%** de confiance est donnee par:  $\Omega_{gw} h_{100}^2 \leq \mu + 1.26\sigma$

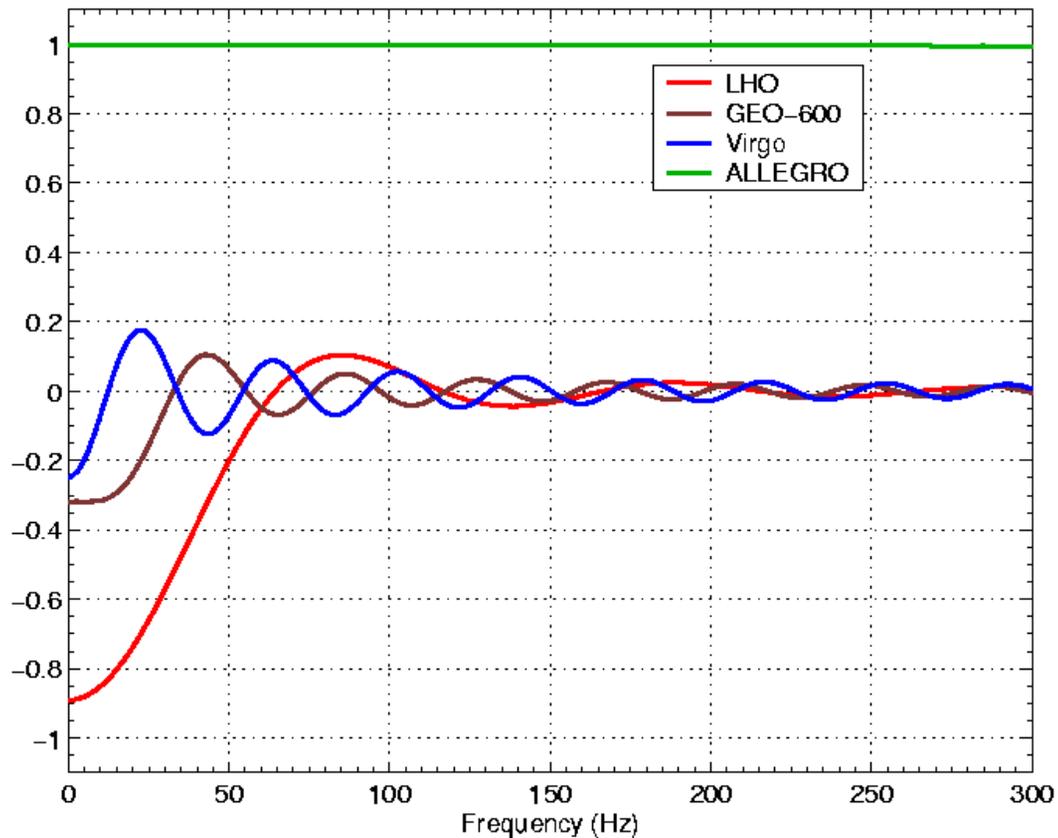


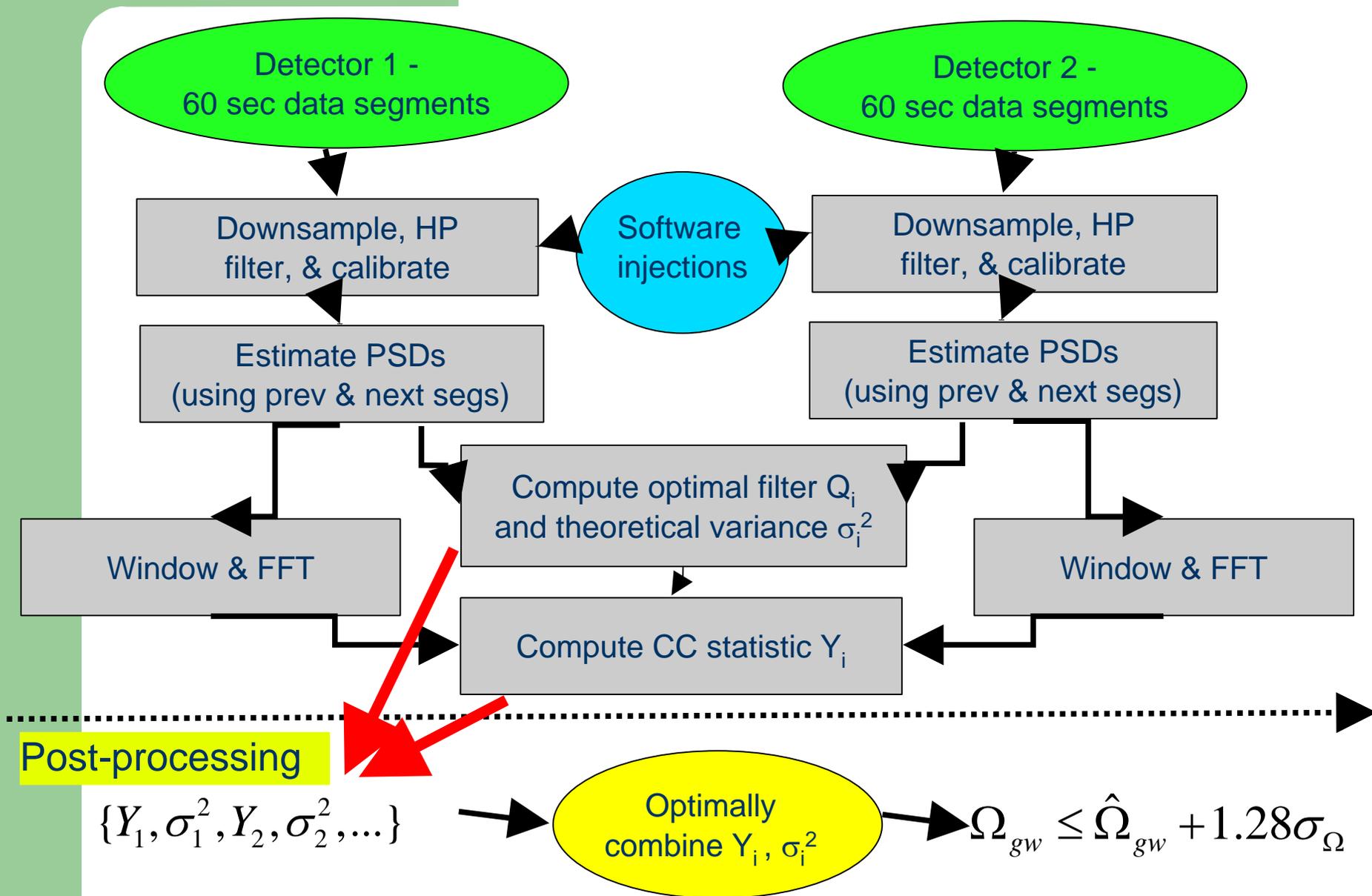
# Detection avec des Interferometres Terrestres: exemple LIGO



# Overlap reduction function

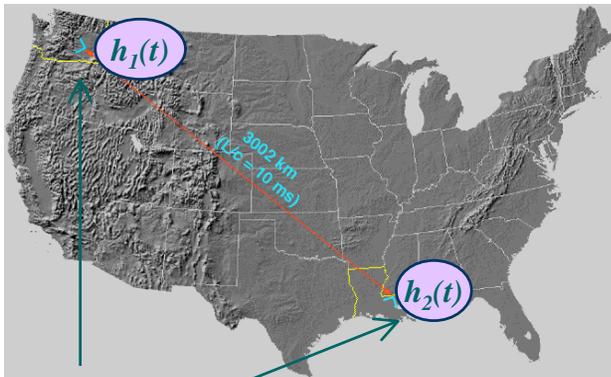
Example: Overlap Reduction Function (LLO and other detectors)





# Validation de la Chaîne d'Analyse de Données:

$$\langle \tilde{h}_1(f_i) \tilde{h}_2(f_j) \rangle = \left( \frac{3H_0^2 T}{20\pi^2} \right) f_i^{-3} \Omega_{gw} \gamma_{12} \delta(f_i - f_j)$$



## Injection Hardware

- dans les masses test :  $\tilde{o}_{1,2}(f_i) = T_{1,2}^{pendulum}(f) \tilde{h}_{1,2}(f_i)$
- durée courte (1024 s), en début ou fin de run
- une seule réalisation, amplitude faible
- permet de tester la chaîne d'analyse de données et la calibration

## Injection Software

- à la sortie du détecteur:  $\tilde{o}_{1,2}(f_i) = T_{1,2}(f) \tilde{h}_{1,2}(f_i)$
- dans toute la durée du run
- plusieurs essais, large gamme d'amplitudes
- permet de tester la chaîne d'analyse de données et de définir les paramètres de recherche optimaux

# Premiers Resultats & Sensibilite Attendue

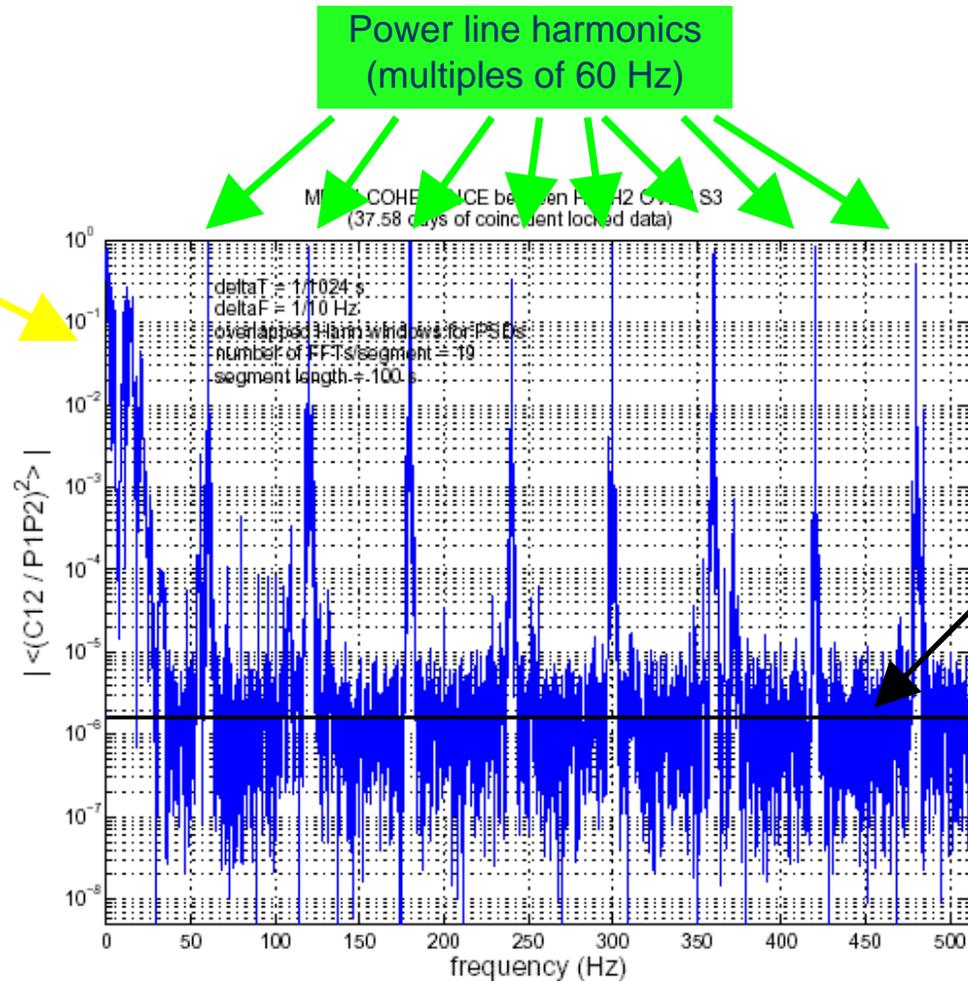
Meilleures mesures precedentes:

- Glasgow/Garching, **interferometres**, 1994:  $\Omega_{gw}h^2_{100} < 10^5$  (100 - 1000 Hz)
- Explorer/Nautilus, **bars**, 1996 :  $\Omega_{gw}h^2_{100} < 60$  (907 Hz)

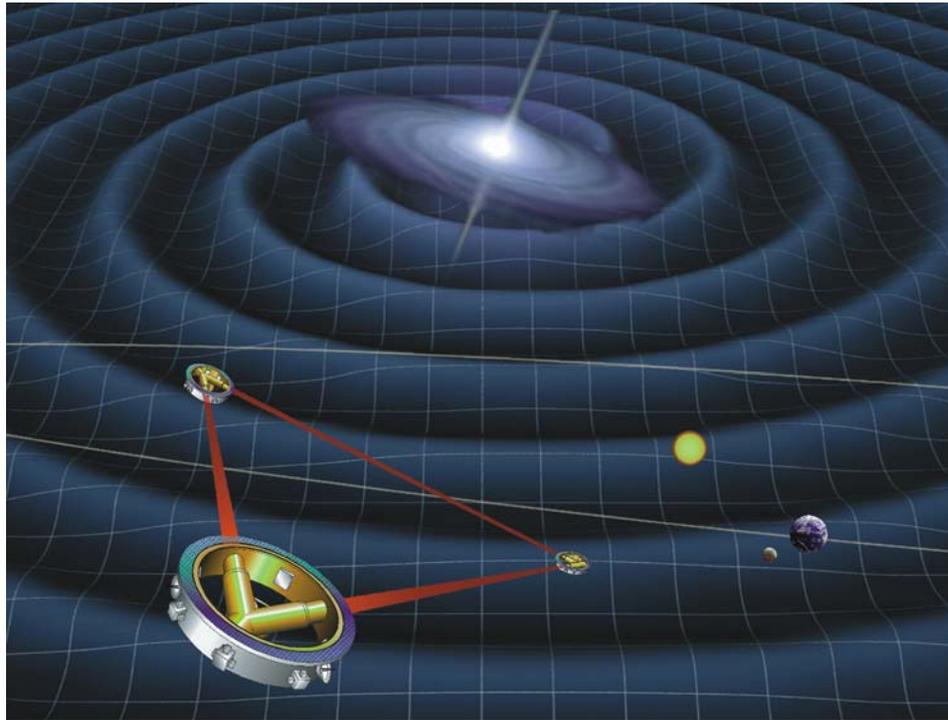
	H-L	H1-H2	Freq range	Observation Time
<b>S1 (upper limit)</b> PRD 69, 122004, 2004	< 23 +/- 4.6 (H2-L1)	seen instrumental noise	64-265 Hz	64 hours (08/23/02 – 09/09/02)
<b>S2 (upper limit)</b> Preliminary	< 0.018 +0.007- 0.003 (H1-L1)	seen instrumental noise	50-300 Hz	387 hours (02/14/03 – 04/14/03)
<b>S3 (sensitivity)</b> Expected from noise curves	$\sim 5 \times 10^{-4}$ (H1-L1)	potentially $\sim 10x$ lower than S3 H1-L1	50-300 Hz	$\sim 240$ hours (10/31/03 – 01/09/04)
<b>Design sensitivities</b>				
<b>LIGO I</b>	$\sim 1x 10^{-6}$	$\sim 1.5x 10^{-7}$	30-300 Hz	1 year
<b>LIGO Advanced nominal tuning</b>	$\sim 1.5x 10^{-9}$	$\sim 3x 10^{-10}$	10-100 Hz	1 year
<b>LIGO Advanced low-freq tuning</b>	$\sim 3.5x 10^{-10}$	$\sim 2.5x 10^{-10}$	10-50 Hz	1 year

# Coherence entre H1-H2 pour S3

Broad-band coherence  
(acoustic coupling)

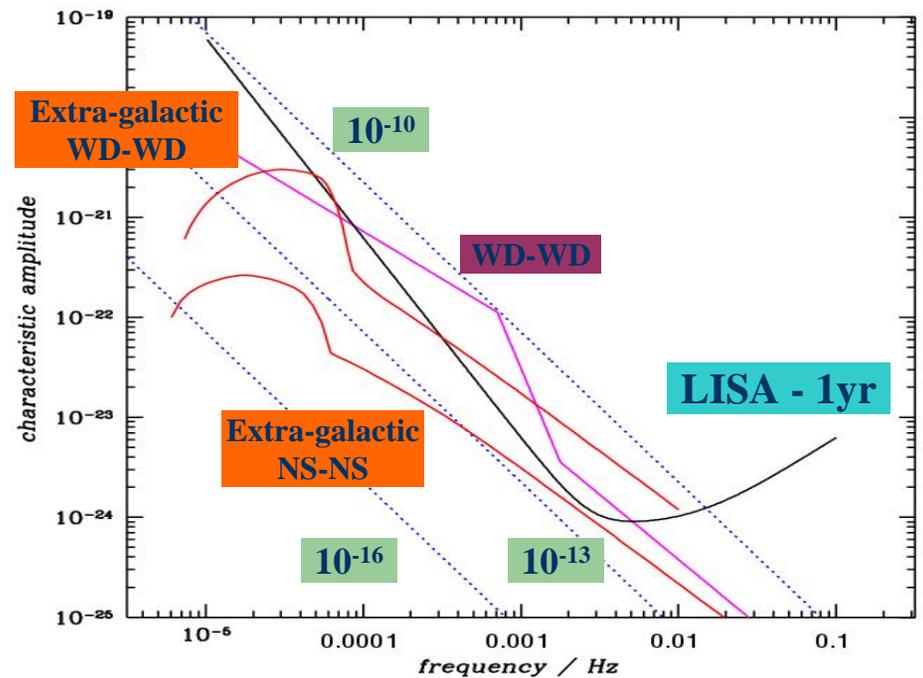


# Detection avec LISA



# Sensibilite

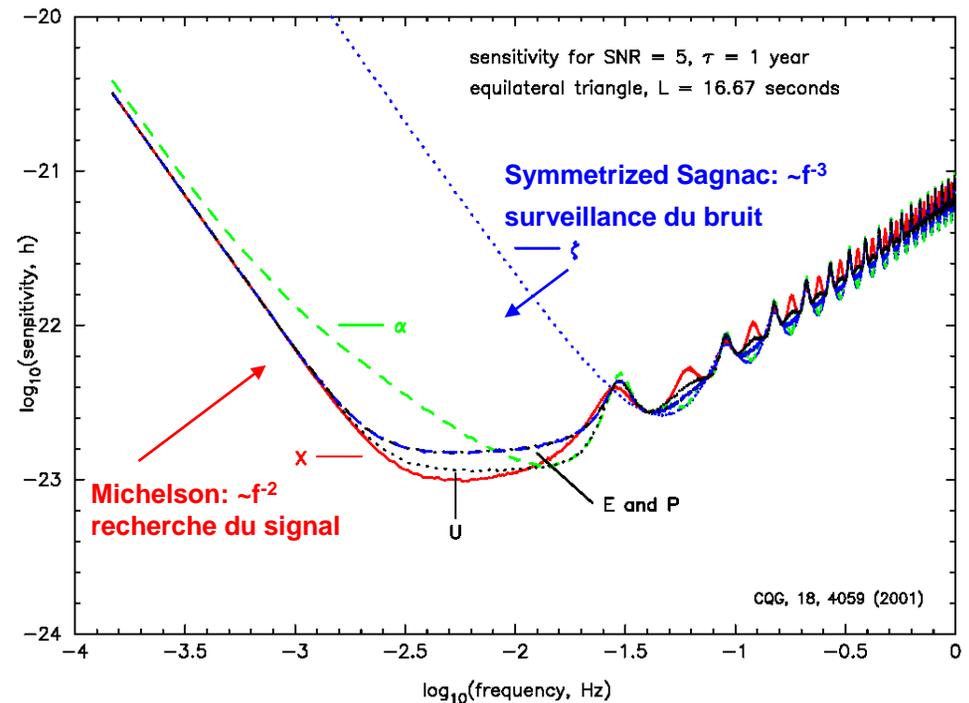
Entre 0.2-3 mHz LISA sera limitee par le fond gravitationnel galactique plutot que par le bruit de fond de l'instrument, a quoi il faut ajouter le bruit de confusion des binaires WD (e.g. Bender and Hils)



# Fond Gravitationnel ou Bruit Instrumental

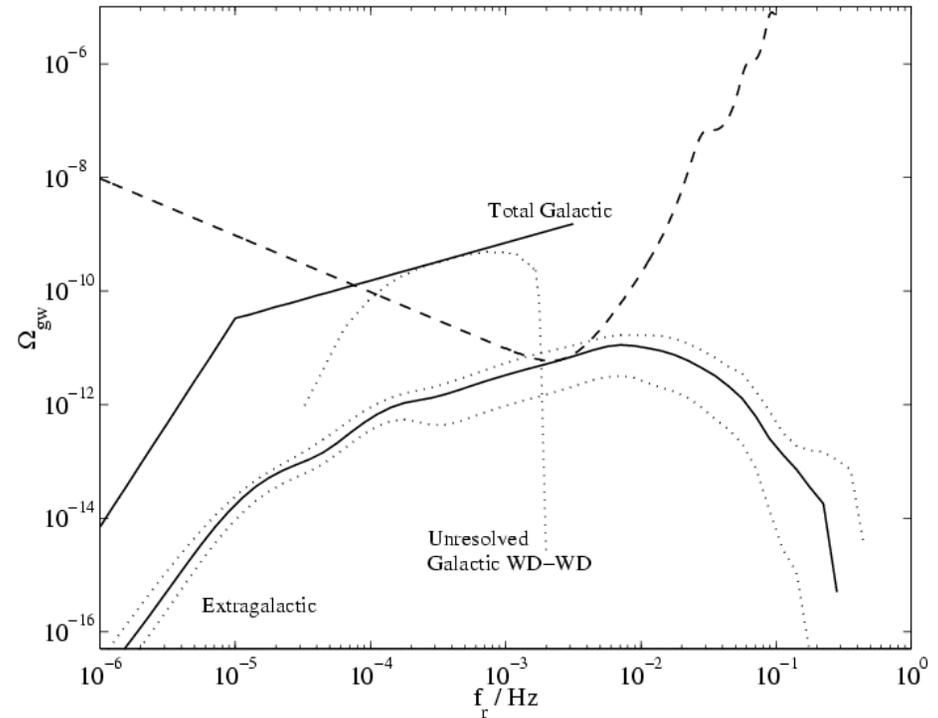
Les trois interferometres de Michelson ont des plateformes communes et donc des **bruits communs** que l'on **ne peut pas eliminer en correlant** entre eux les signaux de sortie.

L'idée cle est d'utiliser la configuration de **Sagnac**, **pratiquement insensible au signal gravitationnel**, pour estimer le bruit de fond de l'instrument et le soustraire a la configuration standard



# Fond Cosmologique ou Astrophysique ?

- **modéliser** la contribution astrophysique pour pouvoir la **soustraire** et retrouver le fond cosmologique
- un fond stochastique astrophysique aura toujours un certain nombre d'événements **au dessus du seuil de confusion** (amplitude pour laquelle on trouve en moyenne une source par intervalle de fréquence de résolution)



# Conclusions

➤ Le fond stochastique cosmologique est un moyen unique d'explorer l'Univers primitif ( $\sim 10^{-43}$  s) et de tester les théories cosmologiques

➤ avec LIGO on a commence a etabli des limites superieures qui sont de plusieurs ordres de grandeurs au dessous des mesures precedentes

*LIGO S2 (preliminary):  $\Omega_{\text{gw}} h^2_{100} < 0.018 + 0.007 - 0.003$  (50 – 300 Hz)*

➤ LISA devrait permettre d'atteindre  $\Omega_{\text{gw}} = 10^{-10} - 10^{-12}$

➤ De nouvelles techniques sont en developpement pour

- ameliorer la sensibilite en combinant de facon optimale les differentes configurations
- rechercher l'anisotropie du fond stochastique

