

QUOI DE NEUF DOCTEUR, CHEZ LES DÉTECTEURS D'ONDES GRAVITATIONNELLES?

Jérôme Novak (Jerome.Novak@obspm.fr)

Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris-Diderot

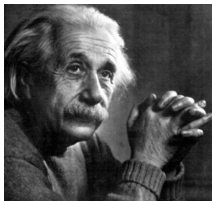
avec l'aide de:
Marie-Anne Bizouard, Éric Gourgoulhon, Nicolas Leroy

Mercredis de l'Observatoire, 5 mars 2008

Les ondes gravitationnelles

RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Dans la théorie de Newton, la force de gravité se déplace **instantanément**

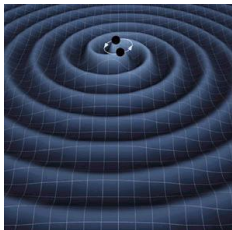
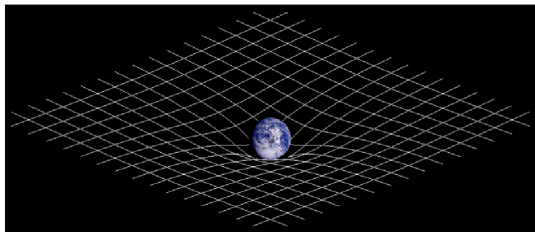


Dans le cadre de la **Relativité Générale**, cette interaction se propage, au maximum à la vitesse de la lumière

⇒ c'est cette théorie (Einstein, 1915) qui prédit l'existence d'ondes gravitationnelles.

LES ONDES DE L'ESPACE-TEMPS

D'après la Relativité Générale d'Einstein (et aussi des tests et des observations), les masses courbent l'espace-temps.



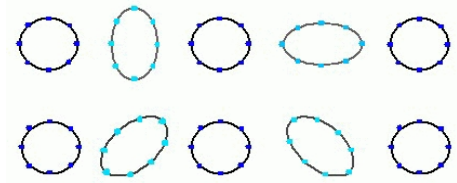
Quand les masses sont accélérées, la courbure se propage, comme des vagues à la surface de l'eau \Rightarrow ondes gravitationnelles

- Loin des masses, ces plis d'espace-temps se déplacent à la vitesse de la lumière,
- Il existe deux types de polarisation : + et \times .

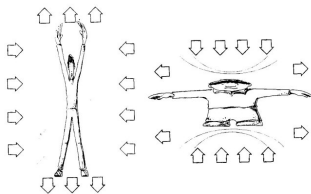
EFFET D'UNE ONDE GRAVITATIONNELLE

Ces ondes sont la perturbation / espace-temps plat (sans champ gravitationnel) : l'espace-temps est légèrement modifié :

⇒ les **distances** changent pendant un bref moment.



Les amplitudes sont **énormément** grossies...



Après le passage de l'onde, tout redevient "comme avant", comme au passage d'une vague unique au milieu de l'eau.

QU'EST-CE QUI ÉMET DES ONDES GRAVITATIONNELLES ?

⇒ l'accélération de masses / énergie...

En utilisant les équations d'Einstein

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T^{\mu\nu}$$

- au premier ordre linéaire, on trouve une équation d'onde pour $h \sim \ddot{Q}$ (moment quadrupolaire de la source) ;
- l'effet d'une onde gravitationnelle sur deux particules de masses négligeables est la variation de leur distance au cours du temps $\Delta l/l \simeq h$;
- le flux émis à une fréquence f (fréquence **mécanique**) est

$$F = 0.3 \left(\frac{f}{1 \text{ kHz}} \right)^2 \left(\frac{h}{10^{-21}} \right)^2 \text{ Wm}^{-2}$$

- la puissance (ou luminosité) gravitationnelle rayonnée par une source est

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

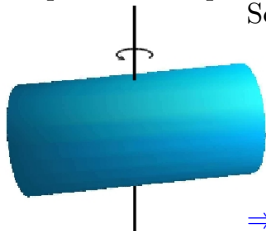
DES ONDES GRAVITATIONNELLES EN LABORATOIRE ?

Au XIX^e siècle, le physicien allemand Hertz prouve l'existence des ondes électromagnétiques en les produisant dans son laboratoire.

- les **ondes électromagnétiques** sont produites par la variation du **moment dipolaire des charges électriques**,
- les **ondes gravitationnelles** sont produites par la variation du **moment quadrupolaire des masses**.

Le plus efficace pour accélérer un objet, c'est de le faire tourner :

Soit un cylindre d'acier



- d'un mètre de diamètre et de **vingt** mètres de long (pèse **490 tonnes**),
- qui peut tourner à plus de 260 tours/mn (rupture de l'acier),

⇒ **aucun** espoir de détection (trop faible).

Sources astrophysiques

LES BONNES SOURCES...

Raison des faibles amplitudes calculées : le facteur constant dans

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

En introduisant le **rayon de Schwarzschild** (rayon du trou noir de même masse)

$$R_S = \frac{2GM}{c^2},$$

et en écrivant

$$\omega = \frac{v}{R}$$

on obtient :

$$L \sim \frac{c^5}{G} s^2 \left(\frac{R_S}{R} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6$$

⇒ Objets **compacts** en mouvement relativiste et non sphériques

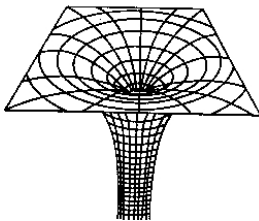
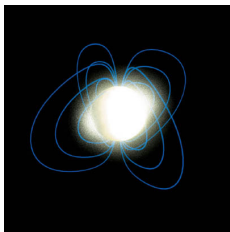
...SONT LES SOURCES ASTROPHYSIQUES

On peut donc estimer que les ondes gravitationnelles les plus fortes peuvent être émises par des masses accélérées :

- qui possèdent un très fort champ gravitationnel,
- qui vont à une vitesse proche de celle de la lumière,
- qui n'ont pas une forme sphérique.

Dans les objets astrophysiques connus, les plus efficaces semblent être :

les étoiles à neutrons,

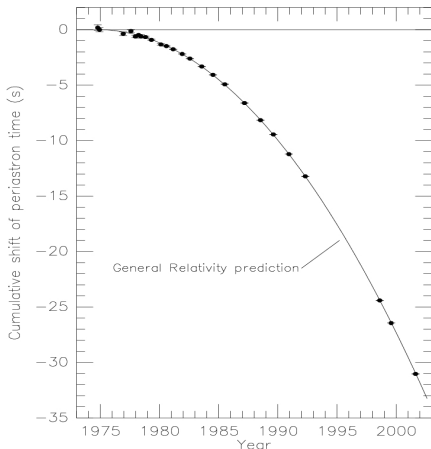


et les trous noirs.

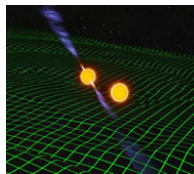
... surtout s'ils sont à deux, tournant l'un autour de l'autre...

EXISTENCE :

LES ONDES GRAVITATIONNELLES ONT DÉJÀ ÉTÉ DÉTECTÉES !



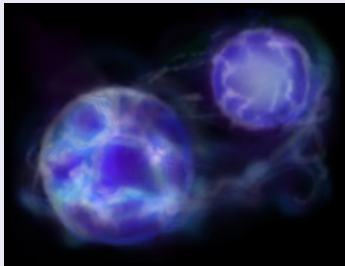
Le rapprochement des deux étoiles à neutrons (pulsars) de PSR1913+16 correspond, avec une précision extrême, à ce qui est prédit si ces deux étoiles émettent des ondes gravitationnelles.



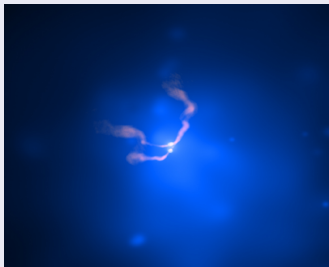
⇒ Prix Nobel de Physique pour Hulse et Taylor en 1993

LES BINAIRES D'ASTRES COMPACTS

DEUX ÉTOILES À NEUTRONS



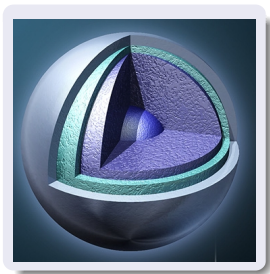
... OU DEUX TROUS NOIRS



tournant l'un autour de l'autre, se rapprochant jusqu'à fusionner...

- événements catastrophiques rares, mais très riches en ondes gravitationnelles,
- informations sur le nombre de tels “couples” et ainsi sur la vie des étoiles.

ÉTOILES À NEUTRONS ET *supernovæ*



- sources très nombreuses, mais quelle efficacité ?
 - les ondes gravitationnelles ne sont pas absorbées par la matière, et arrivent depuis le cœur dense
 - comment naissent les étoiles à neutrons ou les trous noirs ?
-
- astres observés en tant que **pulsars** en radio ou en X
 - fréquence de rotation : du mHz au kHz
 - variation du **quadrupole**
⇒ déformation / axe
 - comment se comporte la matière ultra-dense ?



Modélisation et analyse de données

POSITION DU PROBLÈME

- Pour voir les étoiles il suffit d'ouvrir les yeux (la nuit...)
- Pour détecter les ondes gravitationnelles, il ne suffit pas de brancher le détecteur et étudier ce qui en sort !

FAIBLE RAPPORT SIGNAL / BRUIT

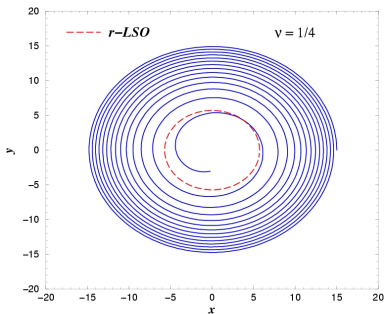
- Même avec les sources les plus puissantes, on attend $h \lesssim 10^{-21}$
- Cela revient à mesurer la taille d'un atome sur la distance Terre-Soleil !!

- ⇒ Avec la meilleure technologie actuelle, voire à venir, il faut :
- effectuer une analyse des données très sophistiquée
 - **ET** avoir une idée à l'avance des signaux recherchés : avoir une bonne modélisation des sources.

MODÉLISATION ANALYTIQUE

Pour (par exemple) le calcul de l'évolution orbitale des systèmes binaires d'astres compacts :

- les astres sont modélisés par des masses ponctuelles
- développement en puissances de v/c (post-Newtonien) près de la source
- raccord avec un développement en puissances de G (post-Minkowskien) dans la zone d'onde, loin de la source
- itérations en utilisant les équations d'Einstein



⇒ non valide pour des sources à des vitesses proches de c et pour des distances entre les astres comparables à leur rayon

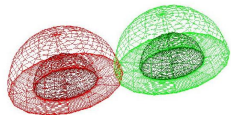
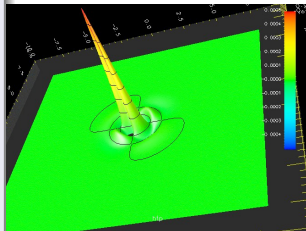
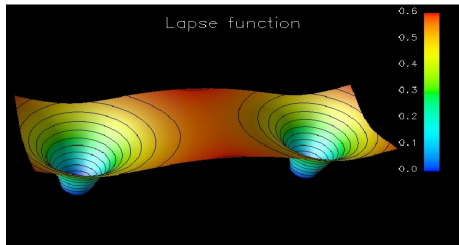
MODÉLISATION NUMÉRIQUE

ÉQUIPE DE RELATIVITÉ NUMÉRIQUE À L'OBSERVATOIRE

MODÈLE

- système de 10 équations (couplées) aux dérivées partielles du second ordre, non-linéaires et dépendant de (t, r, θ, φ) ;
- système hydrodynamique + conservation des particules (5 EDP) ;
- une équation d'état.

⇒ utilisation des **méthodes spectrales**.



LES COURBES DE SENSIBILITÉ DES INSTRUMENTS

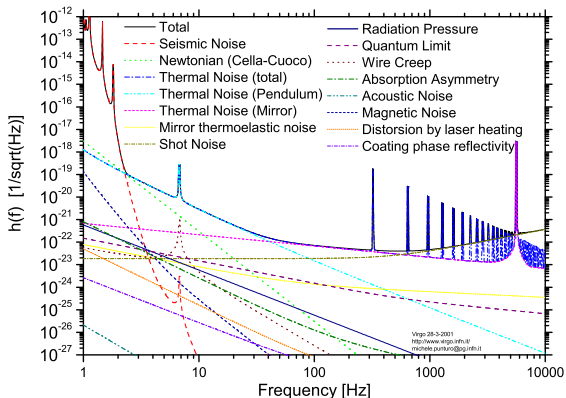
- Onde gravitationnelle **monochromatique** d'amplitude h_0
- Détecteur, caractérisé par une **densité spectrale de bruit** $B_h(f)$, prenant des données pendant un temps $\tau = 1/\Delta f$.
- Par analyse de Fourier de la sortie du détecteur (bande passante Δf), le rapport signal / bruit est :

$$\frac{S}{N} = \frac{h_0}{\left(\int_{\Delta f} B_h(f) df\right)^{1/2}} \simeq \frac{h_0}{\sqrt{B_h(f)\Delta f}}$$

- On utilise $h(f) = \sqrt{B_h(f)}$ pour caractériser la sensibilité d'un détecteur (unités $\text{Hz}^{-1/2}$)
- somme de tous les “bruits” de l'instrument, supposés s'ajouter de manière incohérente
- Contrairement à l'électromagnétisme, on cherche à détecter **l'amplitude** du champ (et non l'énergie).

LES COURBES DE SENSIBILITÉ DES INSTRUMENTS

EXEMPLE : COURBE THÉORIQUE DE VIRGO



l'amplitude des ondes varie comme $1/D_{\text{source}}$
 \Rightarrow amélioration d'un facteur 2 de la sensibilité = 2^3 fois plus de sources !

FILTRAGE ADAPTÉ

- Idéalement, afin de maximiser le rapport signal / bruit, il faut appliquer un ensemble de **filtres adaptés** :
- pour chaque modèle théorique $h^{\text{th}}(t)$ on effectue le produit de convolution avec la sortie du détecteur $h^{\text{out}}(t)$

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h^{\text{out}}(u)h^{\text{th}}(t - u)du$$

- si $S(t)$ dépasse un certain seuil, on dit qu'il y a détection.

TROP DE PARAMÈTRES . . .

Même en ne considérant que les cas de binaires de trous noirs :

- les deux degrés de polarisation, la direction de la source,
- les masses des deux objets, leurs moments cinétiques,
- l'excentricité de l'orbite. . .

⇒ utilisation de méthodes plus robustes (excès d'énergie, . . .

Les détecteurs

LES DIFFÉRENTS TYPES

Il existe deux types de détecteurs d'ondes gravitationnelles :

- Les **barres résonnantes** : Masses résonnantes d'alliages à base d'aluminium, refroidies par cryogénie à $\sim 1\text{K}$. Cinq ont fonctionné jusqu'à récemment : EXPLORER, AURIGA, NAUTILUS (Italie); ALLEGRO (États-Unis) et NIOBE (Australie). La bande passante est très étroite ($\sim 1\text{ Hz}$) autour de ($\sim 1\text{ kHz}$).
- Les **interféromètres LASER** : la distance entre deux miroirs suspendus est mesurée avec précision par un LASER. Plusieurs ont été construits : TAMA (Japon), GEO (Allemagne), LIGO (États-Unis) et Virgo (Italie). Ce principe sert aussi pour le projet spatial LISA.

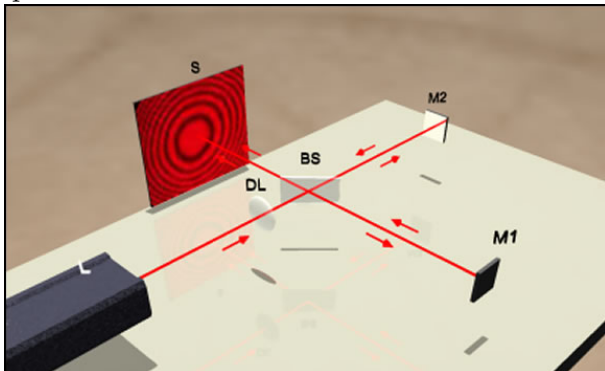
Il y a surtout deux bandes de fréquences pour les OG :

- les hautes fréquences : $10\text{ Hz} \rightarrow 10\text{ kHz}$,
- les basses fréquences : $10^{-3} \rightarrow 1\text{ Hz}$

Ces dernières sont inobservables sur Terre à cause du bruit sismique.

LES INTERFÉROMÈTRES AU SOL

Le principe est celui d'un interféromètre de Michelson



- mesure par LASER des déplacements des deux miroirs, grâce au déplacement des franges d'interférence.
- ...mais les bras font ici entre 300 m et 4 km ! (suivant modèle)
- + problèmes liés aux vibrations de l'écorce terrestre

TAMA

Détecteur japonais dont les bras font 300 m de long.
Premier “gros” détecteur à fonctionner (1999).

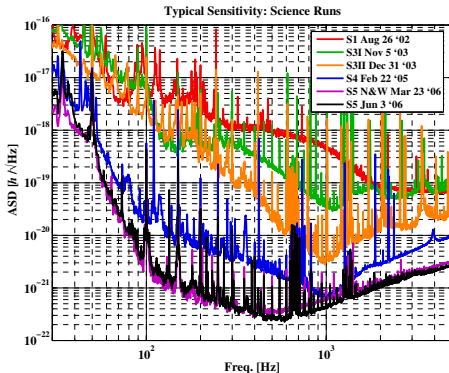


⇒ il a permis de montrer que “c’était possible” : la sensibilité annoncée à été obtenue pour la première fois sur un interféromètre de cette taille !

GEO

Projet Germano-Britannique ; avec des bras de 600 m de long

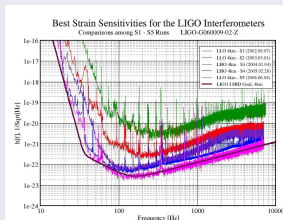
Situé près de Hanovre, en Allemagne, il a débuté ses acquisitions en 2002.



Il sert surtout de “laboratoire R& D” pour LIGO, auquel il est intimement associé.

- les deux plus gros détecteurs (4 km),
- en mode d'acquisition "scientifique" depuis 2002,
- à plein régime depuis juin 2006.

SENSIBILITÉ MAXI. ATTEINTE !



LIGO : USA, LOUISIANE

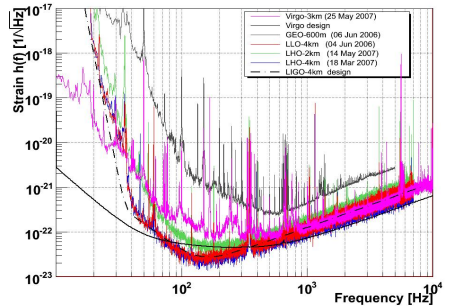


LIGO : USA, WASHINGTON



VIRGO

PROJET FRANCO-ITALIEN DE 3 KM, PRÈS DE PISE



- instrument commun CNRS / INFN
- suspensions perfectionnées pour une meilleure sensibilité à basses fréquences.



Études récentes et à venir

LES DONNÉES DE LIGO

5 séries d'acquisitions scientifiques (S1-S5) :

- S1 d'août à septembre 2002, avec TAMA et GEO,
- S2 février-avril 2003, avec TAMA,
- S3 novembre-décembre 2003, avec TAMA et GEO,
- S4 février-mars 2005
- S5 de novembre 2005 à octobre 2007, rejoint en mai 2007 par Virgo.

Problèmes : TAMA et GEO sont “trop petits” pour avoir une sensibilité intéressante. Virgo n'est pas encore à son optimum et est arrivé tard.

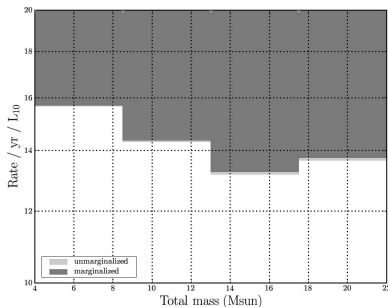
La **LIGO Scientific Collaboration** regroupe de nombreux scientifiques en charge d'analyser les données.

⇒ les résultats S3 et S4 sont encore en cours d'étude. Les données de S5 ont à peine commencé à être dépouillées

RECHERCHES DE BINAIRES

Rapport du 28 janvier 2008, sur le dépouillement et l'étude des données de S3, en ce qui concerne la phase finale de coalescence des binaires d'étoiles à neutrons, de trous noirs ou mixtes.

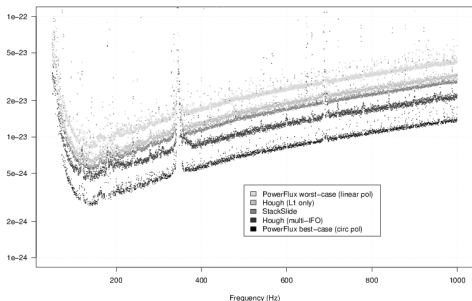
- analyse de 788 heures de données uniquement sur les trois détecteurs LIGO,
 - recherche de signaux provenant de binaires, à l'aide d'une base de modèles d'ondes synthétisés, prenant en compte la rotation sur eux-mêmes des astres.
-
- aucun signal ne dépasse le seuil \Rightarrow pas de détection !
 - sondage de notre Galaxie entière, ainsi que des parties de M31 et M33
 - limites sur le taux de tels événements dans ces galaxies proches de nous.



SOURCES PÉRIODIQUES

Une recherche approfondie de signaux presque périodiques a été réalisée sur les données de S4 et publiée en 2008.

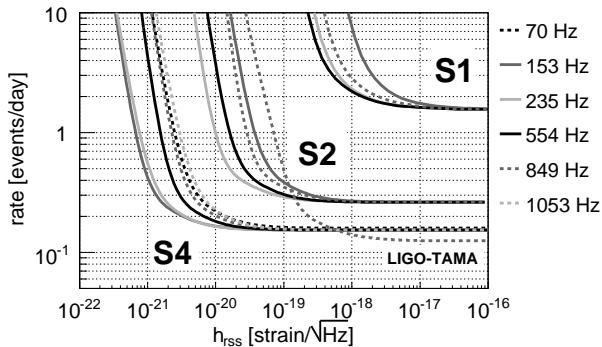
- Dans la gamme de fréquences 50 – 1000 Hz, avec une décélération entre 0 et 10^{-8} Hz/s,
- les candidats sont des pulsars, ou étoiles à neutrons (déformées) en rotation, les modèles d'ondes synthétisés sont des fonctions “périodiques”,
- analyse de 708 h provenant des trois interféromètres LIGO.



- pas de détection,
- limites supérieures sur ces ondes de quelques 10^{-24} ,
- l'étoile à neutrons la plus proche connue (à 110-170 pc) serait détectée, si elle tournait plus vite.

LES SIGNAUX DE TYPE EXPLOSIF

De la même manière sur les données S4, avec celles de TAMA et GEO, les signaux de type “explosion” ont été recherchés.



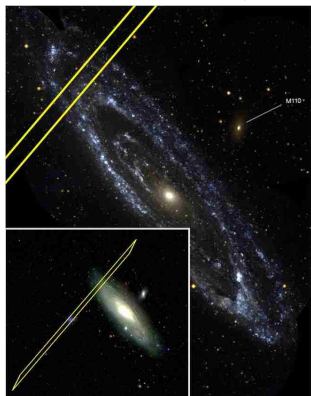
● pas de détection, (pas trop étonnant : les *supernovæ* sont supposées peu efficaces),

- sur S4, LIGO+TAMA auraient donc “vu” des signaux de *supernovæ* jusqu’à ~ 200 pc (petite partie de notre Galaxie).

UN SURSAUT γ DANS M31

Le 1^{er} février 2007, un sursaut γ a été détecté dans la galaxie Andromède (M31). Les sources possibles sont :

- une coalescence de binaire d'étoiles à neutrons ou étoile à neutrons / trou noir,
- Un événement catastrophique sur une étoile à neutrons très magnétisée (**magnetar**).



- Les détecteurs de LIGO étaient en pleine acquisition S5,
- dans le cas d'une binaire coalescente dans Andromède, le signal gravitationnel aurait été vu à plus de 99% de certitude,
- Dans le cas d'un magnetar (SGR), l'énergie gravitationnelle émise aurait été inférieure à $4 \times 10^{-4} M_{\text{soleil}} c^2$, compatible avec ce modèle.

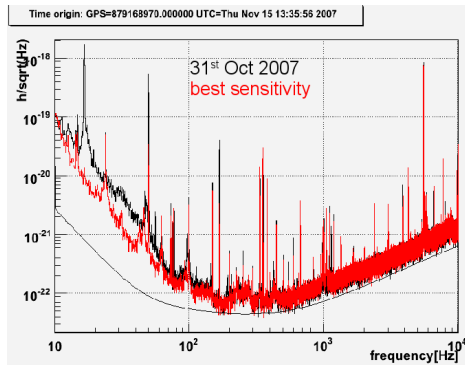
DES RÉGLAGES À FAIRE ...

LIGO : encore quelques problèmes de bruit sismique en Louisiane et amélioration du détecteur de sortie d'interféromètre.

Virgo :

- **best sensitivity** au début janvier 2008
- recherche de sources de bruits : asservissement, bruit acoustique (suspensions), aimants de contrôle, ...
- mai 2008 : changement du LASER (8W → 50W), revêtement des miroirs et électronique de contrôle.

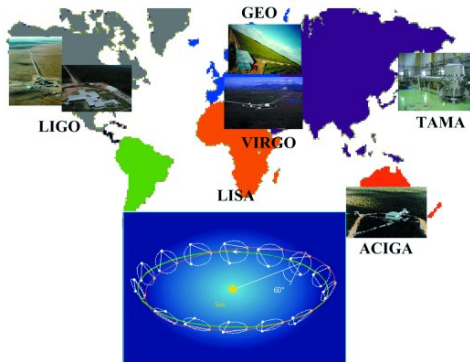
⇒ acquisition S6 en commun entre Virgo et LIGO mi-2009 pour un an, puis améliorations plus importantes.



VERS UN RÉSEAU DE DÉTECTEURS

Pour toute détection, le rapport signal / bruit sera faible

- Seules des détections coïncidentes pourront convaincre la communauté
- Tous les instruments ont une chaîne d'analyse des données commune



⇒ ce réseau de détecteurs

aura une bonne couverture du ciel et plusieurs détections simultanées seront une preuve définitive.

CONCLUSIONS

- Les détecteurs sont construits, et acquièrent des données,
- L'analyse est difficile, mais elle a déjà apporté des résultats (négatifs!),
- L'acquisition S5 est encore à analyser, et c'est de loin la meilleure (participation de Virgo),
- LIGO, Virgo et GEO seront prochainement améliorés,
- TAMA va devenir LCGT (C pour cryogénie) avec une technologie révolutionnaire,
- besoin d'un détecteur en Australie (ACIGA)...
- ...et d'un détecteur dans l'espace : **LISA**

⇒ si avec ça, on ne détecte rien, il faudra retourner à la théorie de la Relativité Générale!