

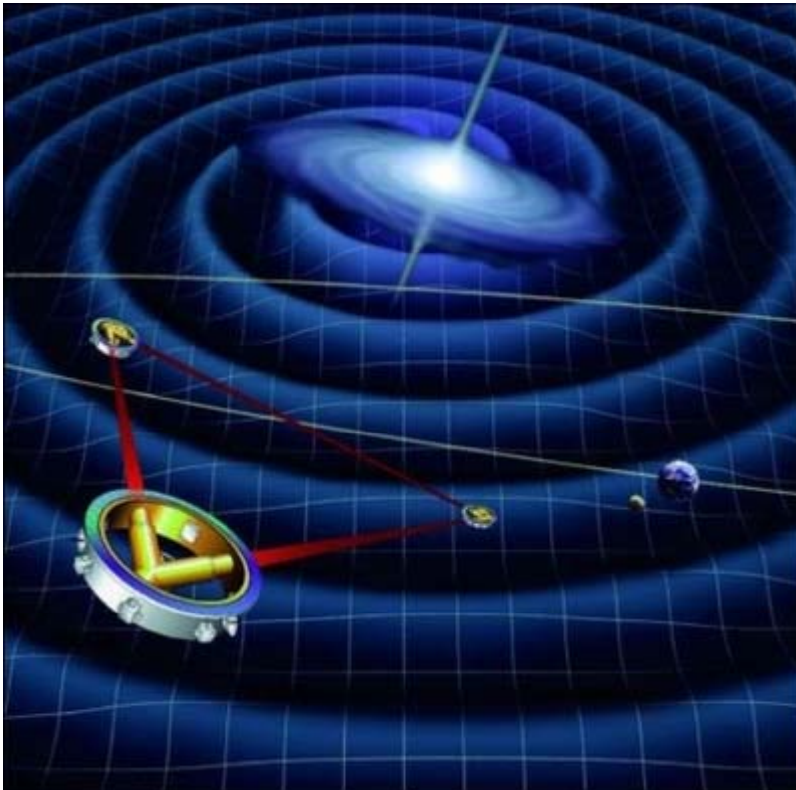


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Diagnosics observationnels, perspectives

Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

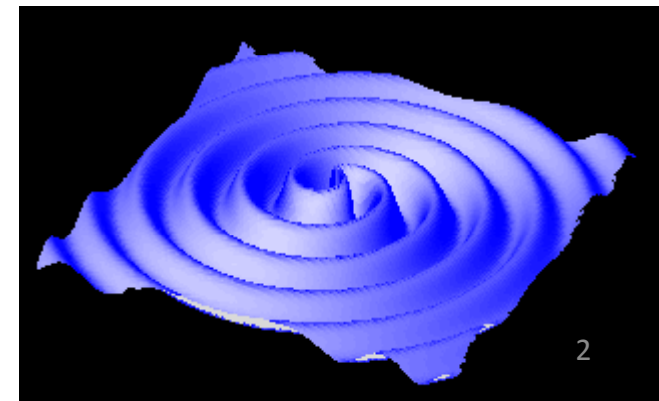
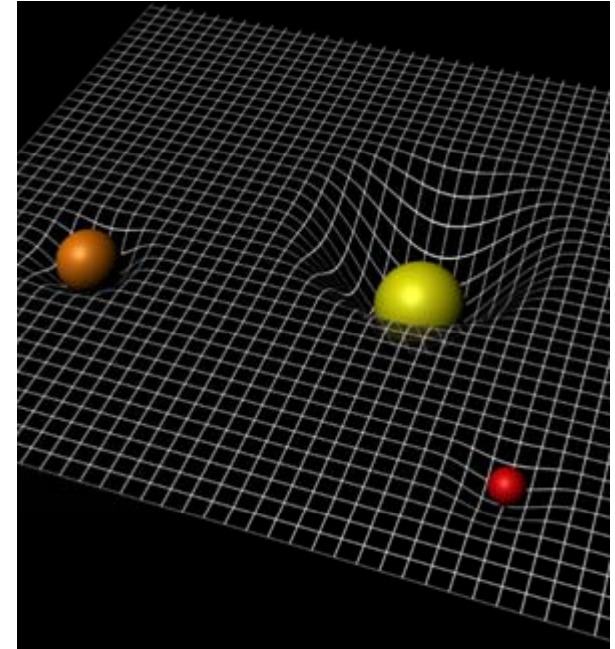
Origine des ondes gravitationnelles

Toute masse courbe l'espace

Les ondes gravitationnelles sont des rides de l'espace-temps

Lorsqu'une masse est en mouvement rapide, elle génère des fluctuations de la courbure, qui se propagent à la vitesse de la lumière

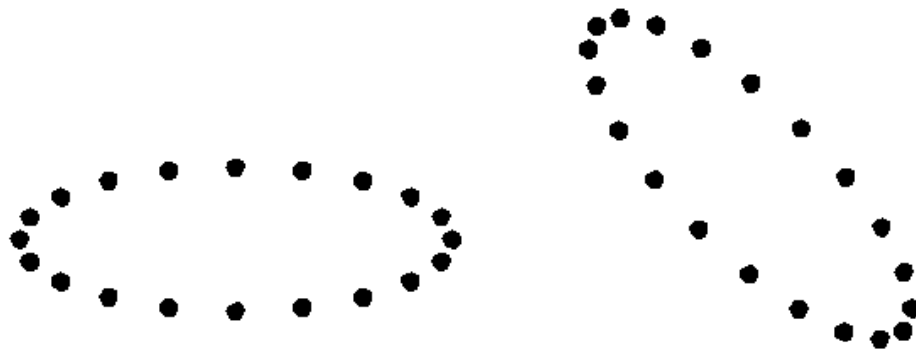
Le passage de l'onde déforme l'espace, qui est comprimé ou étiré successivement



Polarisation des ondes gravitationnelles

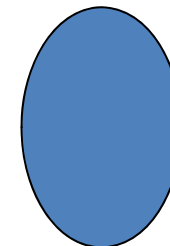
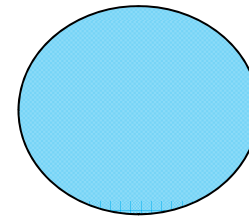
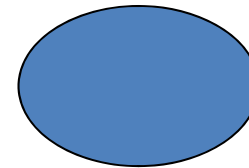
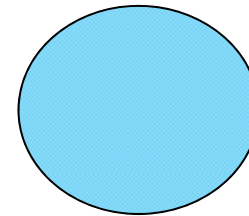
2 polarisations + et x
Rayonnement provient du quadrupole (polar identiques, rotation de 45°)

La propagation des ondes est perpendiculaire au plan du tableau

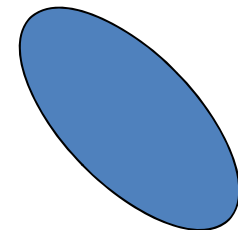
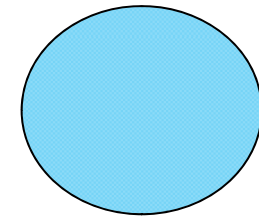
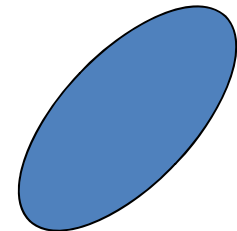
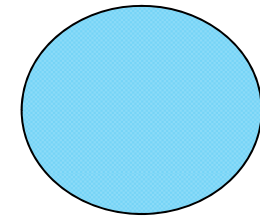


Mouvement d'un cercle de masses

Polar +



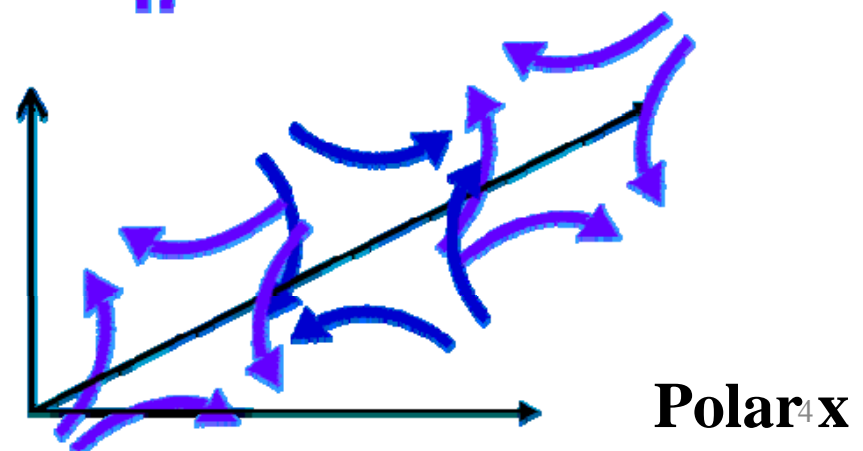
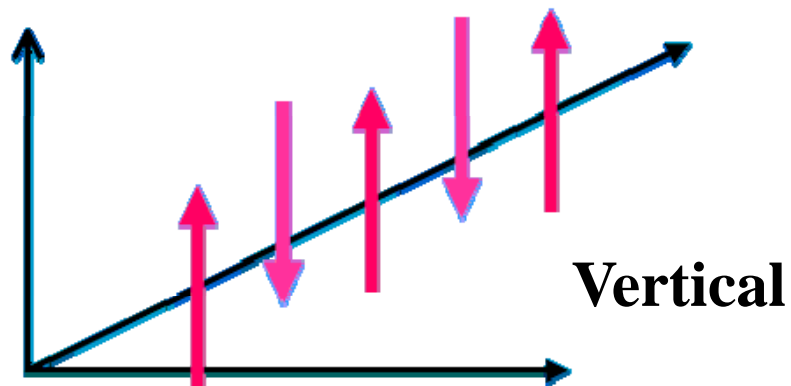
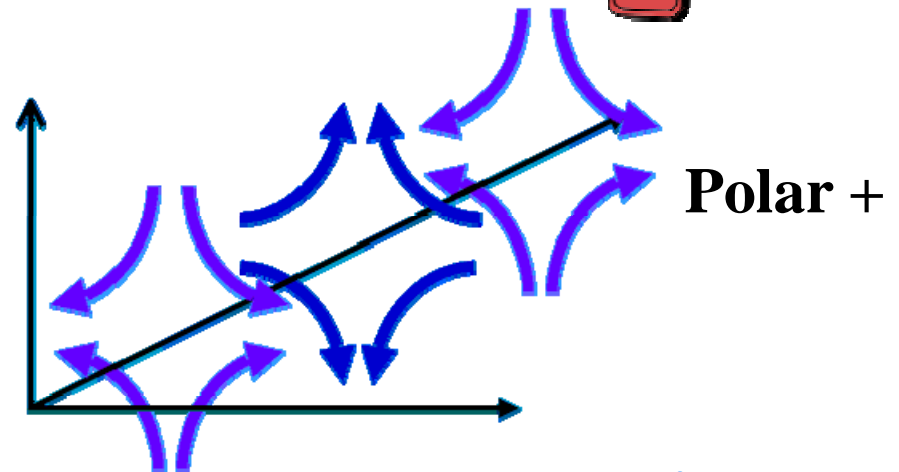
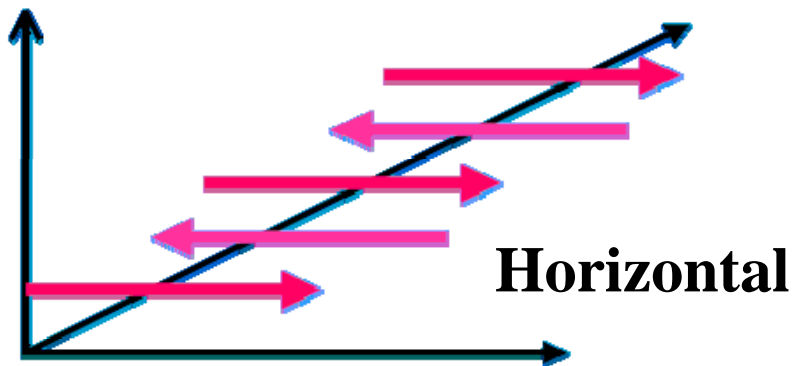
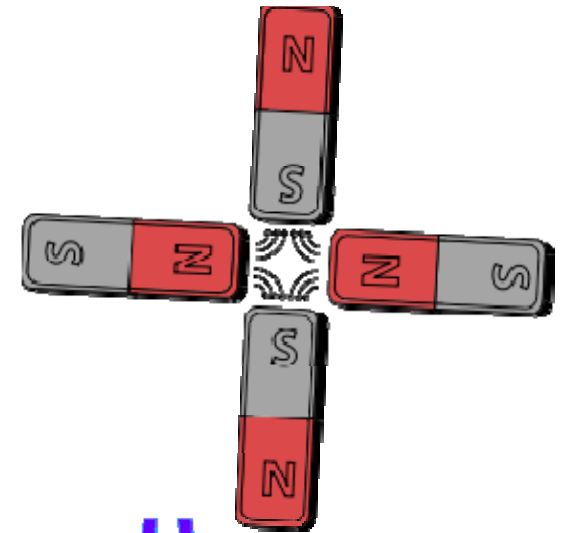
Polar x



2 degrés de liberté

Champ Quadrupolaire

- Ondes électromagnétiques: **dipôle oscillant**
- Ondes gravit: variation d'un **quadrupole**
(pas de masse négative)

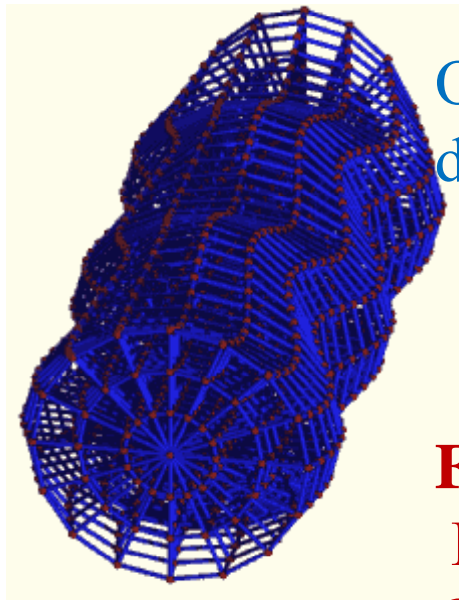


Propagation

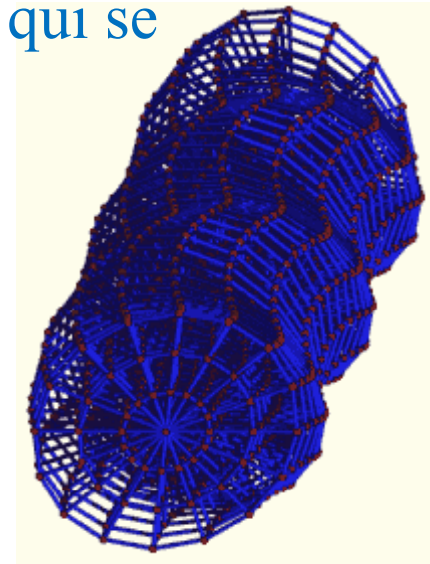
Polar +

Polar x

EM se propagent dans l'espace



Onde gravit: c'est l'espace qui se déforme



Fréquences

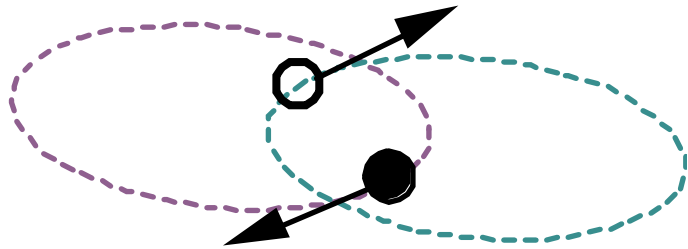
EM 10^7 - 10^{20} Hz

Gravit: 10^{-9} – 10^4 Hz

Les ondes existent!

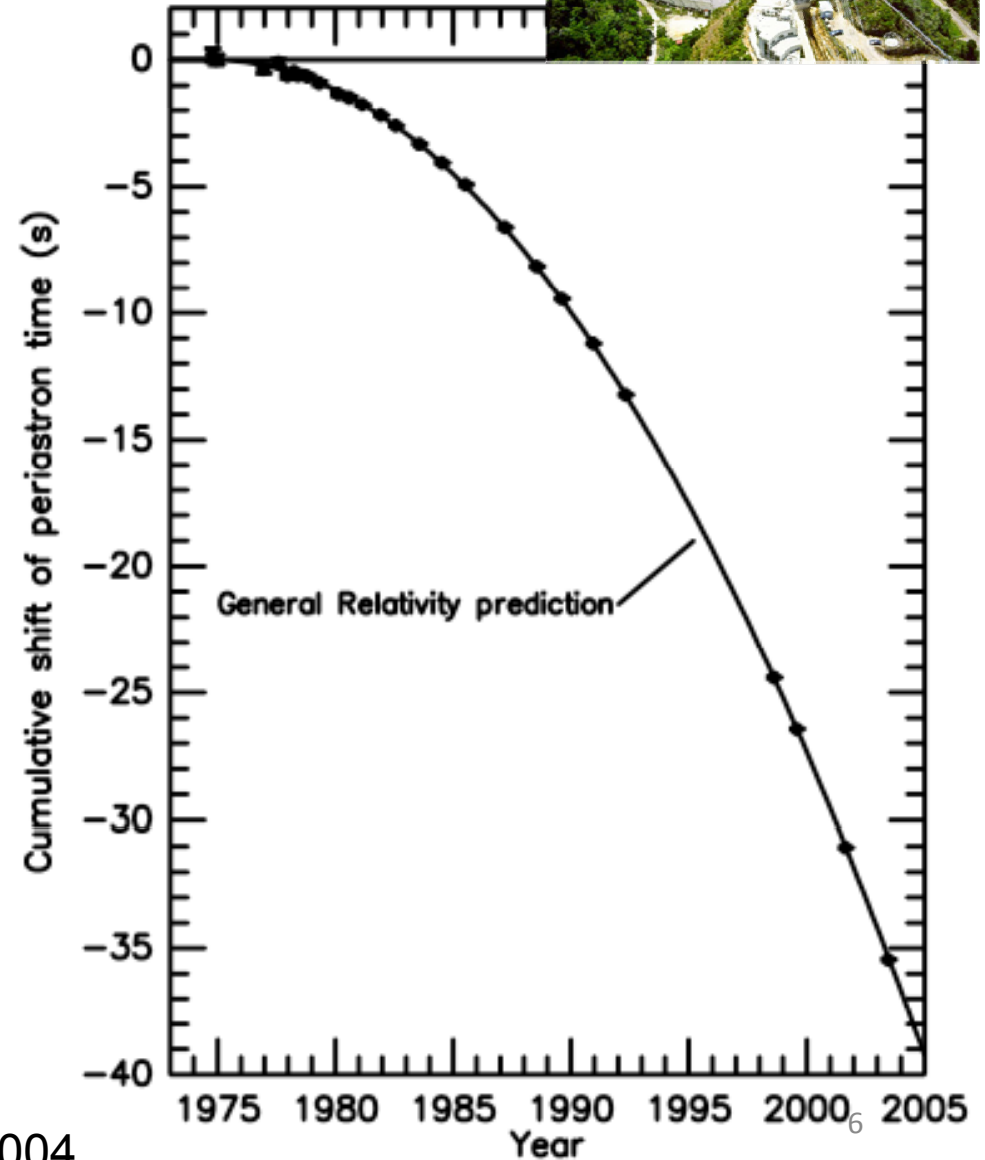
Découverte indirecte par
Hulse & Taylor 1975
(Prix Nobel 1993)

Pulsar PSR1913+16
Pulse 59ms
Orbite 8heures (4s)
2ème étoile invisible (à neutrons)



Faible flux: 1mJy à 21cm

Weisberg & Taylor 2004



Relativité Générale vérifiée avec grande précision

Temps d'arrivée des pulses à 13 μs près, masses 1.4 M_{\odot} à 10⁻⁴ près
 Redshift gravitationnel, variation de la période P_b , etc..

$$\dot{P}_{b,GR} = -\frac{192 \pi G^{5/3}}{5 c^5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} (1 - e^2)^{-7/2} \times$$

$$\left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) m_p m_c (m_p + m_c)^{-1/3}.$$

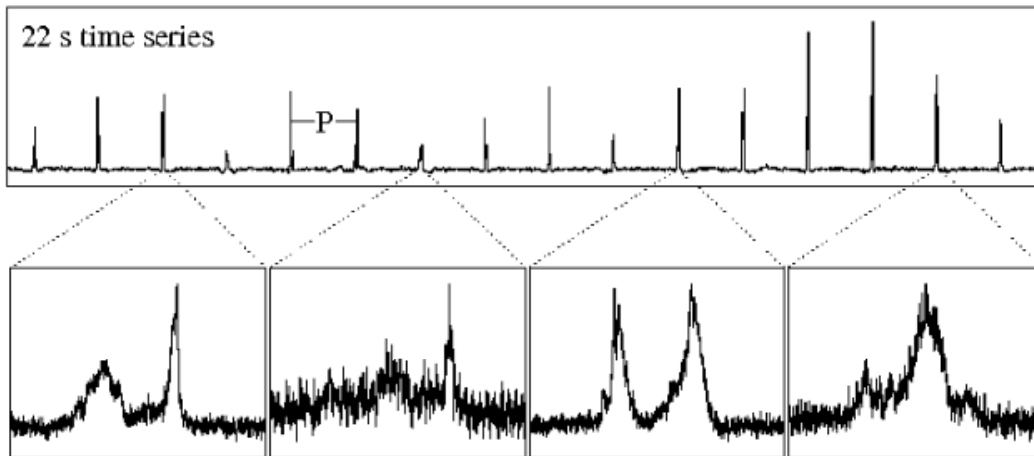
Measured Orbital Parameters for B1913+16 System

Dans la formule, le plus imprécis est la valeur de G!

Fitted Parameter	Value
$a_p \sin i$ (s)	2.3417725 (8)
e	0.6171338 (4)
T_0 (MJD)	52144.90097844 (5)
P_b (d)	0.322997448930 (4)
ω_0 (deg)	292.54487 (8)
$\langle \dot{\omega} \rangle$ (deg/yr)	4.226595 (5)
γ (s)	0.0042919 (8)
\dot{P}_b (10^{-12} s/s)...	-2.4184 (9)

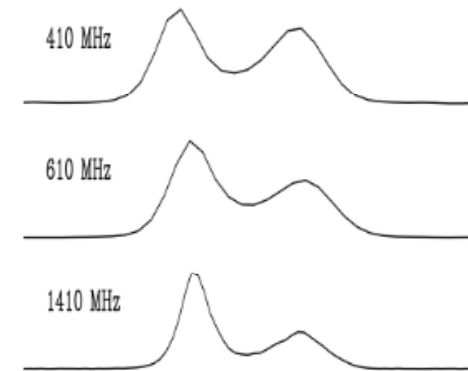
Avance du péri-astre
 Dilation du temps

Pulsars: temps d'arrivée

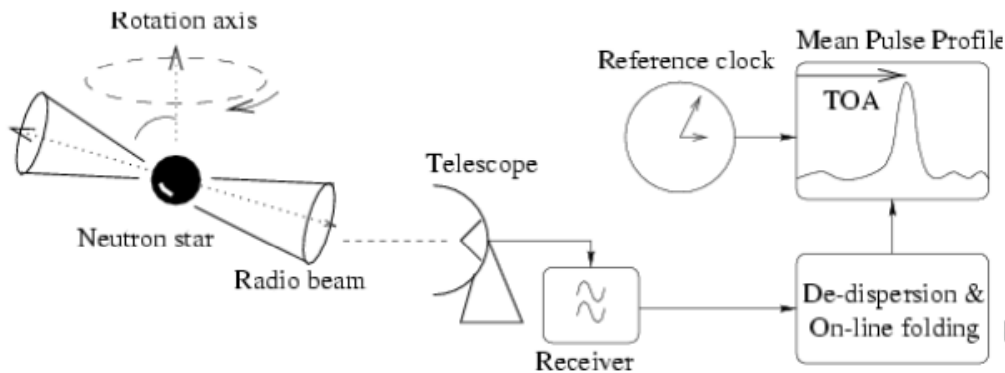


individual pulses

> 1000s
of
pulses
→



mean profile



From Lorimer & Kramer, *Handbook of Pulsar Astronomy*

Binaires, et ondes gravitationnelles
9 double NS
1 double pulsar
~100 pulsars binaires

Physique de l'accrétion WD, NS and BH: physique de la matière condensée avec fort champ magnétique B. Haute sensibilité

Nature des pulsars

Pulsars: étoiles à neutrons, rotation rapide

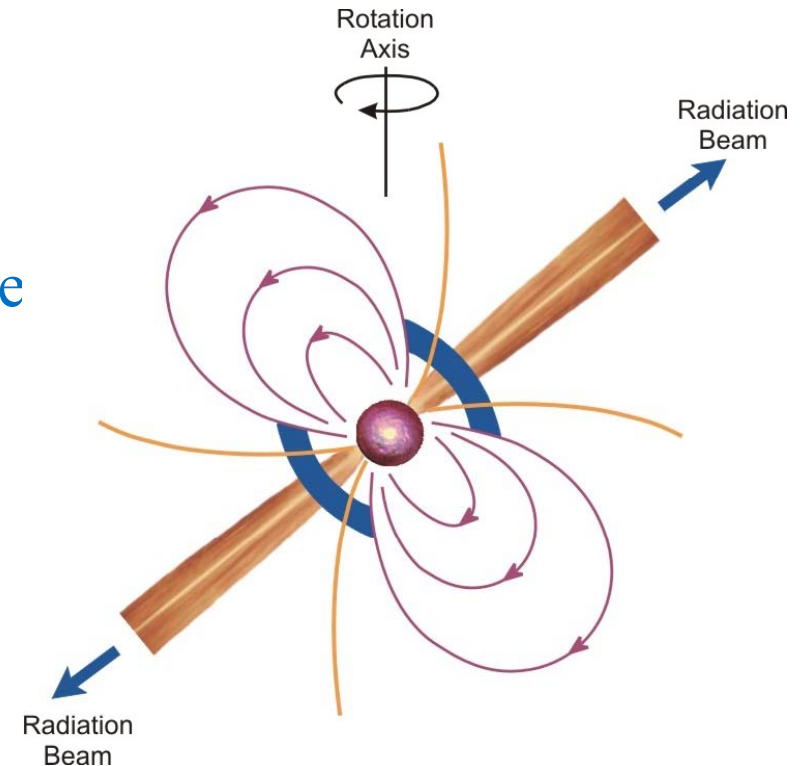
Découverte par Bell & Hewish (1968)

Taille $\sim 10\text{km}$, Masse $\sim 1-2 M_{\odot}$,

Densité centrale > noyaux! (10^{15}g/cm^3)

Gravité à la surface 10^{11} g ,

Champ magnétique $B=10^{12}\text{ G}$



2000 pulsars « normaux » connus

Rotation de **périodes 1sec** (Crabe 0.03), après explosion de SN

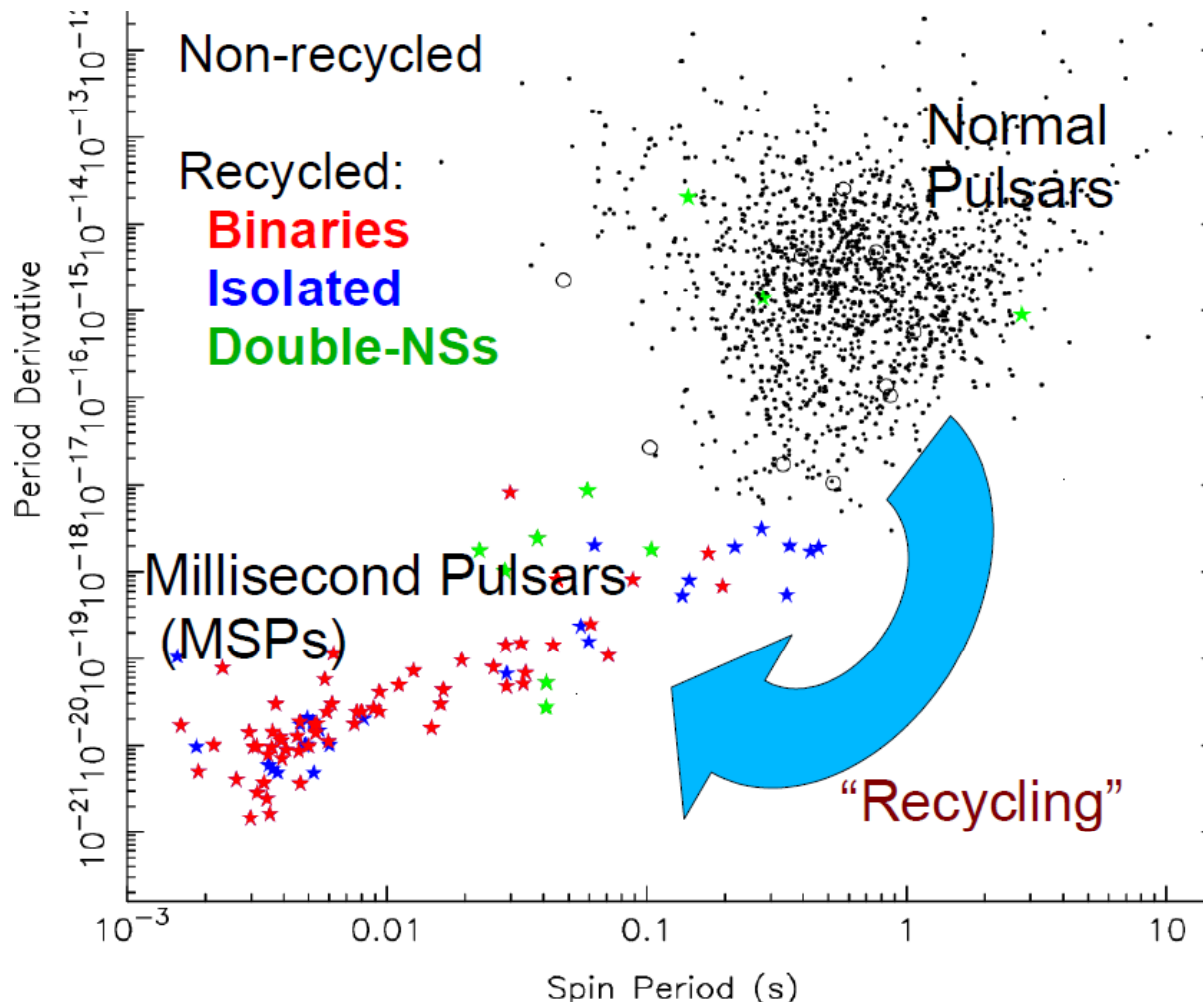
Ou de **milli-seconde (MSP)** si ré-activé, dans les binaires X

Durée de vie $\sim 100\text{Myr}$, mais **dans une binaire**, transfert de masse et moment angulaire à partir du compagnon dans sa phase géante, accélérant le pulsar. Comme B est $\sim 10^8\text{G}$, le pulsar peut vivre plusieurs Gyrs.

Minuter les pulsars

MSPs, J0437–4715, un des pulsars binaires les mieux étudiés, a $P = 5.7574518624919 \text{ ms} \pm 1$ pour le dernier chiffre (13th)

Ce chiffre croît de 1 chaque 1/2h



Perte par rayonnement et vent relativiste

Les 6 premiers chiffres sont les mêmes $\sim 10^3$ yrs

Temps d'arrivée à μs pendant plusieurs années

→ 14 chiffres

Les mesures les plus précises en Astrophysique

Après un an, précision astrométrique sur la position, sur le ralentissement, et l'orbite de la **binaire (excentricité, péri-astre, période orbitale..)**

Vitesse radiale à mm/s (mieux que les 1m/s pour les exoplanètes)

Dispersion sur le temps d'arrivée due au milieu ISM $\Delta t \sim v^{-2}$

Milliers de canaux de fréquences calculés, 3GHz de bande

→ Petabytes de data (tester plusieurs dispersions pour la découverte)

Binaire par la tranche: cas de J1614-2230

Retard gravitationnel MSP derrière la naine blanche

→ Délai de Shapiro

Orbite de 8.7 jours, 30 ms retard des pulses!

Observé avec GBT-GUPPI

GPU et FPGA pour traiter le signal



Ondes gravitationnelles

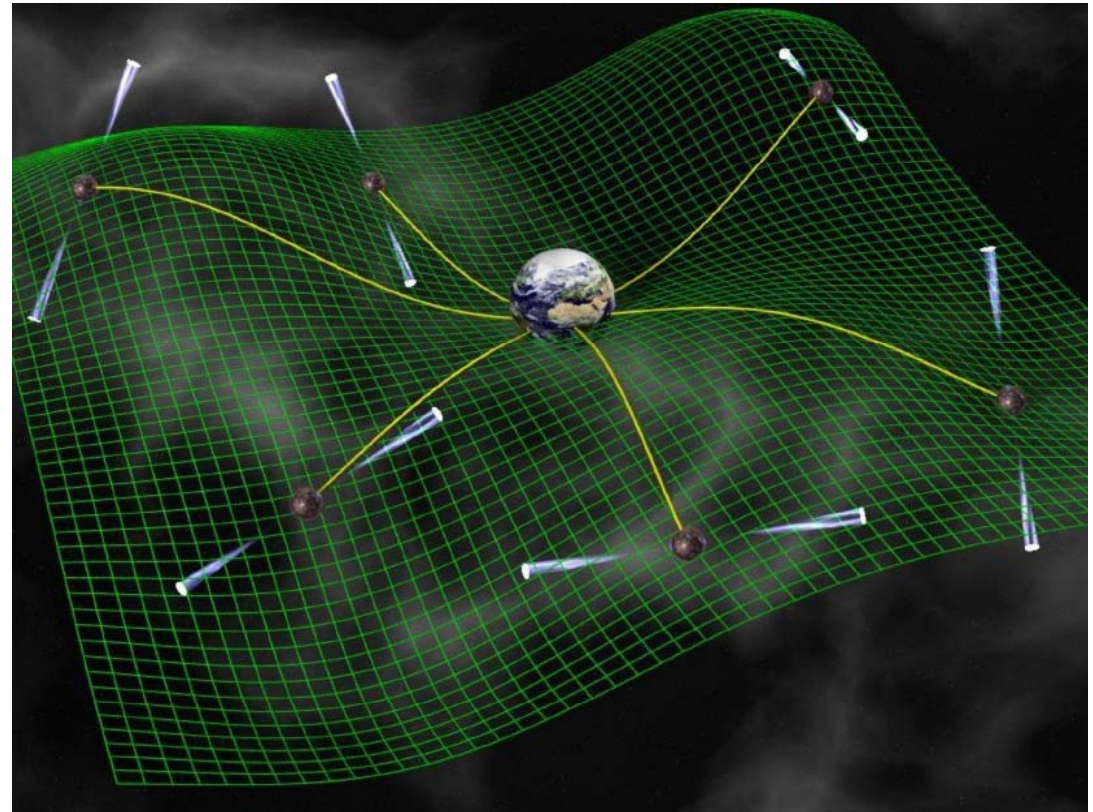
PTA: pulsar timing arrays. Suivi de plusieurs MSP

Les ondes ont des fréquences nanoHz (~ 30 année-lumière)

Corrélation entre le délai
de plusieurs pulsars
retrace les déformations de
l'espace

→ détection des ondes
gravitationnelles

GW venant de la fusion de
trous noirs proches
Auront d'autres λ



Ou bien fond dû à l'ensemble des
fusions (fond stochastique)

Tests de la Relativité Générale

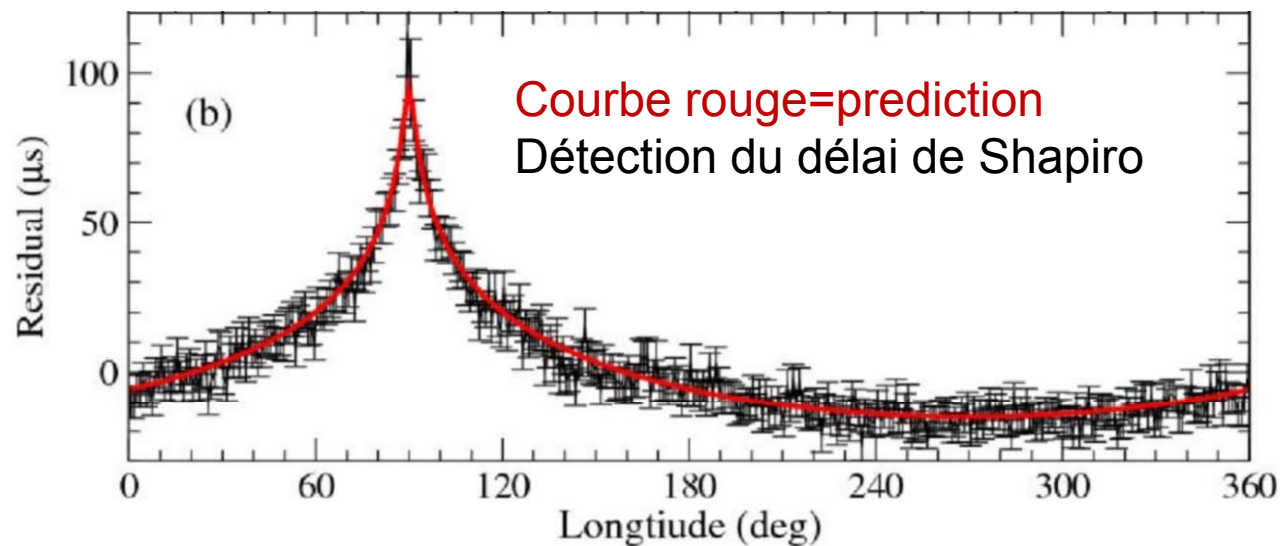
Gravité testée avec les binaires pulsar-NS, ou pulsar-BH

Vérifier la conjecture de censure cosmique: pas de singularité nue

Théorème du trou noir sans cheveux

Suivi des pulsars doubles: 0.05% test de la relativité générale en champ fort (délai gravitationnel)

Kramer et al 2006, Science PSR J0737-3039A/B



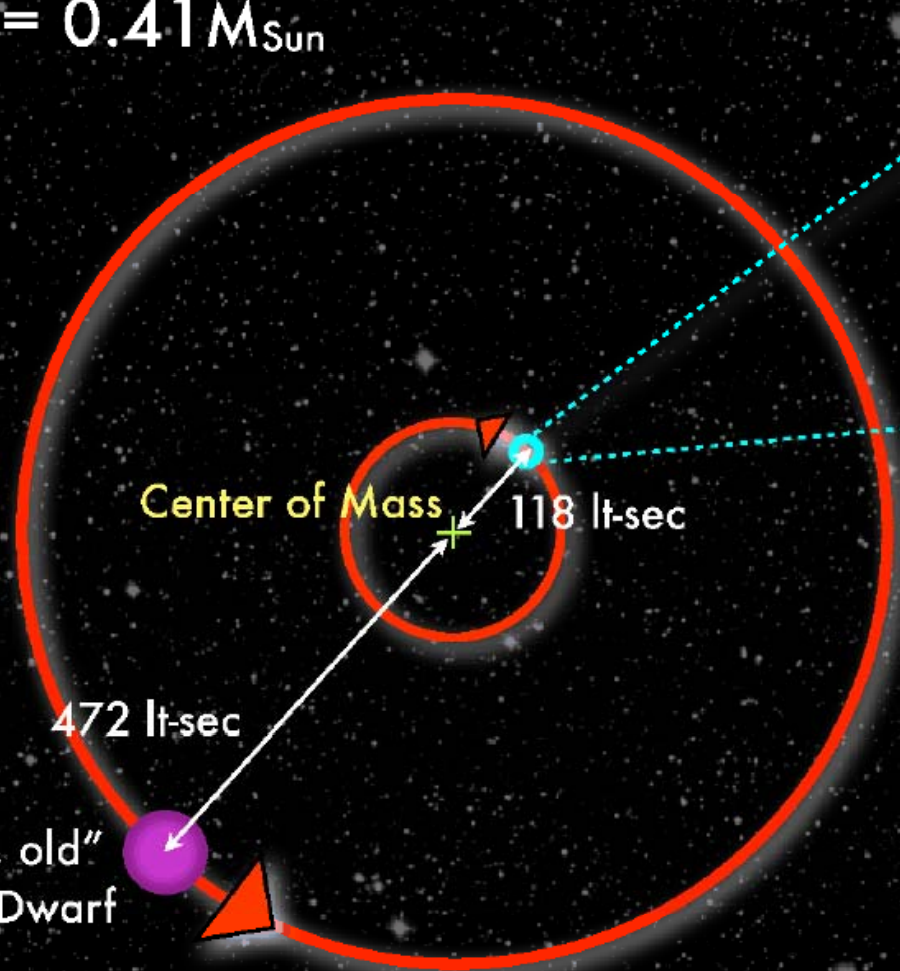
PSR J0337+1715 Triple System

Inner Orbit

$P_{\text{orb}} = 1.6 \text{ days}$
 $M_{\text{PSR}} = 1.44 M_{\text{Sun}}$
 $M_{\text{WD}} = 0.20 M_{\text{Sun}}$

Outer Orbit

$P_{\text{orb}} = 327 \text{ days}$
 $M_{\text{WD}} = 0.41 M_{\text{Sun}}$



Orbital inclinations

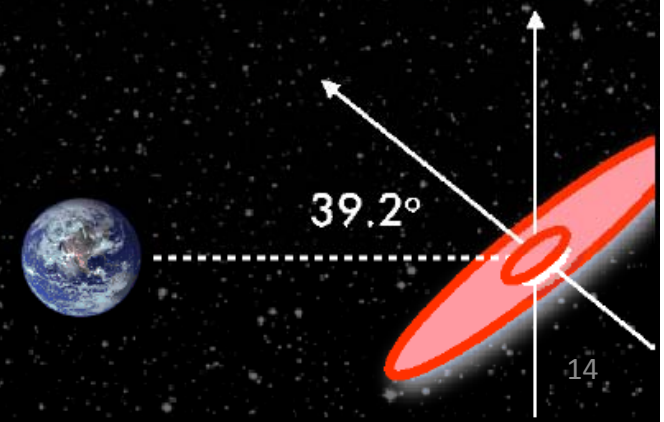


Figure credit:
Jason Hessels

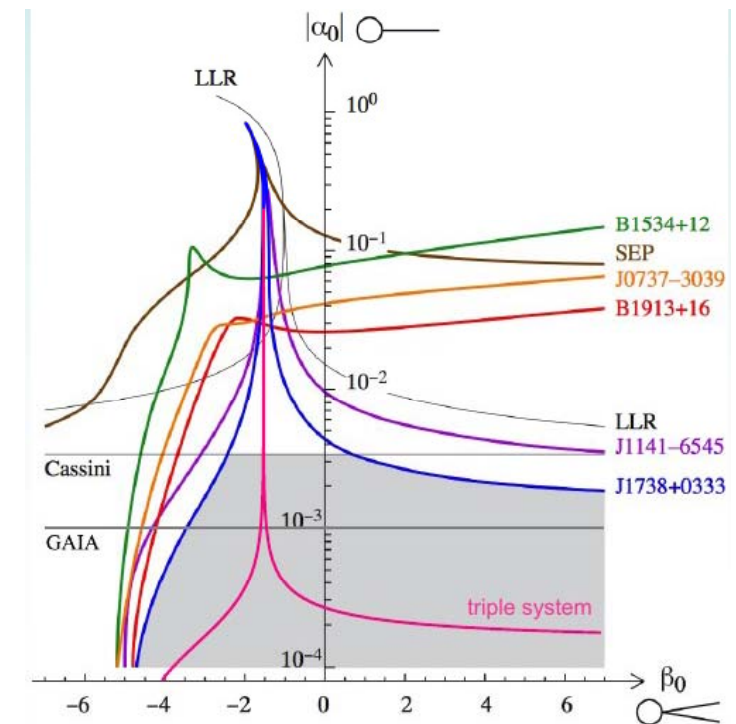
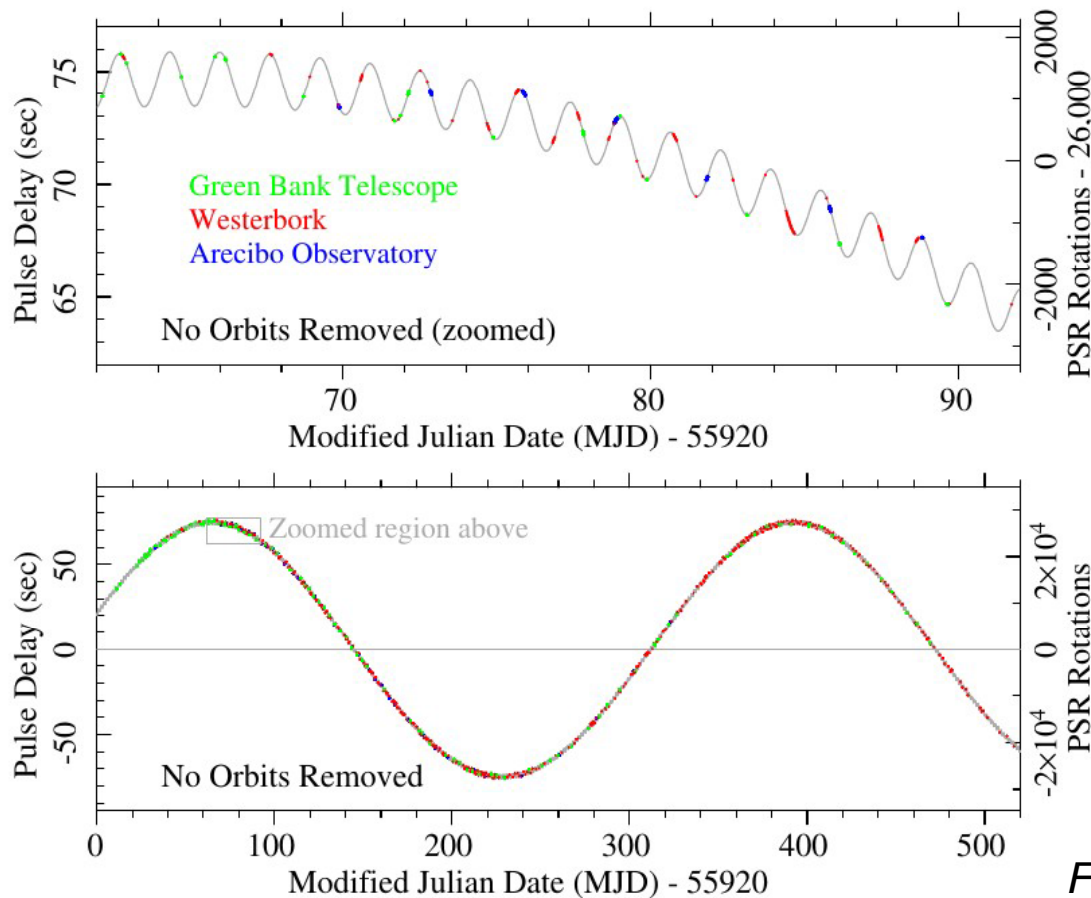
Ransom et al 2014

Données très précises du système triple

Permet de tester le **Principe d'équivalence fort**

→ vérifié en gravité champ fort

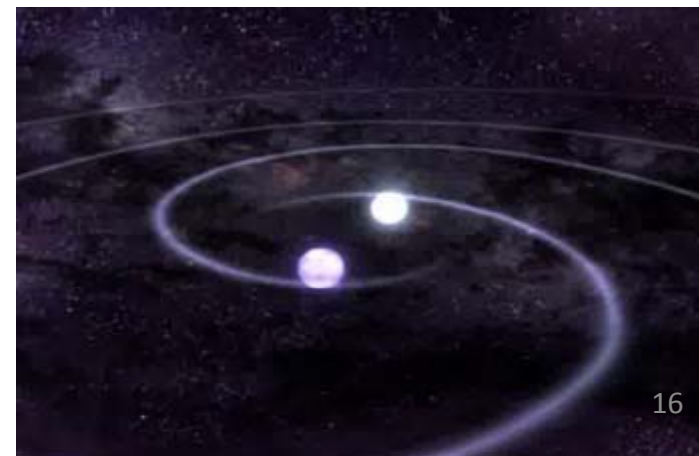
Autres théories tenseur-scalaire
GR: $\alpha_0 = \beta_0 = 0$



Freire et al 2012
Antoniadis et al 2013

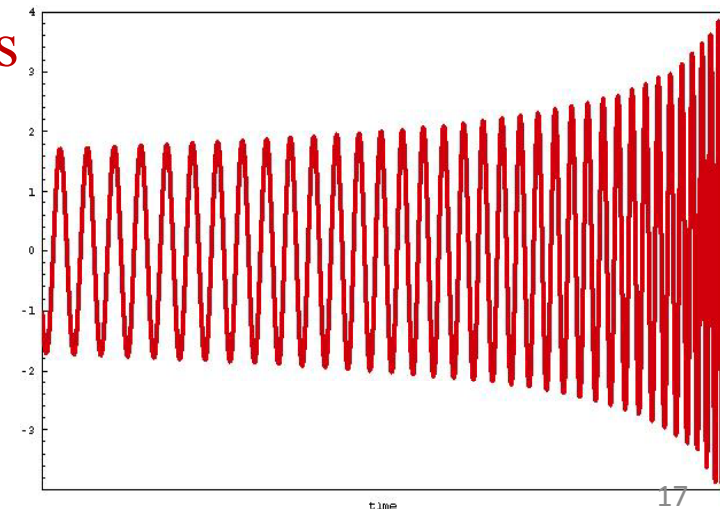
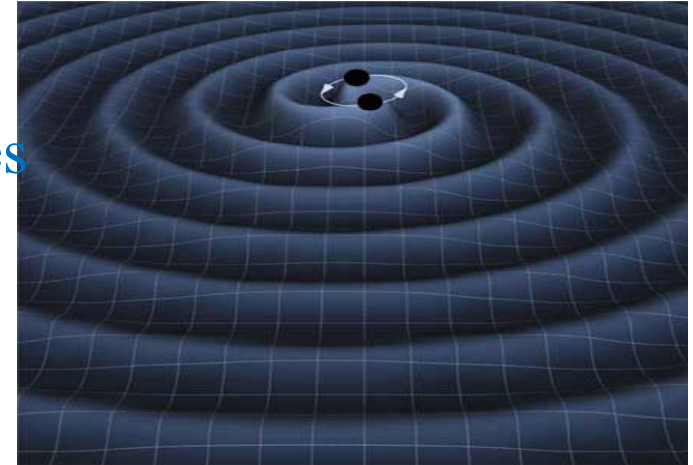
Pourquoi observer ces ondes?

- **Nouvelle fenêtre sur l'Univers:** régions qui ne peuvent pas être observées avec les ondes électromagnétiques
- Explorer la **physique des trous noirs:** masse, spin...
- Une autre façon de compter les fusions de galaxies et l'efficacité de la fusion des trous noirs super-massifs
- Un test de la **Relativité Générale, par exemple EMRI**
'Extreme Mass Ratio Inspiral'



Rayonnement de binaires d'objets compacts

- Binaires de masses stellaires très fréquentes
- Plus rares binaires compactes (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs)
- Toutes émettent des ondes gravitationnelles
- Monochromatique (fréquence = $2 \times \Omega$)
- **Binaire très serrée: perd son énergie dans les ondes gravitationnelles**
- Fréquence croissante → “chirp”
- “gazouillis d’oiseau”



Calcul de l'intensité, fréquences

- Une masse avec un moment quadrupolaire **I variable**
- Quelques hypothèses pour simplifier
 - I^{lm} variations sinusoidales avec vitesse angulaire Ω
 - Source petite en comparaison avec la longueur d'onde $\varepsilon \ll \lambda = 2\pi/\Omega$
 - Vitesses non-relativistes, $v \ll c$

Densité de masse = ρ^{00}

$$I^{lm} \equiv \int \rho x^l x^m d^3x$$

$$\bar{h}_{jk} = -2\ddot{I}_{jk}/r = -2\Omega^2 I_{jk} e^{i\Omega r} / r$$

L'amplitude chute en $1/r$ avec la distance

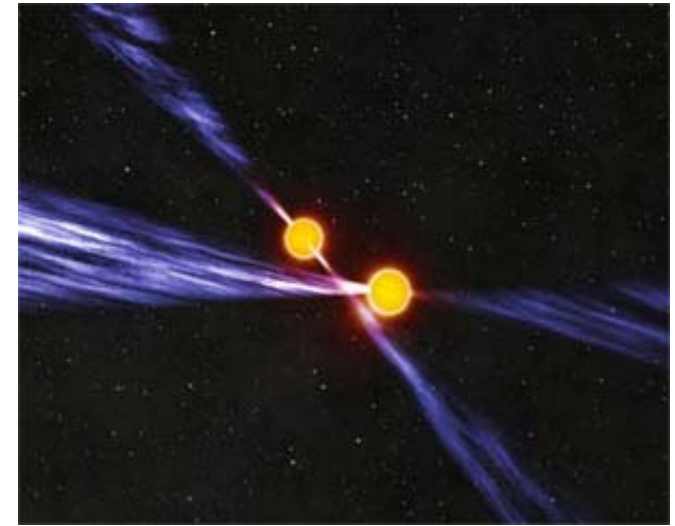
Dépend de la fréquence au carré



$$G=c=1; \quad \Delta L/L = h = G/c^4 h_{jk}$$

Amplitudes extrêmement faibles

Deux objets compacts de $1.4 M_{\odot}$ avec
une période de 1s, à une distance 10 Mpc
→ ondes d'amplitude $h \sim 10^{-22}$



$$h \sim 2GMv^2 / c^4 r$$

En laboratoire?

Deux masses de 1 tonne distantes de
10 m tournant à 10Hz,

→ fréquence 20 Hz, $h \sim 10^{-43}$ à

$r = 1.5 \times 10^7$ m (une longueur d'onde)

- Mouvements non-symétriques
 $d^2I/dt^2 \sim Mv^2$
 - v^2 composante non-symétrique de la vitesse
- La fréquence f est reliée à la variation de la source: période de rotation pour les binaires, ou spin pour des sources asymétriques

Les trois étapes de la fusion

Ringdown: 2 TN de $5M_{\odot}$

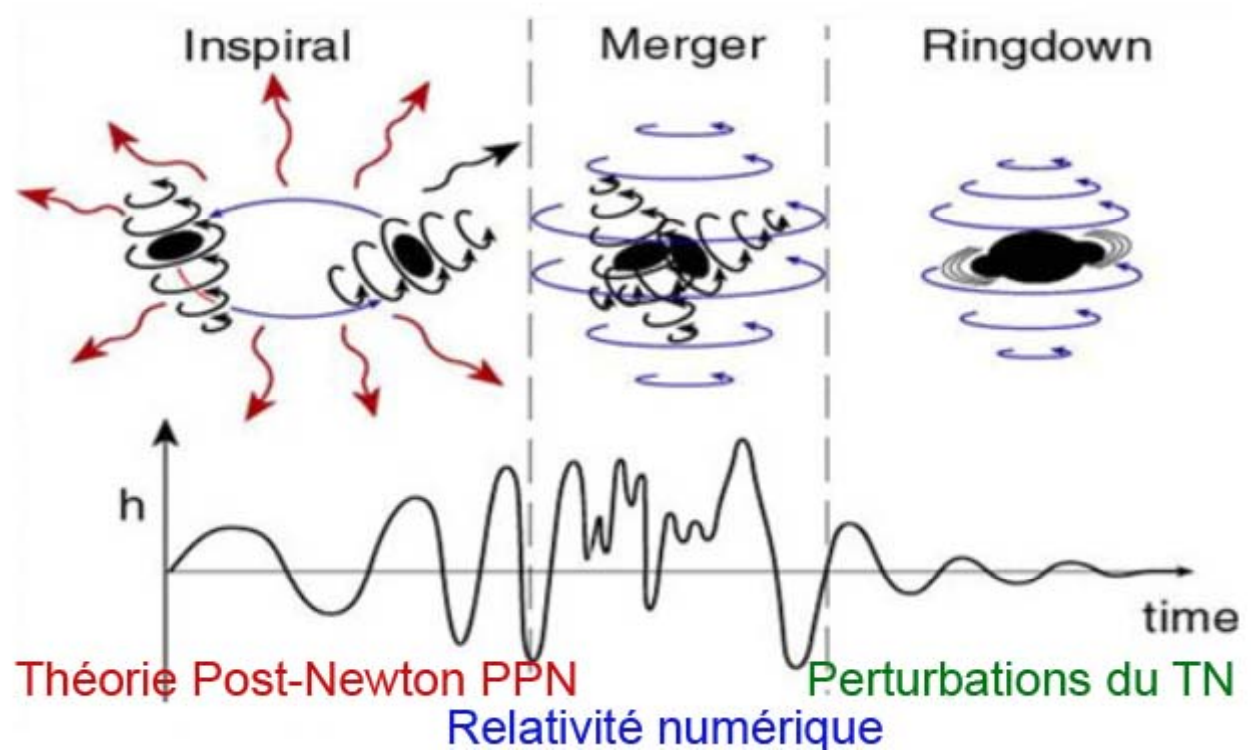
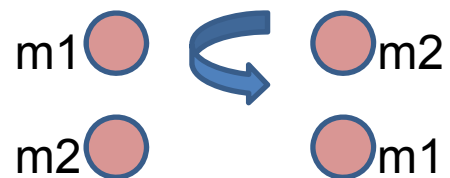
fréquence ~ 2300 Hz

Fréquence de rotation

$$\Omega = (GM/r^3)^{1/2}$$

Les ondes sont émises à 2 fois cette fréquence

$$f = 2\pi \times 2 \Omega$$



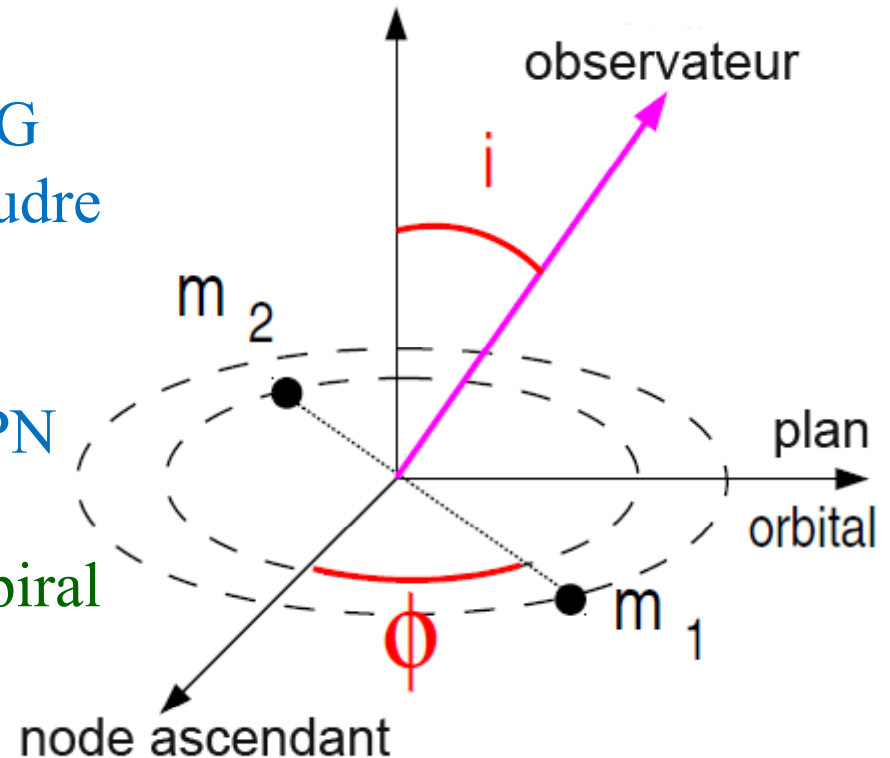
Calculs de l'orbite et du rayonnement

Le calcul à partir des équations de RG est trop complexe, et ne peut se résoudre qu'avec des approximations $O(1/c)$

→ Développement post-Newtonien PN

Cas EMRI: Extreme Mass Ratio Inspiral
théorie des perturbations

Prendre en compte la self-force
(GSF: orbite # géodésique)



μ masse réduite
 $1/\mu = 1/m_1 + 1/m_2$

$$\phi(t) = \phi_0 \underbrace{-\frac{M}{\mu} \left(\frac{GM\omega}{c^3} \right)^{-5/3}}_{\text{result of the quadrupole formalism (sufficient for the binary pulsar)}} \left\{ 1 + \underbrace{\frac{1\text{PN}}{c^2} + \frac{1.5\text{PN}}{c^3} + \dots + \frac{3\text{PN}}{c^6} + \dots}_{\text{needs to be computed with 3PN precision at least}} \right\}$$

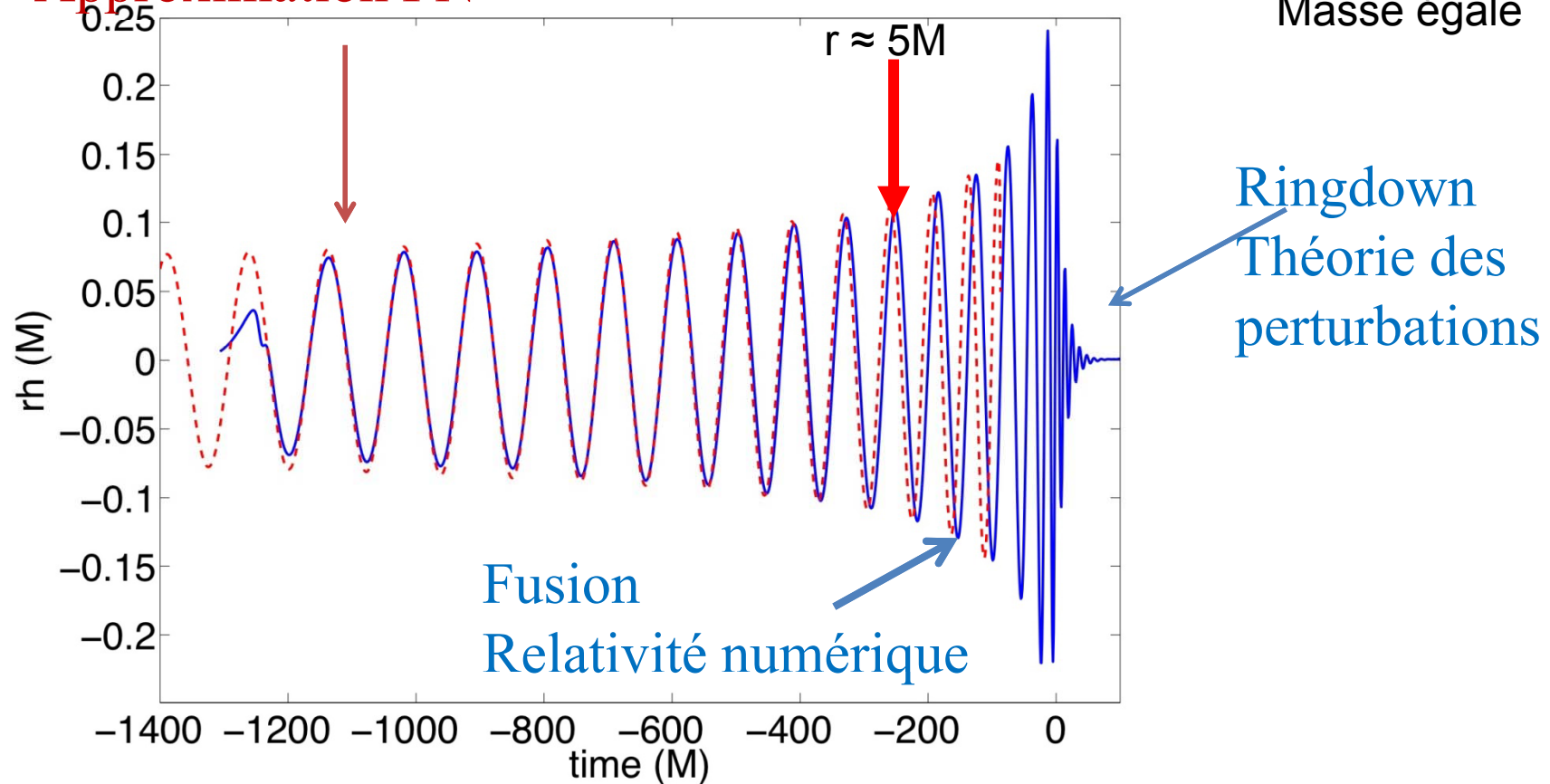
Comparaison relativité numérique et 3PN

Inspiring

Approximation PN

Dernière orbite stable

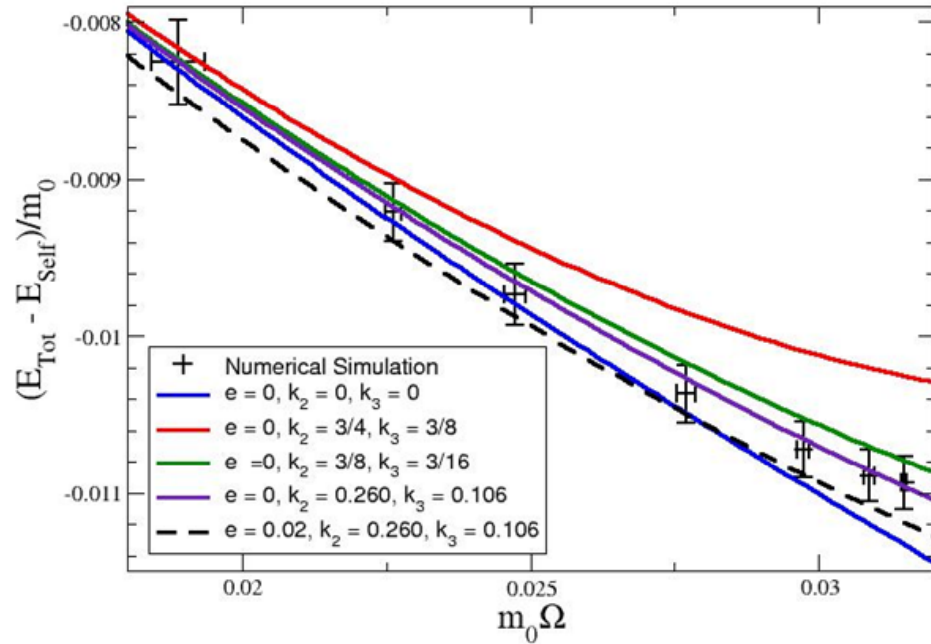
2TN, sans rotation
Masse égale



Baker *et al.* 2007

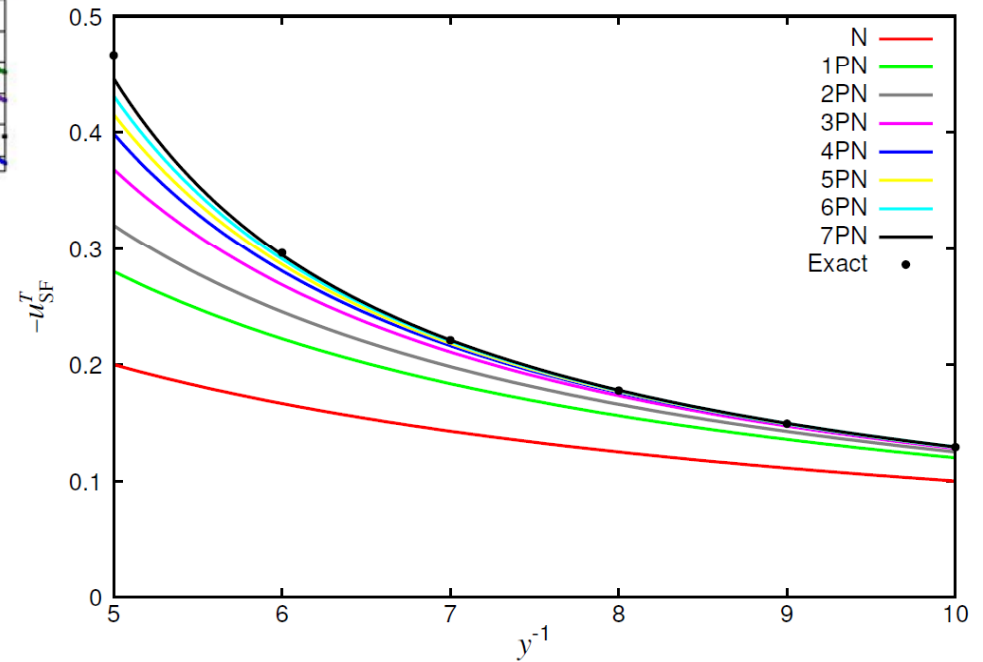
Les développements PN marchent remarquablement bien

PN vs Relativité numérique



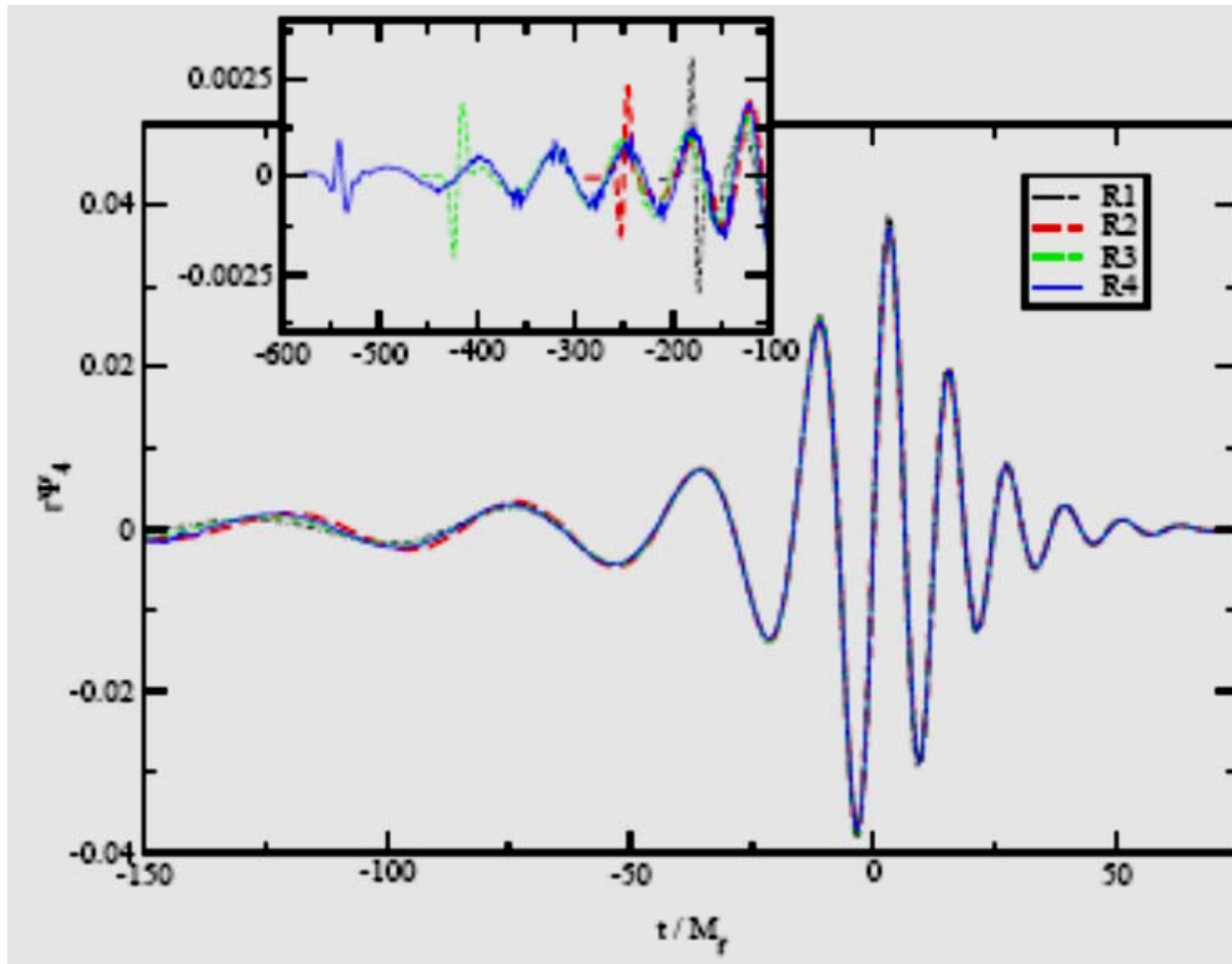
Miller, Suen et al 2007

Calcul de la self-force,



Blanchet et al 2010

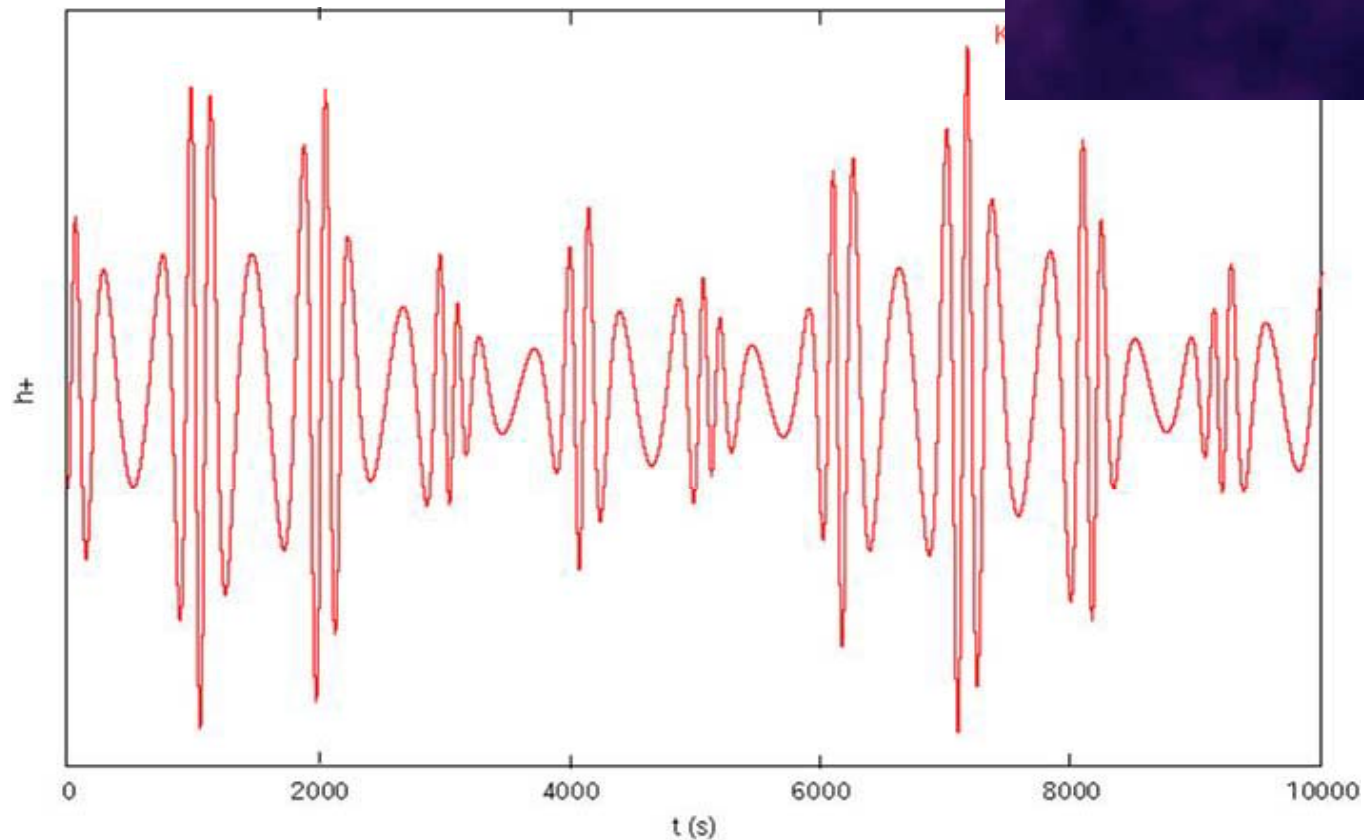
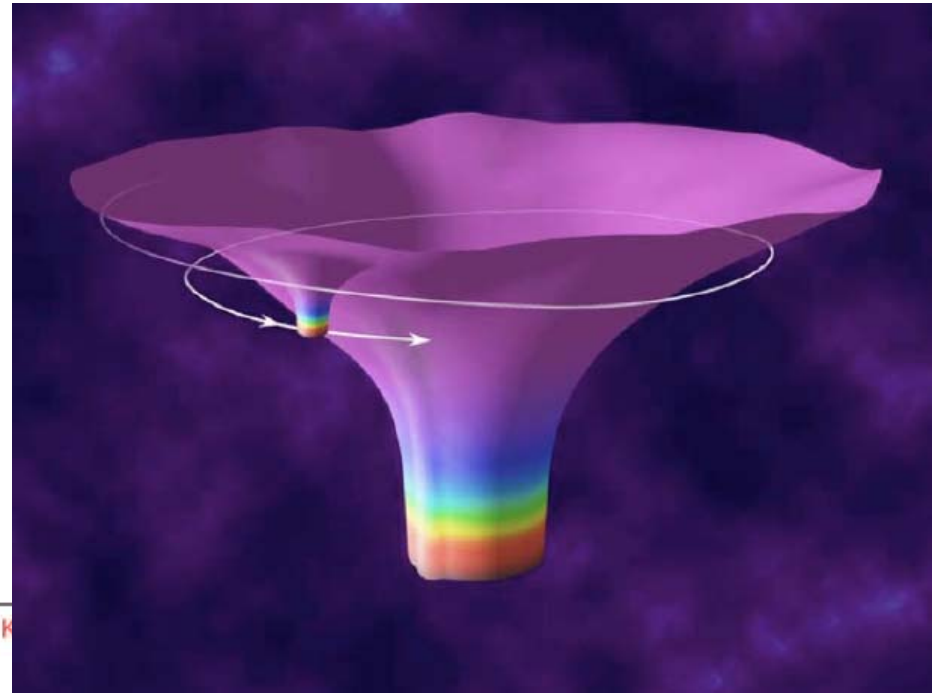
Plusieurs codes et méthodes



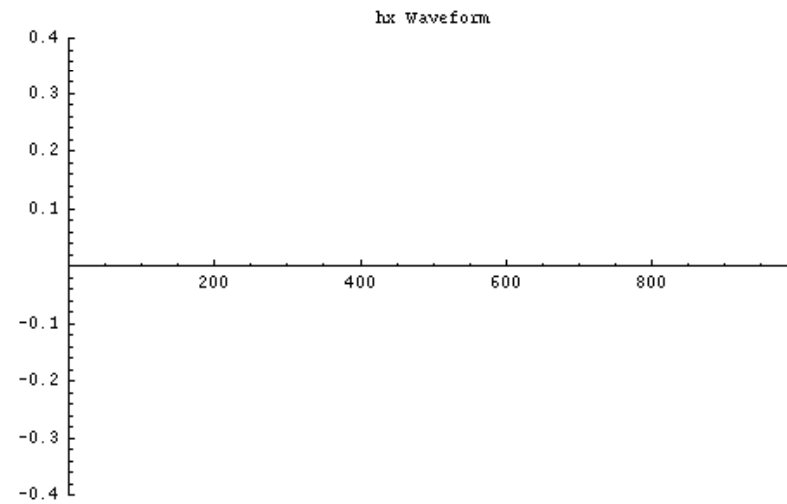
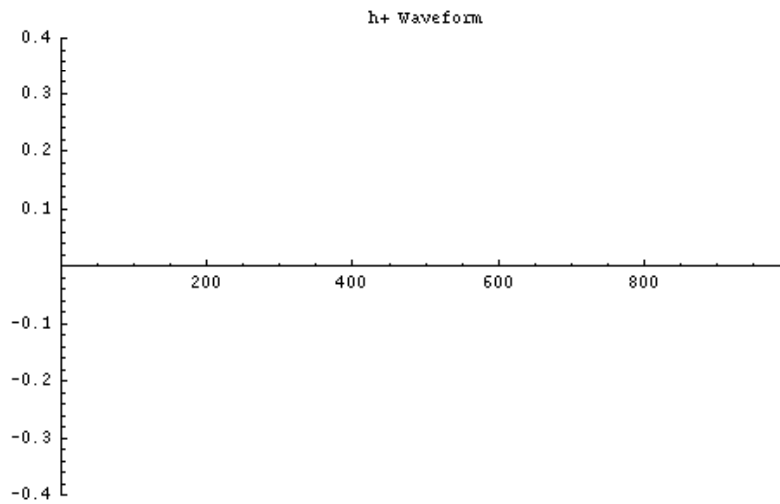
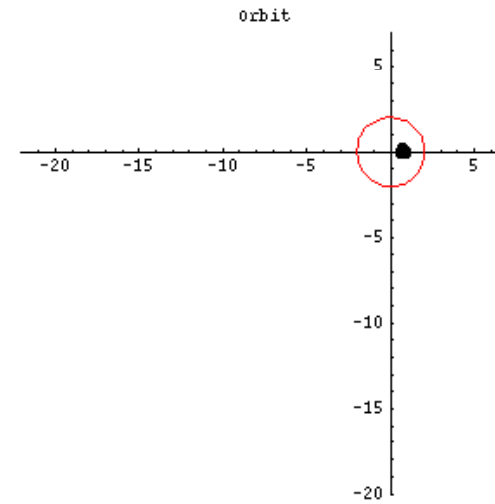
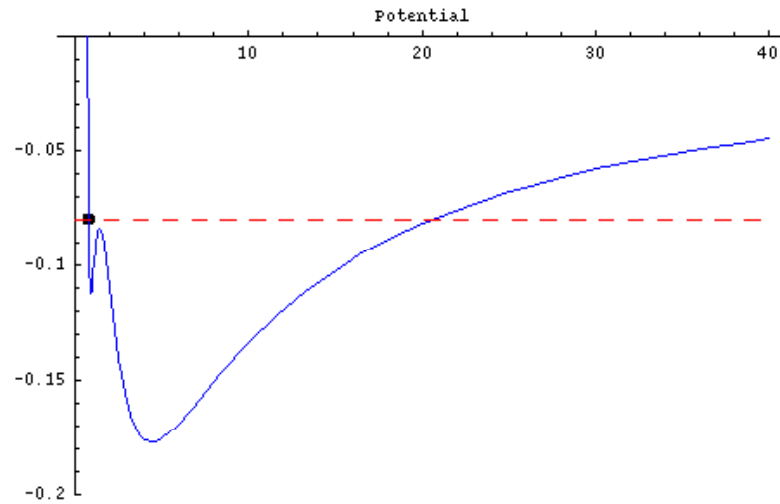
Accord à 1% (Centrella, Herrman, Baker..)

EMRI: forme des ondes

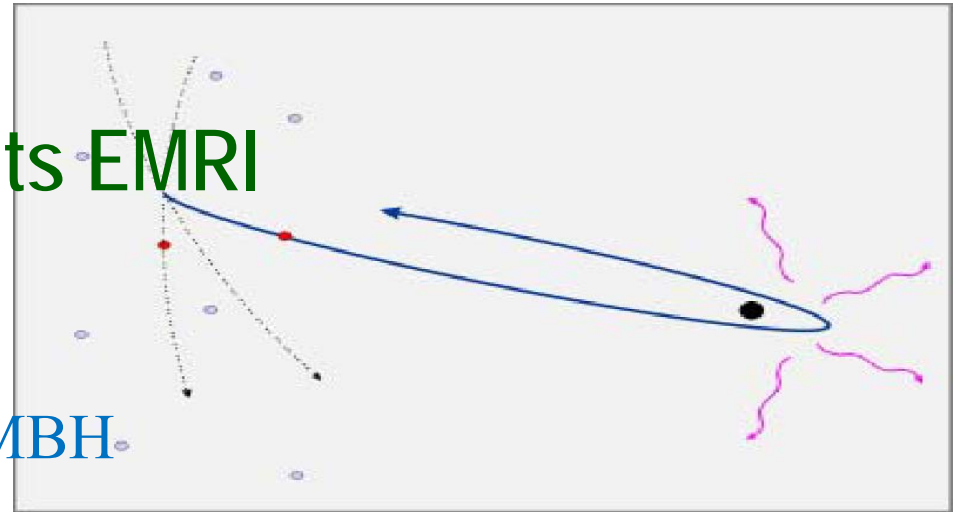
Le rapport de masse $5M_{\odot}$ versus 10^6 - $10^9 M_{\odot}$ est si grand, que l'on peut faire un calcul de perturbation



EMRI: Extreme Mass Ratio Inspiral



Fréquence des évènements EMRI



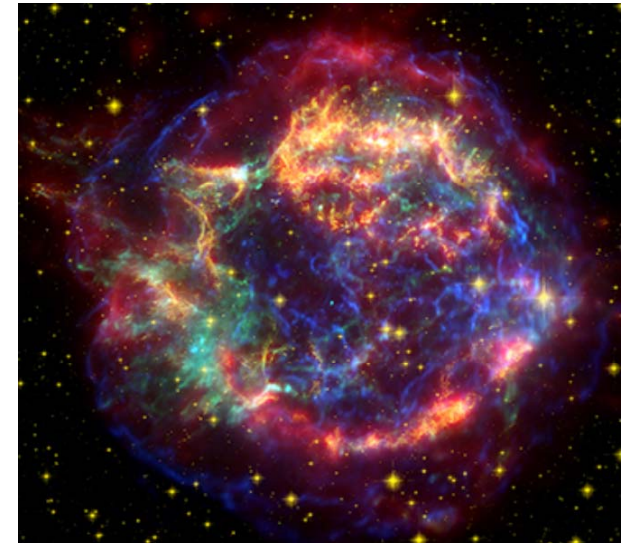
- Toutes les galaxies possèdent un SMBH.
 - Le TN central est entouré d'un amas d'étoiles, comprenant un grand nombre d'objets compacts, résidus d'étoiles massives
 - Les rencontres entre étoiles de l'amas amènent des objets compacts près du TN central, où ils sont capturés.
 - Emission des ondes gravitationnelles amène la fusion avec le SMBH
 - Forme des ondes complexe car orbites excentriques et SMBH en rotation
- Le signal reçu et sa forme nous renseigne **sur masse et spin du TN**

Explosions d'étoiles

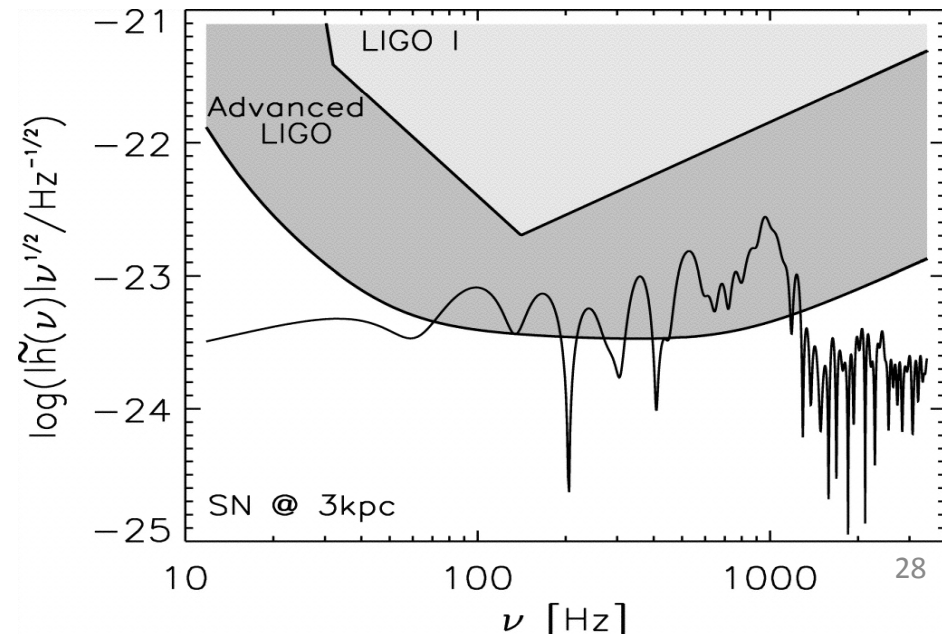
Etoiles massives explosent en supernovae
L'explosion est probablement asymétrique

→ Ondes gravitationnelles

Fréquence f maximum, lorsque les perturbations voyagent avec c sur la surface/horizon de l'objet de masse M



$$f \leq \frac{c^3}{4\pi GM} \sim 10^4 \text{ Hz} \frac{M_\odot}{M}$$



Fond stochastique d'ondes gravitationnelles

Un rayonnement de fond, comme pour le CMB, CIB, COB..

Dû en partie aux fluctuations primordiales

Normalisé à la densité critique de l'univers

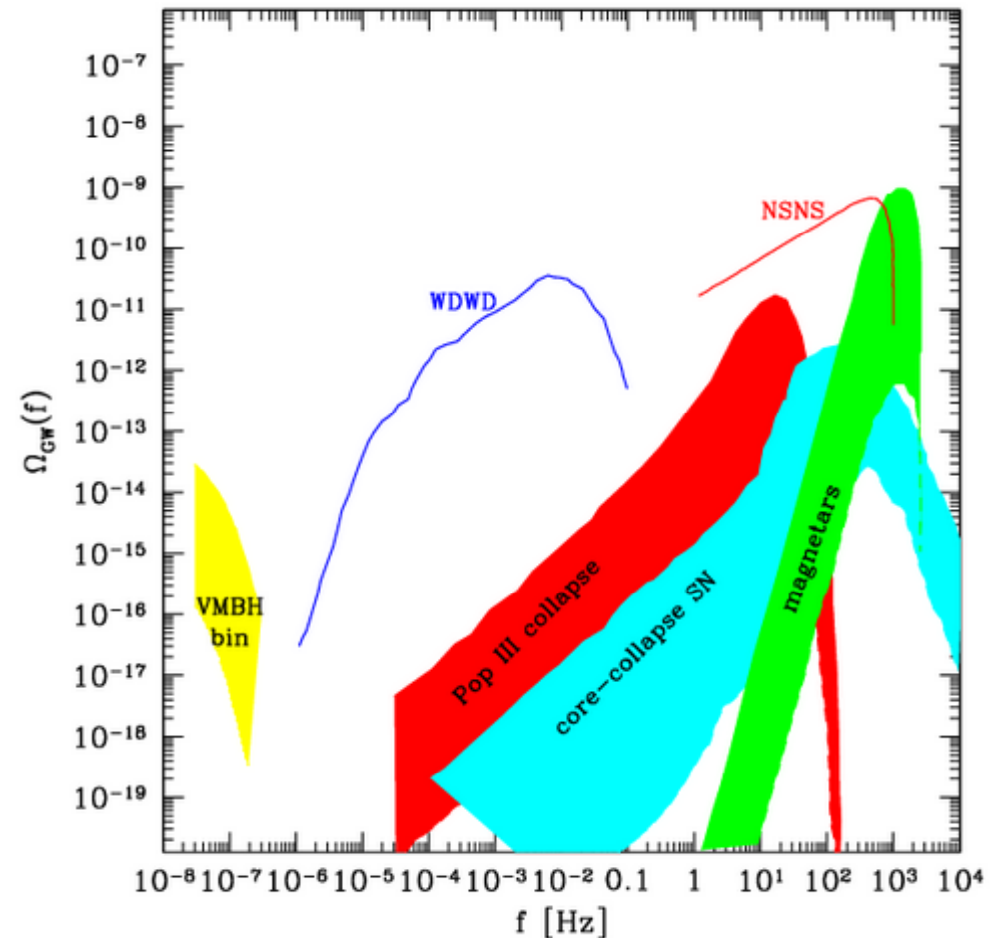
$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_{\text{crit}}} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln f}$$

→ $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-15}$

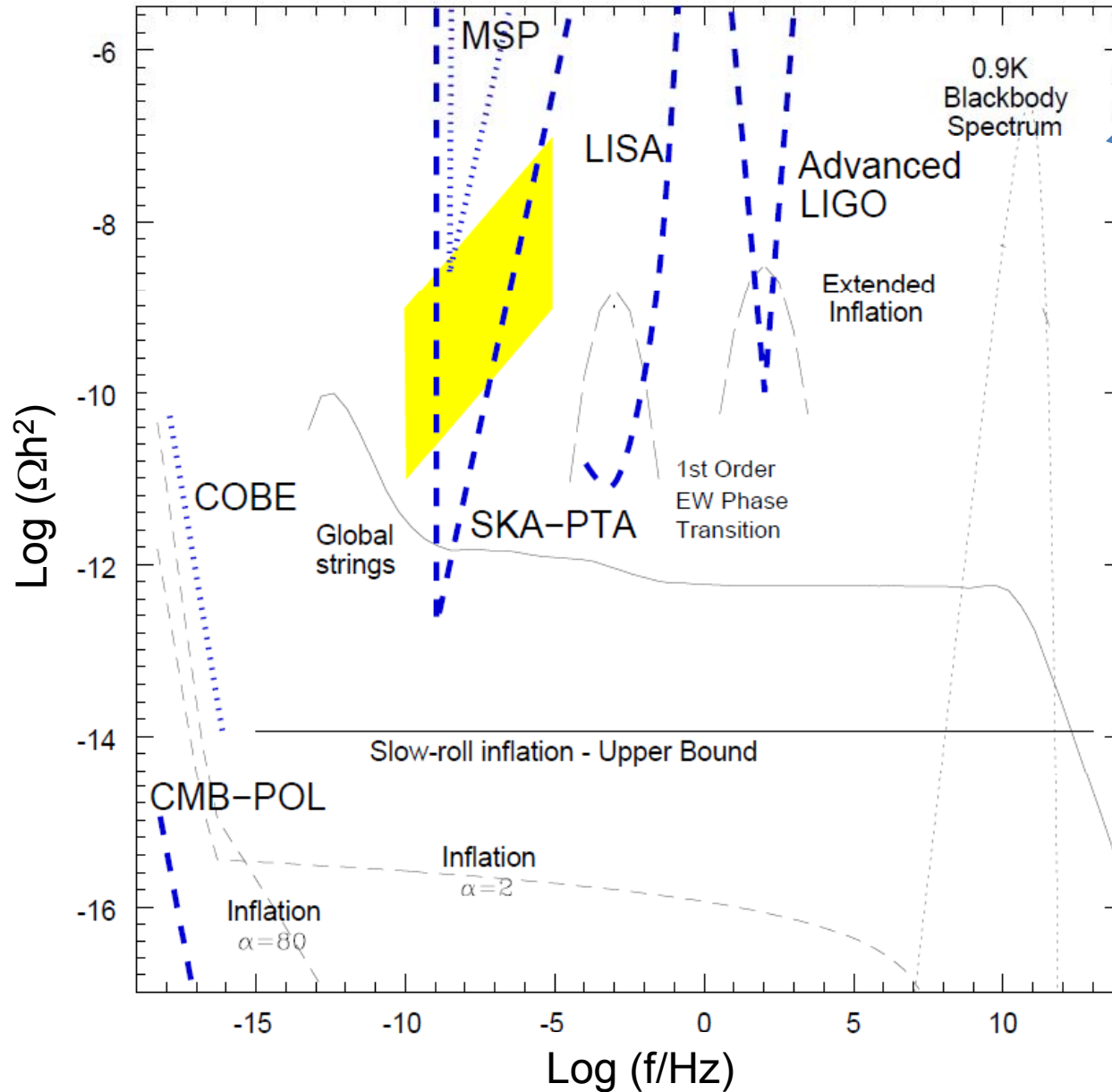
Transition de phase, à une température T

$$f \sim 100 \text{ Hz} \left(\frac{T}{10^5 \text{ TeV}} \right)$$

Schneider 2010



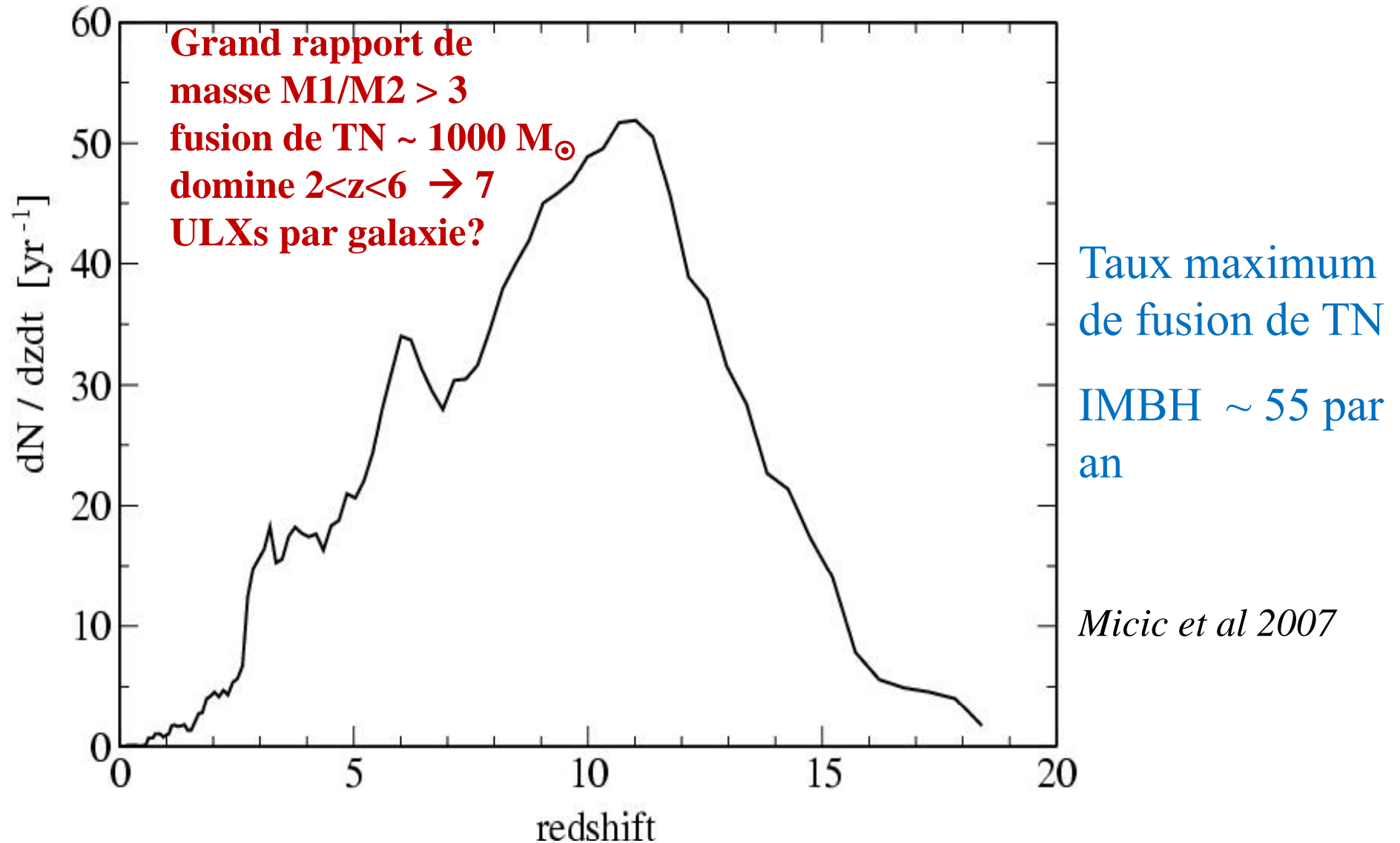
Toutes sortes d'ondes gravitationnelles



Spectre de gravitons primordial

Kramer et al 2004

Simulations cosmologiques de fusions de TN



Faible rapport de masse $M1/M2 < 3 \rightarrow$ fusion de TN de $1000 M_{\odot}$ très fréquents

Histoire: 50 ans de recherche

Au début, des barres métalliques résonantes (Weber ~1970)
Puis des interféromètres au sol
Ensuite dans l'espace!



UNIVERSITY OF MARYLAND

60': Joe Weber
Le vrai pionier



90': Barres
cryogéniques



2000' - : Grands Interféromètres
LIGO, VIRGO..

Détection: barres

- **Un cylindre de métal entre en résonance à une fréquence précise**
- Les détecteurs doivent être suspendus, isolés des ondes sismiques et refroidis pour éviter le bruit thermique
- Au début en aluminium
- **Aujourd'hui plus sophistiqués**
- ALLEGRO (USA), AURIGA (Italie),
- EXPLORER (CERN), NAUTILUS (Italie),
- NIOBE (Australie), GRAIL (Pays-Bas)

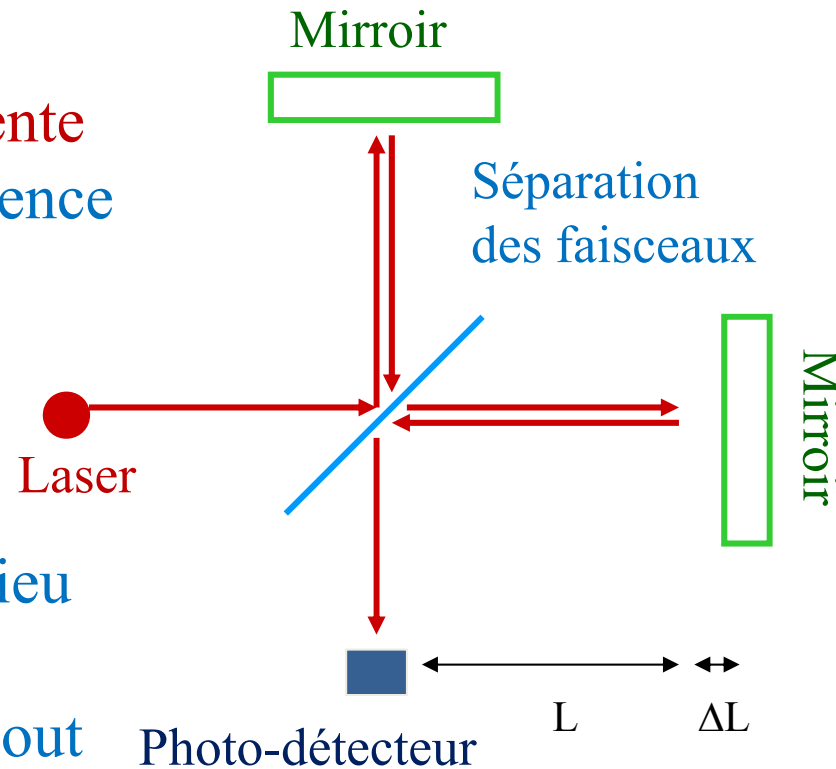
Corrélations recherchées entre barres à 2km

Barre → Sphère



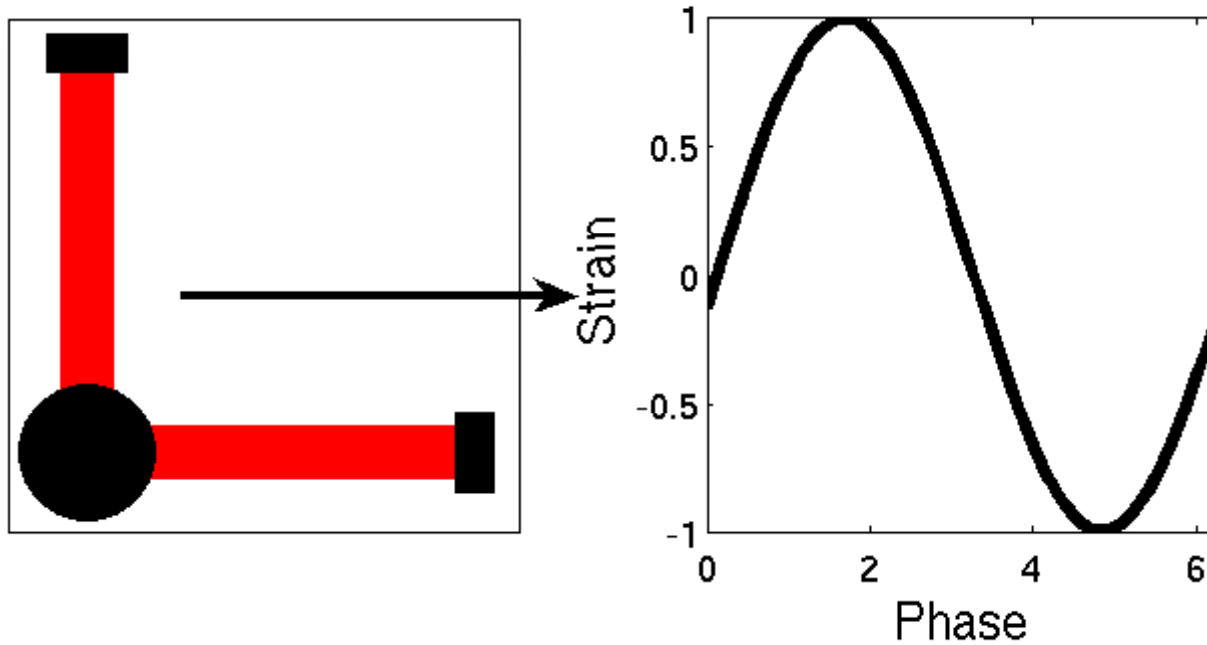
Principe des interféromètres

- Comme un interféromètre de Michelson
- Une source de lumière cohérente (laser) pour mesurer la différence de taille entre les bras
- La lumière est séparée au milieu
- Recombine les 2 faisceaux et mesure les interférences au bout



Interféromètres LIGO, Virgo..

- Principe de mesure des ondes gravitationnelles



LIGO=Laser Interferometer Gravitational wave Observatory

- Masses test suspendues, libres de bouger à 1D

- GW $\lambda \gg$ bras

→ cavité pour garder la lumière pendant le passage de l'onde

100Hz $\lambda \sim 3 \times 10^6 \text{m}$, avec $L \sim 4 \text{km}$

→ maintenir la lumière dans les bras pendant 1000 tours

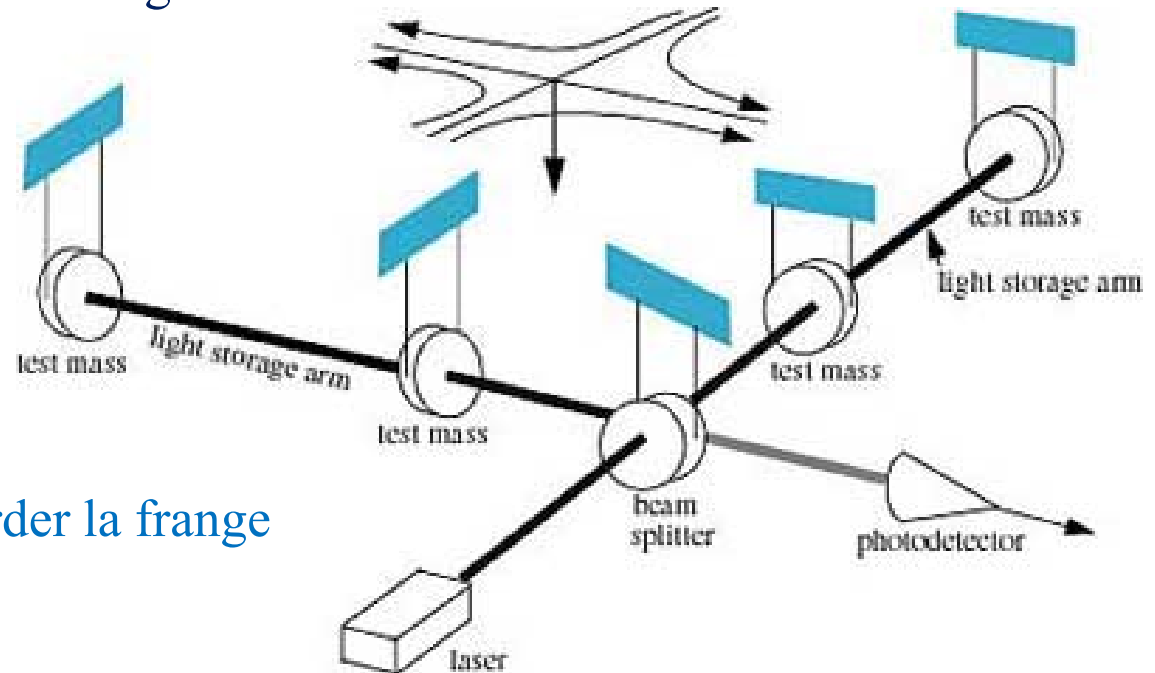
- On bouge les miroirs pour garder la frange noire → h

- Longueur de chaque bras, $L = 4 \text{ km}$,

- fréquences, $f = 10 \text{ Hz} - 10^4 \text{ Hz}$

- $\Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$,

taille du proton $\sim 10^{-15} \text{ m}$



$$h = \Delta L / L \sim 10^{-21} \text{ et } L = 4 \text{ km} \Rightarrow \Delta L = hL \sim 10^{-18} \text{ m}$$

Interferomètres dans le monde

LIGO Hanford 4&2 km



GEO Hannovre 600 m



10Hz-10³Hz



LIGO Livingston 4 km

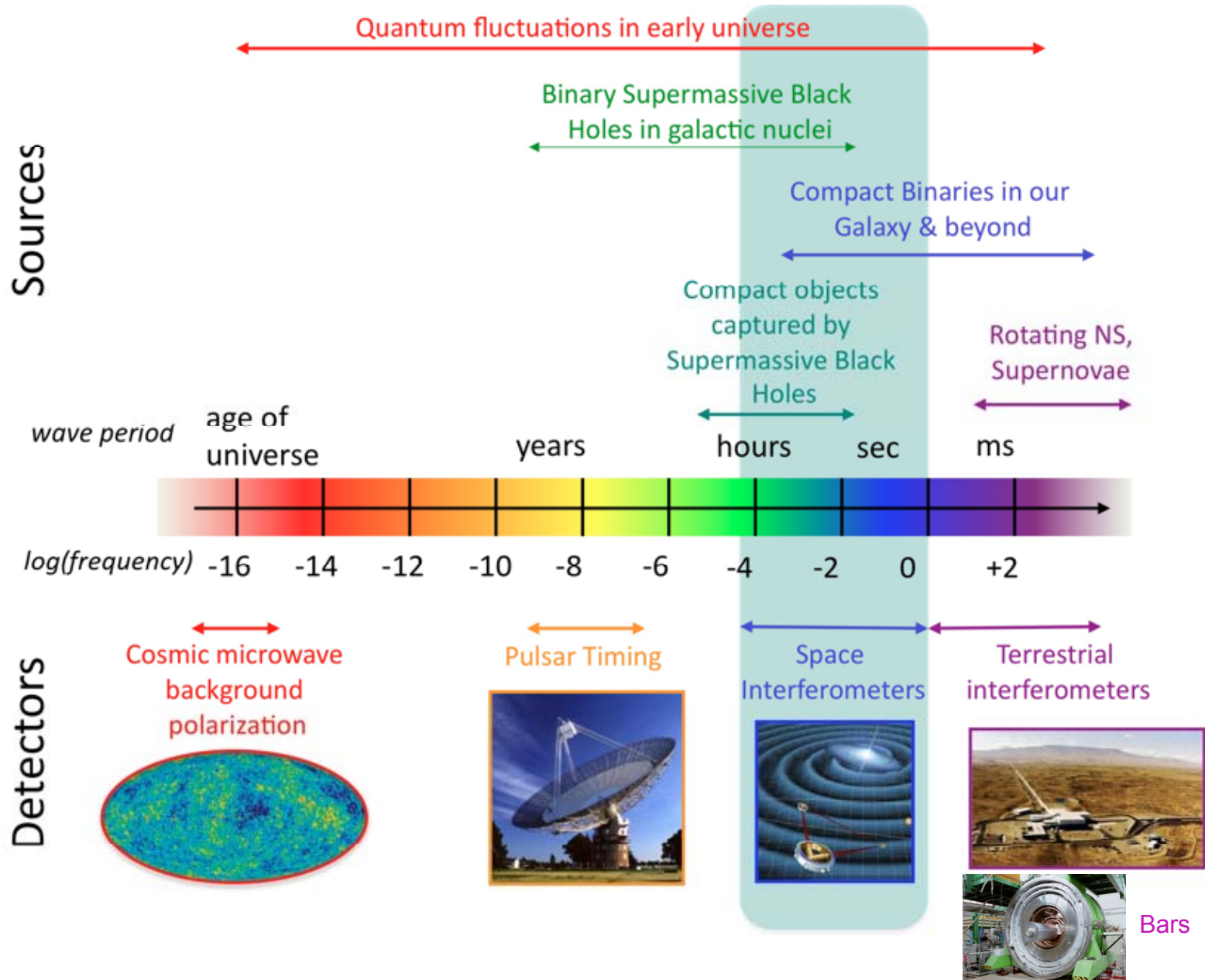


Virgo Cascina 3 km



**TAMA Tokyo
300 m**

Le spectre des ondes gravitationnelles





Resultats des premiers Détecteurs: LIGO et Virgo

Depuis 2007 données analysées conjointement entre LIGO et Virgo

- Limites sur l'émission provenant des pulsars ms connus
 - Le pulsar du Crabe émet moins de 2% de son énergie de ralentissement de période en ondes gravitationnelles
- Limites sur les binaires compactes (étoiles à neutrons ou TN) et le taux de coalescence dans le volume local (~20 Mpc)
- Limites sur le fond stochastique dans les fréquences ~100 Hz
 - Limite meilleure que celle de la nucléosynthèse primordiale

Instruments de 2ème Génération

Détecteurs de 2ème génération:

Virgo et LIGO “avancés”

Buts:

sensibilité $\times 10 \rightarrow$

Regarder 10x plus loin \rightarrow

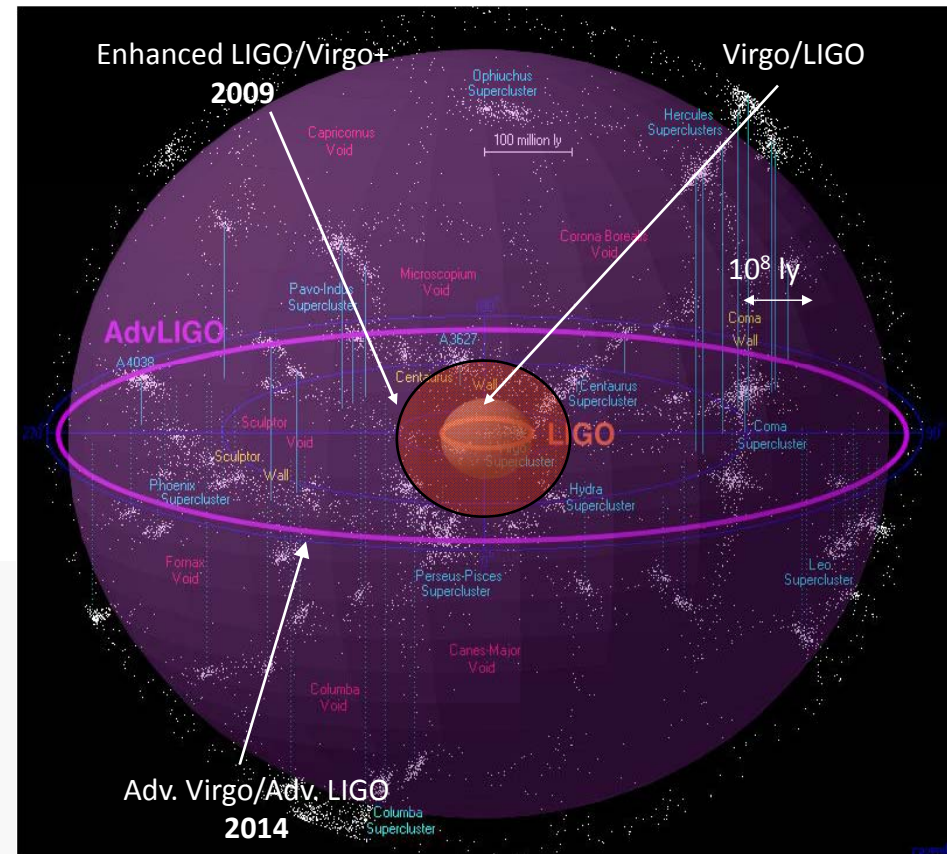
Taux de détection $\times 1000$

Binaires d'étoiles à neutrons
jusqu'à 300 Mpc

Binaires de trous noirs détectables
à distances cosmologiques

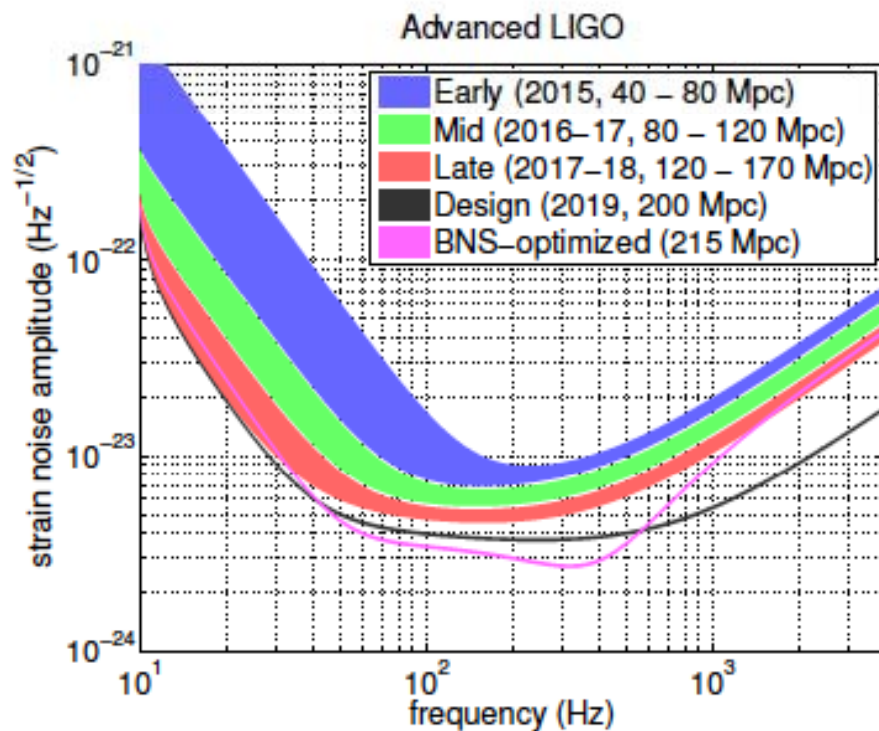
10 -100 évènements/an

attendus!

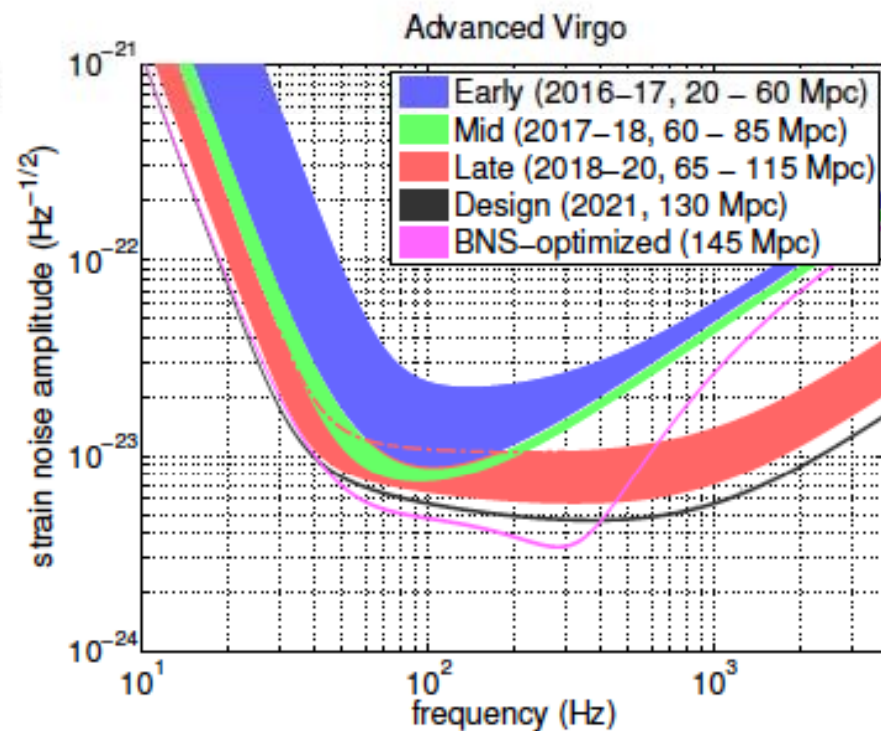


Credit: R.Powell, B.Berger

Sensibilités attendues, le long du spectre de fréquences, et selon les années

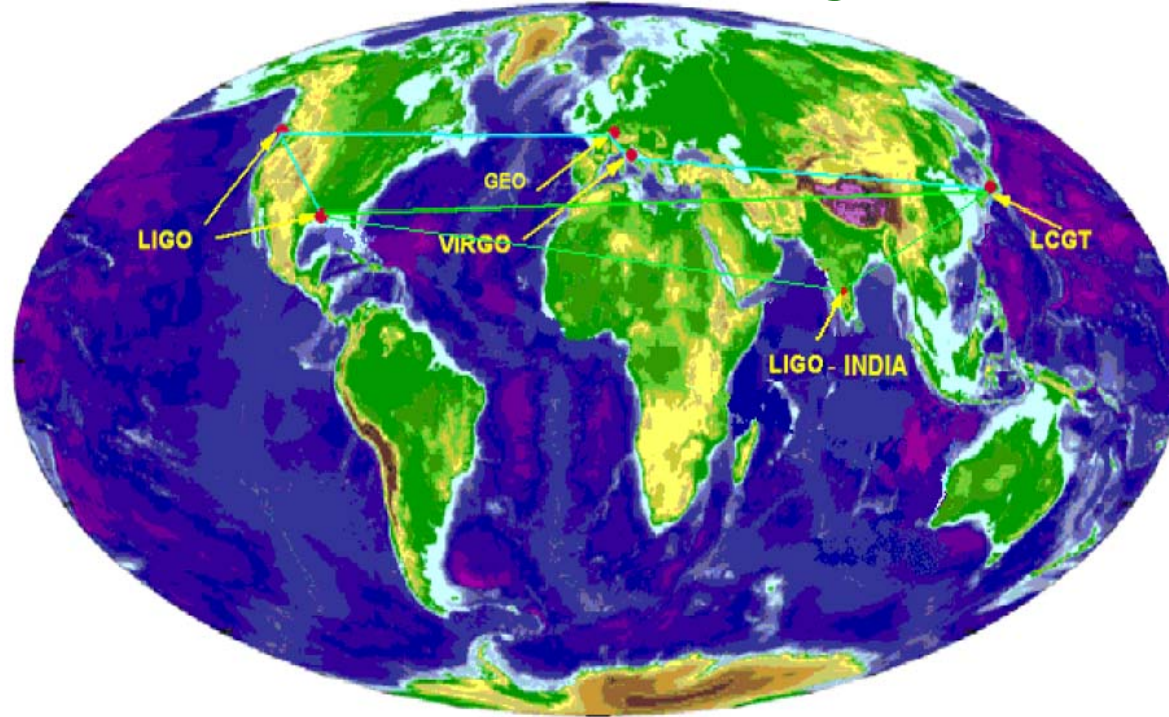


LIGO



VIRGO

Nouvelle ère pour les ondes gravitationnelles



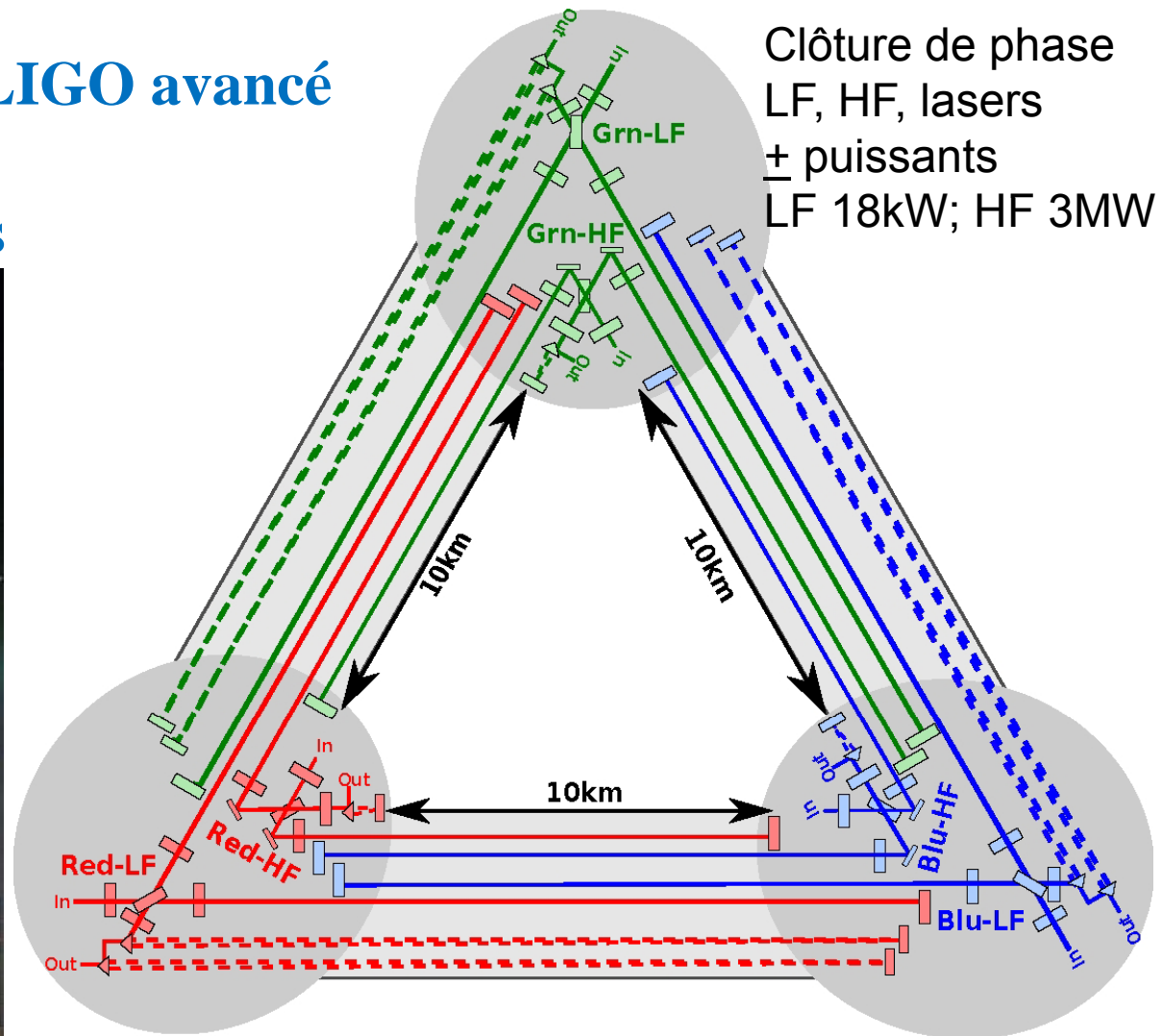
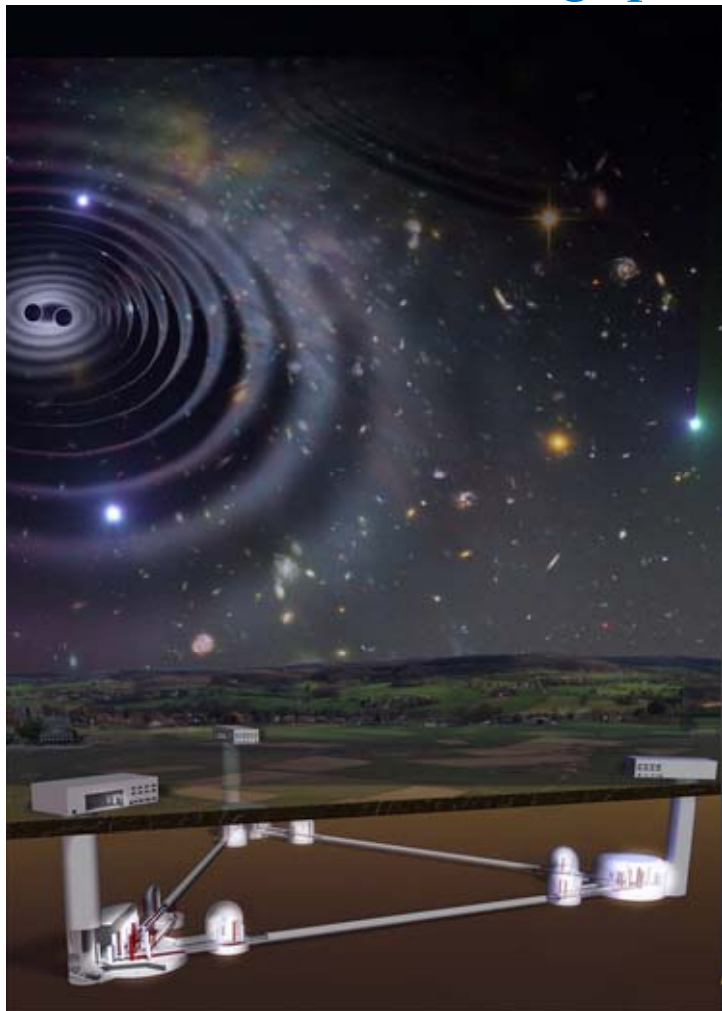
- La première génération de détecteurs: exploits au niveau optique
 - Technique prouvée et démontrée
- **Seconde génération de détecteurs bientôt en opération**
 - **Volume et nbre de sources étendus d'un facteur 1000**
- Actuellement, depuis ~10 ans, accent mis sur le réseau
 - ➔ Mise en commun des résultats

Einstein Telescope (ET): 3^{ème} génération

Projet Européen: 10 x LIGO avancé

Sous-terrain, $f > 1$ Hz

Distances cosmologiques



Réseau GraWITton

KAGRA: Kamioka (sous-terrain)

EINSTEIN TELESCOPE

gravitational wave observatory

CENTRAL FACILITY

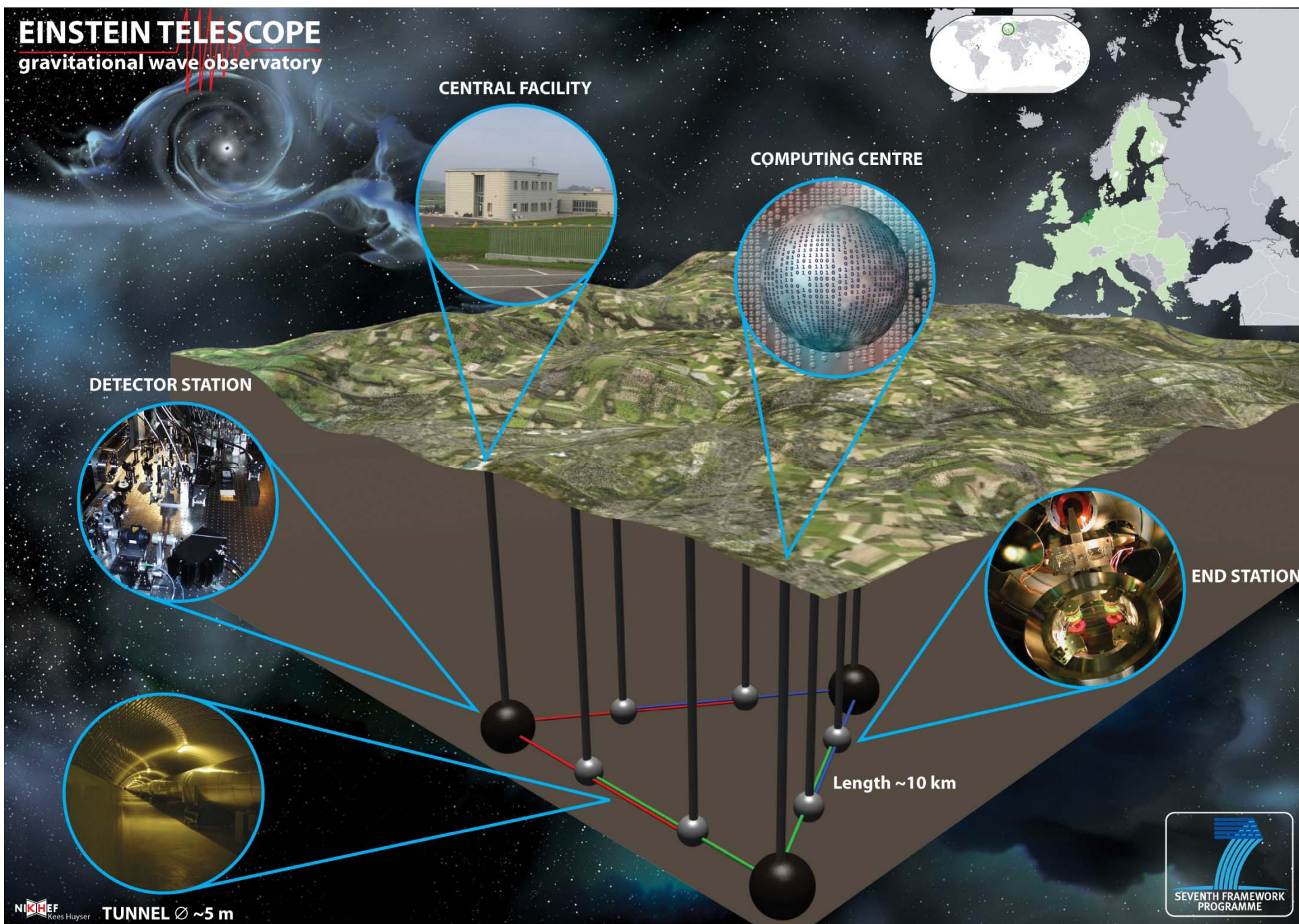
COMPUTING CENTRE

DETECTOR STATION

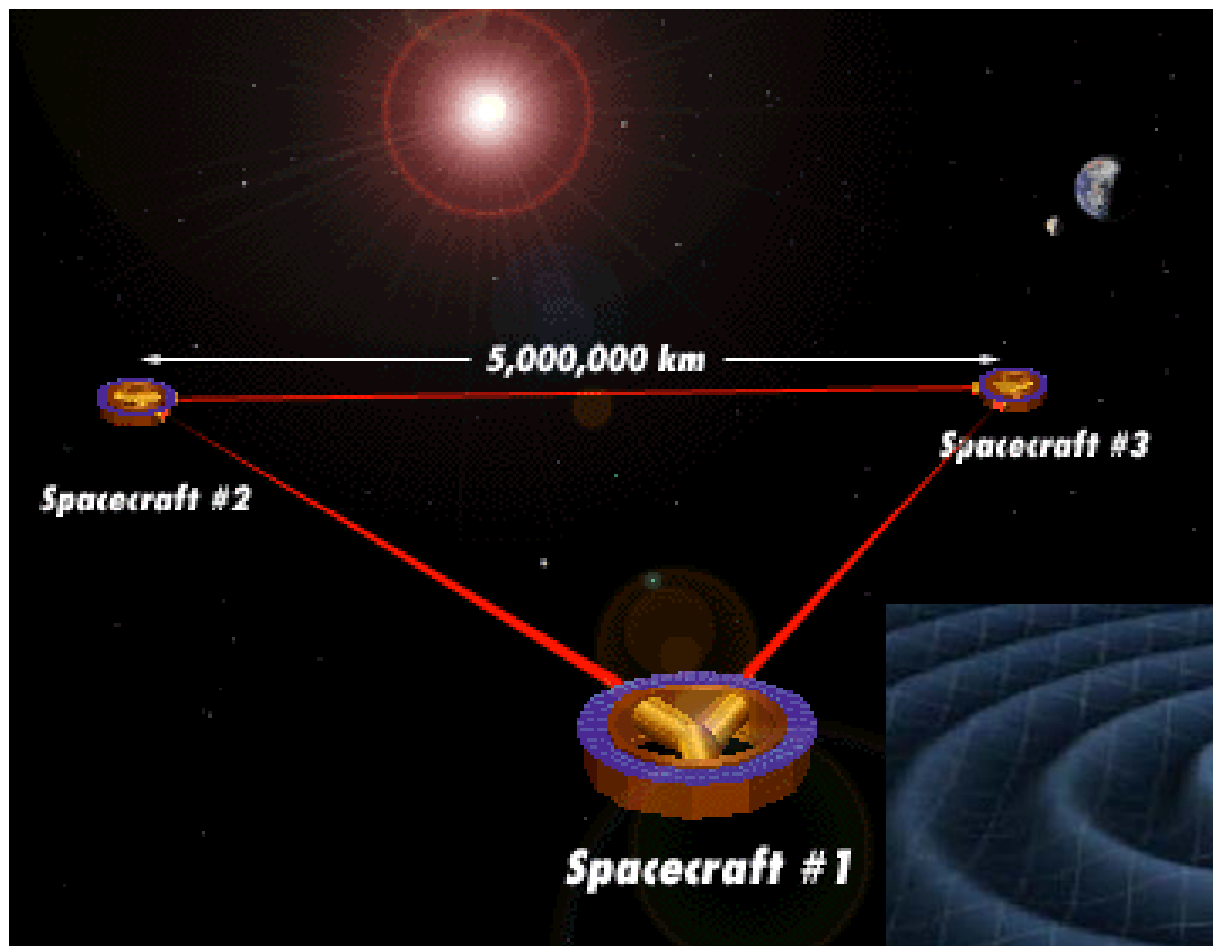
END STATION

Length ~10 km

TUNNEL \varnothing ~5 m



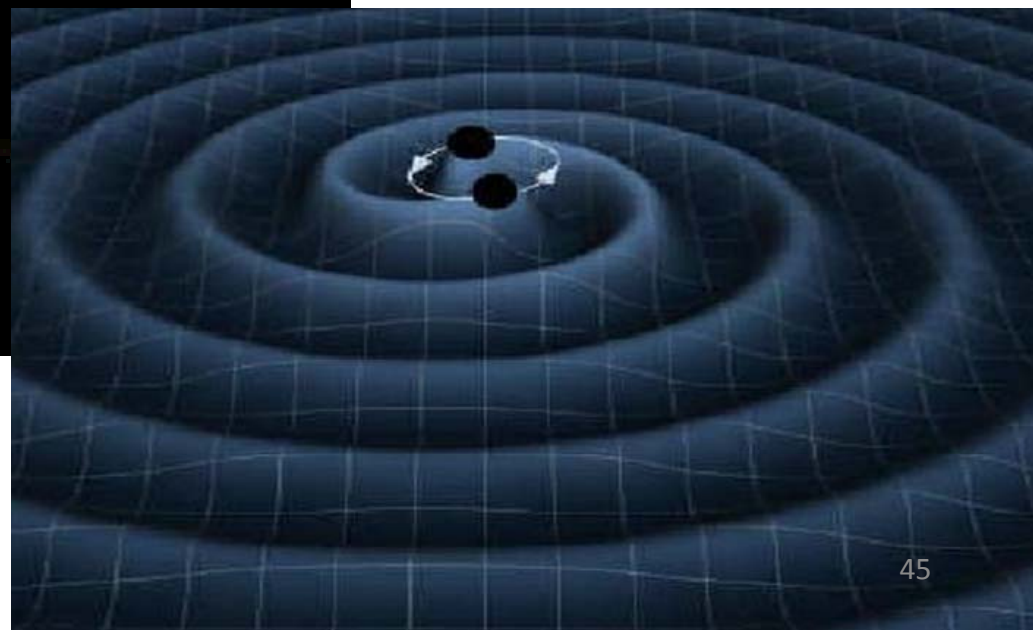
Projet spatial LISA



Conçu pour détecter des coalescences de trous noirs de $10^5 - 10^7 M_{\odot}$

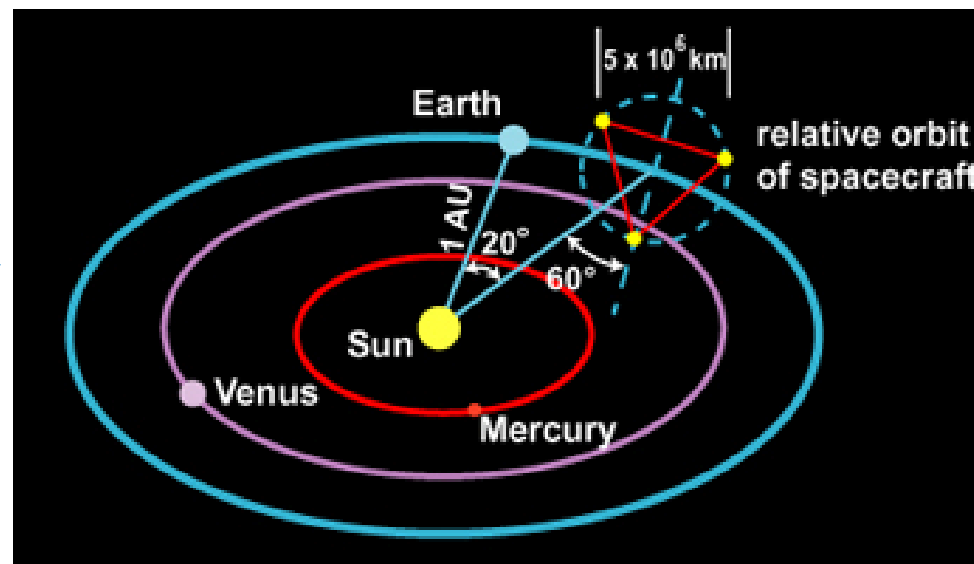
Interféromètres de Michelson

Chaque satellite contient 2 télescopes, 2 lasers, 2 masses test (or-platine), pointant vers les 2 autres



Projet LISA « *Laser Interferometer Space Antenna* »

- Un interféromètre dans l'espace
 - Mission NASA/ESA
 - Trois satellites dans une orbite semblable à la Terre
 - Ligne de base de 5 million kmSensible aux basses fréquences
(grandes λ)

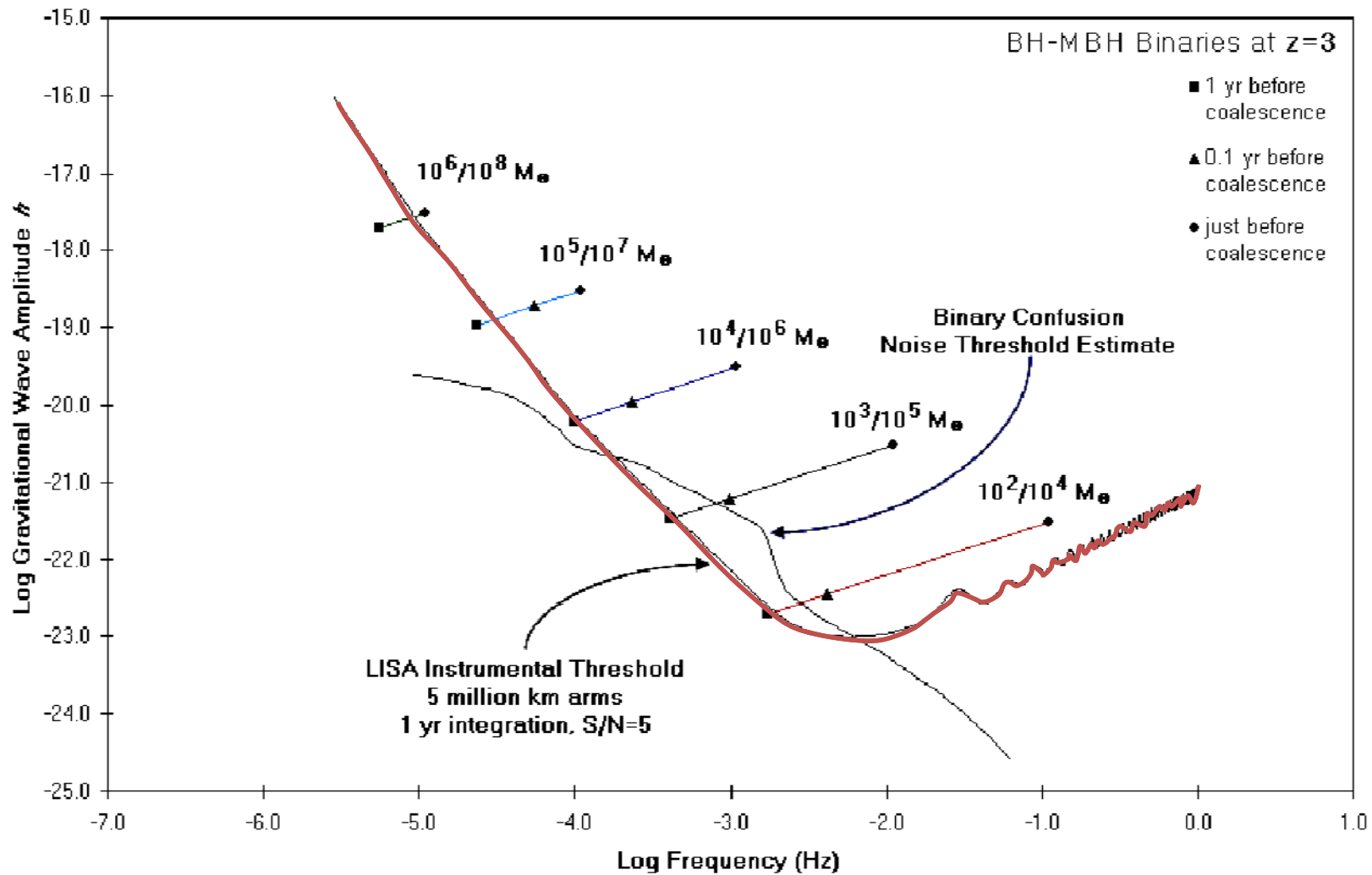


Chaque satellite flotte autour des masses-test et les protège du vent solaire, de la pression de radiation..

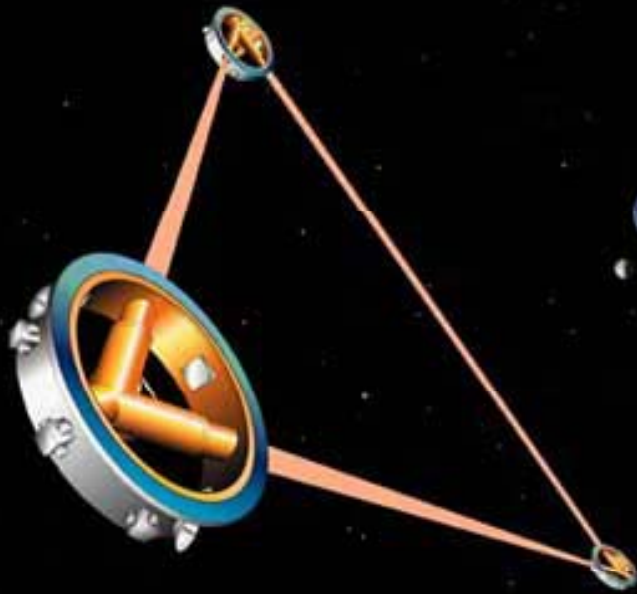
En Avril 2011, la NASA se retire

Sensibilité de LISA aux binaires de trous noirs massifs

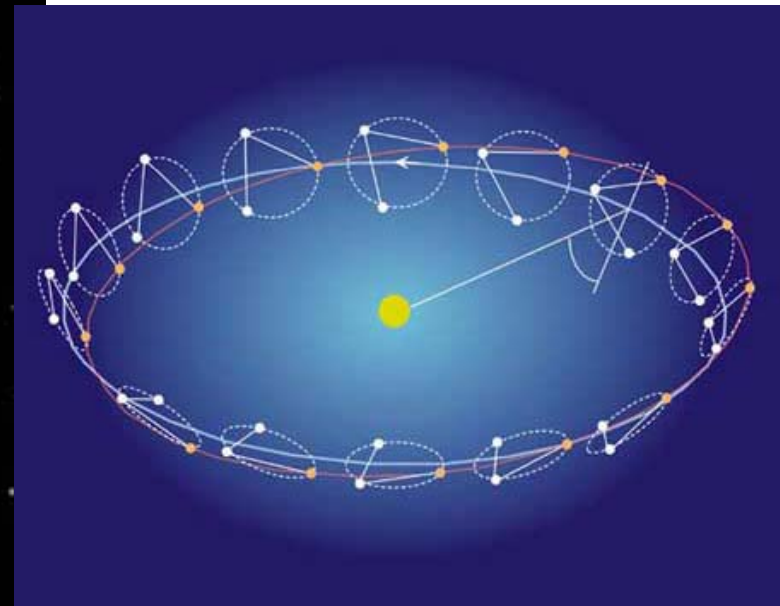
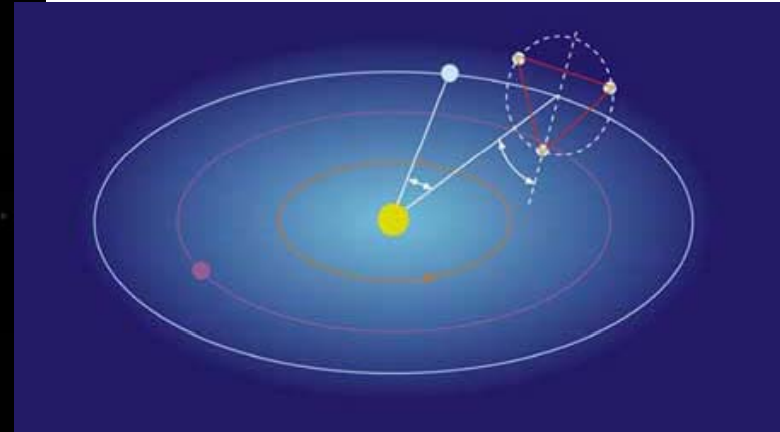
Strain Amplitudes During Last Year Before BH-BH Coalescence



e-LISA: interféromètre dans l'espace



Evolved-LISA (2034?)
ESA seulement



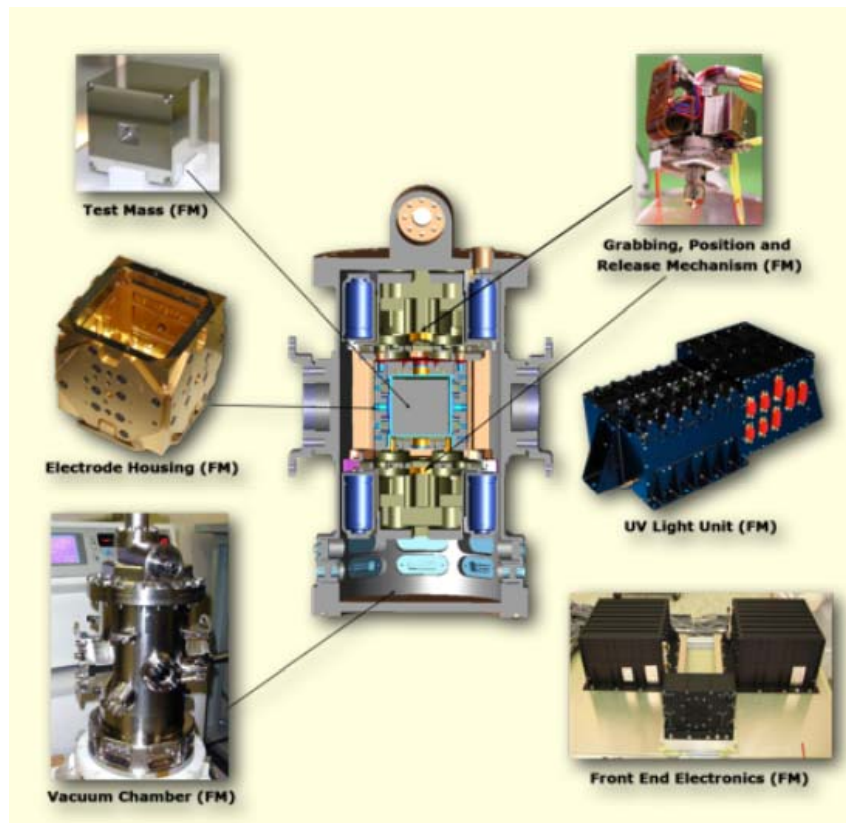
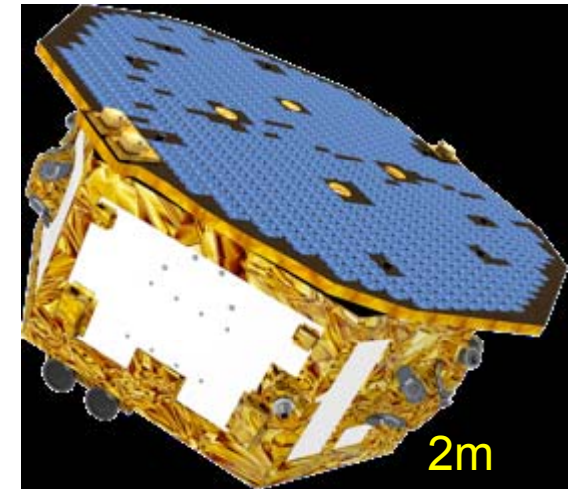
Base 1 million km

LISA Pathfinder

Lancé le 3 Décembre 2015

But: démontrer la faisabilité de contrôle de deux masses test de 2kg

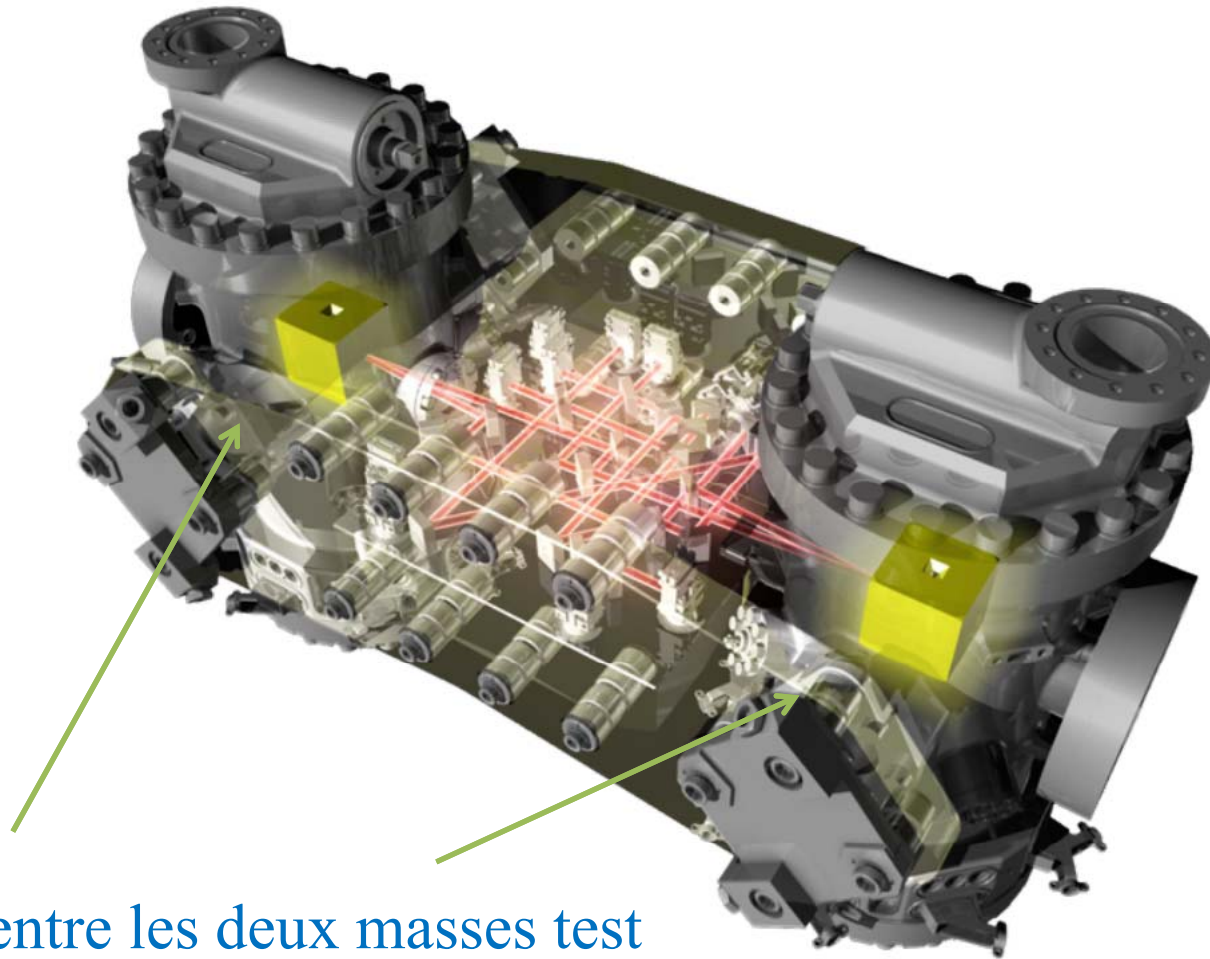
Chaque satellite de LISA doit protéger les masses des forces extérieures



Position contrôlée à $1\mu\text{m}$
par interférométrie Laser

2 masses distantes de 40cm

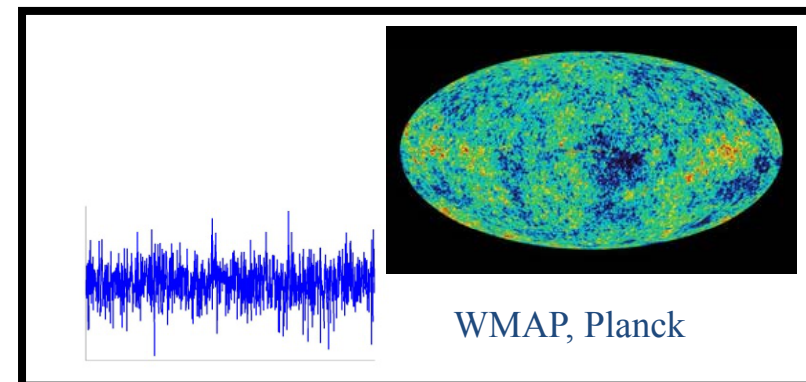
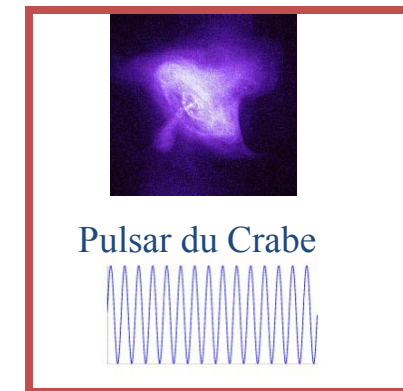
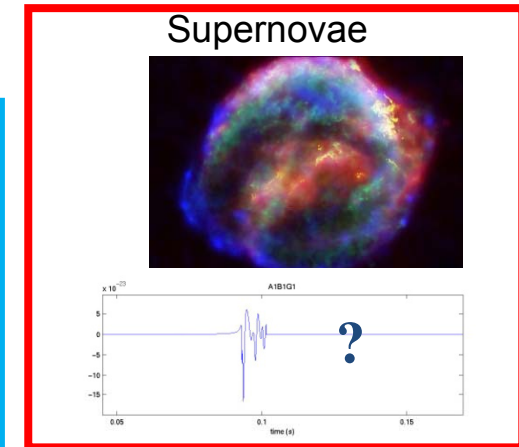
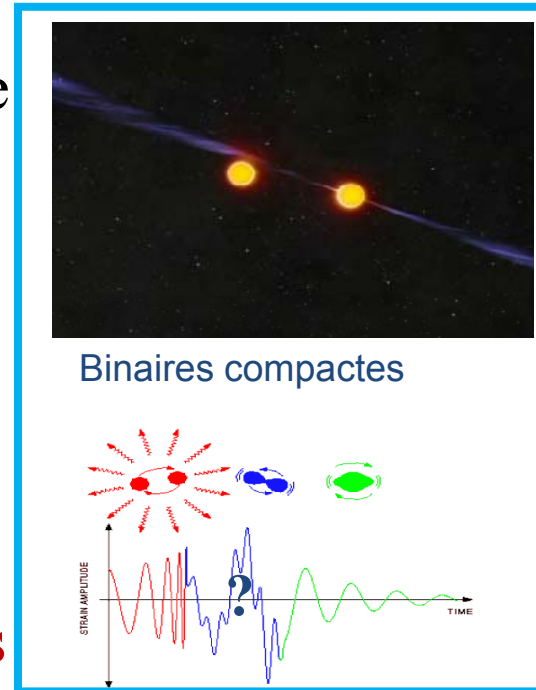
Systeme de LISA Pathfinder



Distance entre les deux masses test
contrôlée par interférométrie LASER

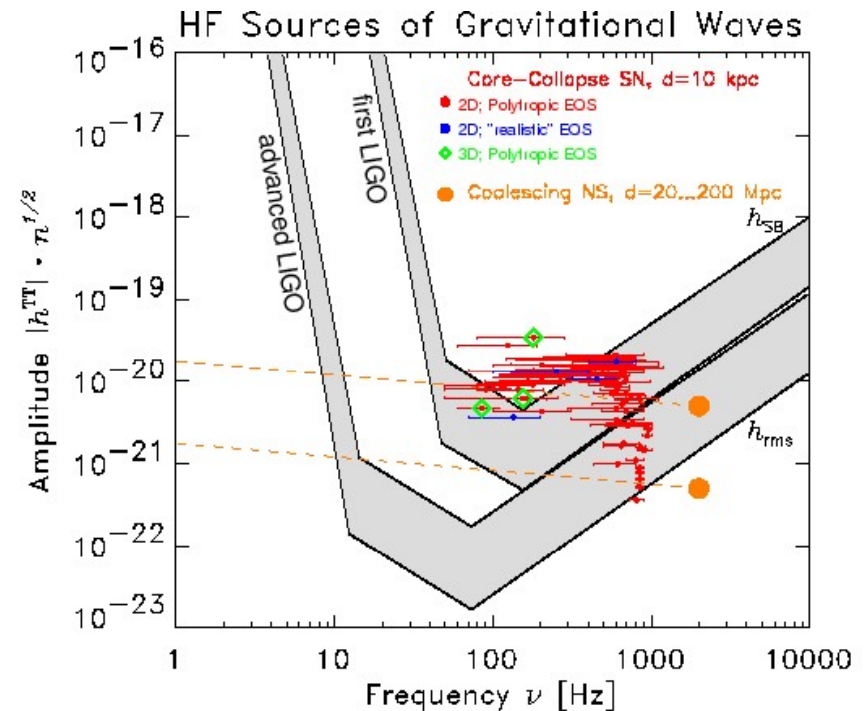
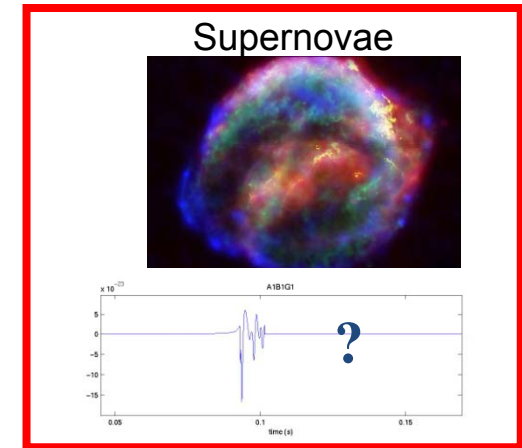
Sources d'ondes gravitationnelles

- **Explosions** supernovae
- **Binaires**
 - Inspirals
 - fusions
 - Ring-downs
- **Ondes continues**
 - Pulsars, périodiques
- **Stochastiques**
 - Fond de sources non résolues
 - Ondes primordiales



Explosion de sources

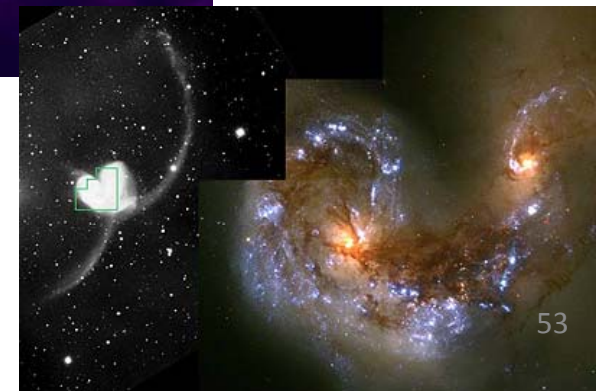
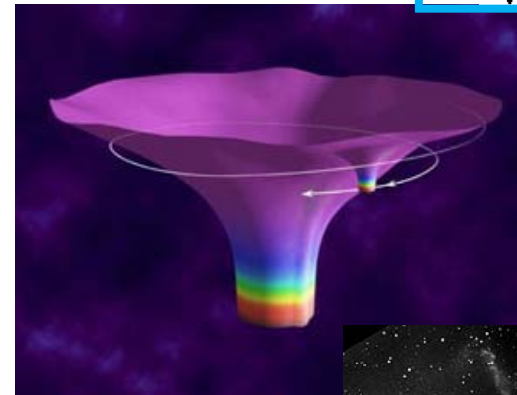
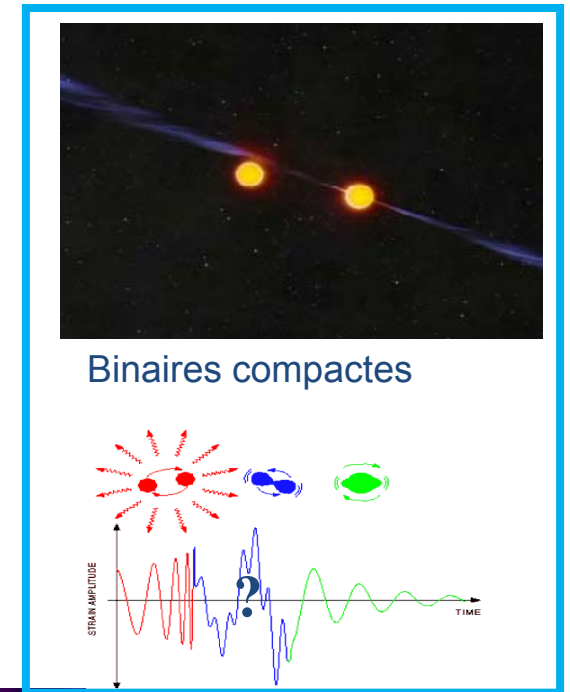
- Supernova de type II, effondrement
 - rebond, modes barrés, mode fluides
- Sursauts Gamma GRBs
- Effondrement non-axisymétrique
 - Quelques simulations numériques mais 1D et 2D
 - Emission faible, visible dans le groupe local
- Information sur la formation des étoiles à neutrons, trous noirs
 - Structure des étoiles à neutrons



Sources binaires - inspirals

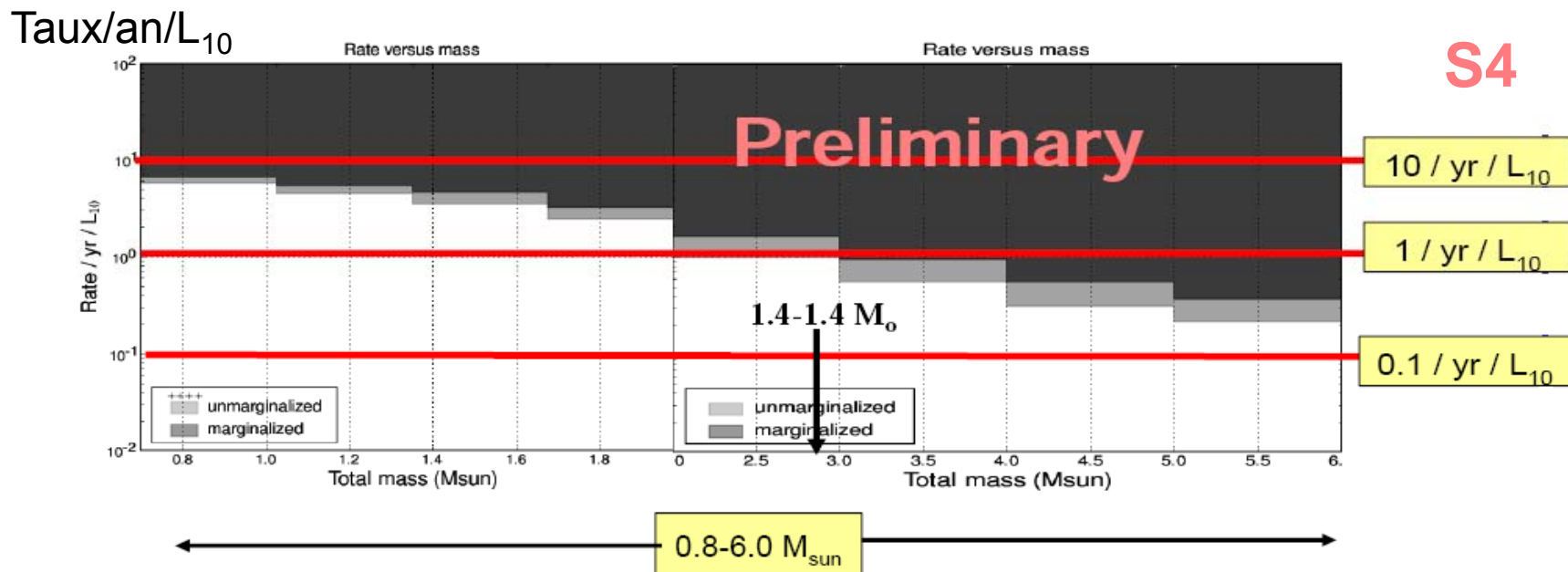
- Binaires compactes
 - inspiral et fusion dans le domaine LIGO-Virgo fréquences (10-1000Hz)
 - Fréquence augmente (“chirp”, gazouillis)
 - **EMRIs** et fusion de SMBH : fréquences de LISA (~0.1mHz – 0.1Hz)
- Test de GR en champ fort
- Test de la physique des trous noirs

$$h \sim \frac{(GM)^{5/3} \Omega^{2/3}}{c^4 r}$$



Inspiral: recherches avant 2015

- Forme du signal très bien connue jusqu'à la fusion
 - Filtres utilisant les templates du signal connu
 - Seuil de déclenchement lorsque le signal sort du bruit et du fond
 - Analyse de coïncidence entre les détecteurs
 - Aucune détection avant le LIGO avancé (septembre 2015)

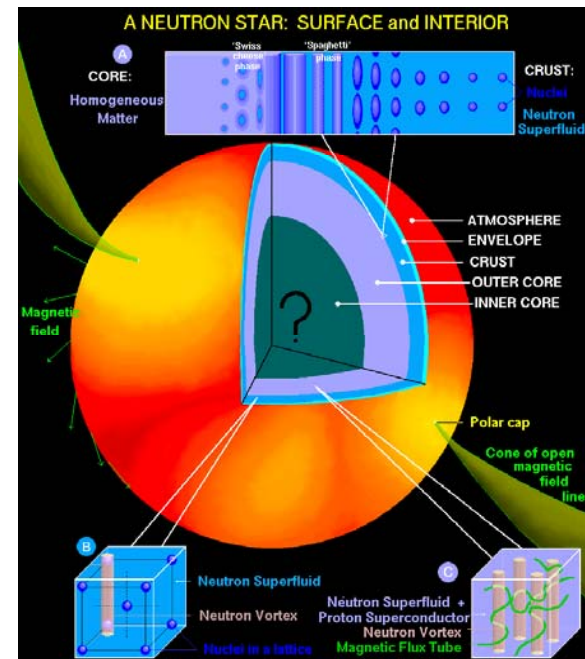
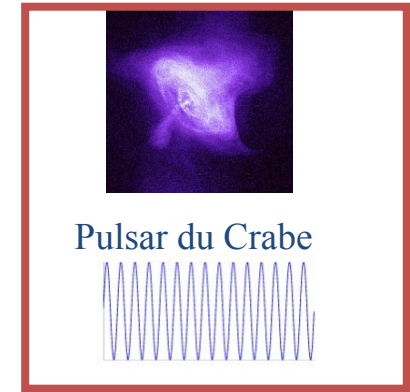


Sources continues

- Etoiles binaires A&B Centauri
 $h=6 \cdot 10^{-23}$, $f=410^{-10}$ Hz
- Etoiles à neutrons avec structure
 - Triaxiale (champ B?, élasticité)
 - Précession
 - Modes fluides
- Importance des distorsions
 → information sur l'équation d'état de l'étoile à neutrons

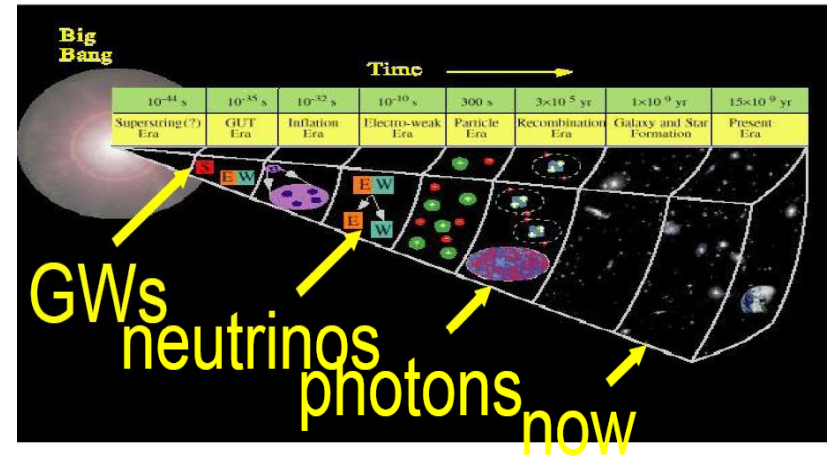


Etoile à neutrons
 "montagneuse"

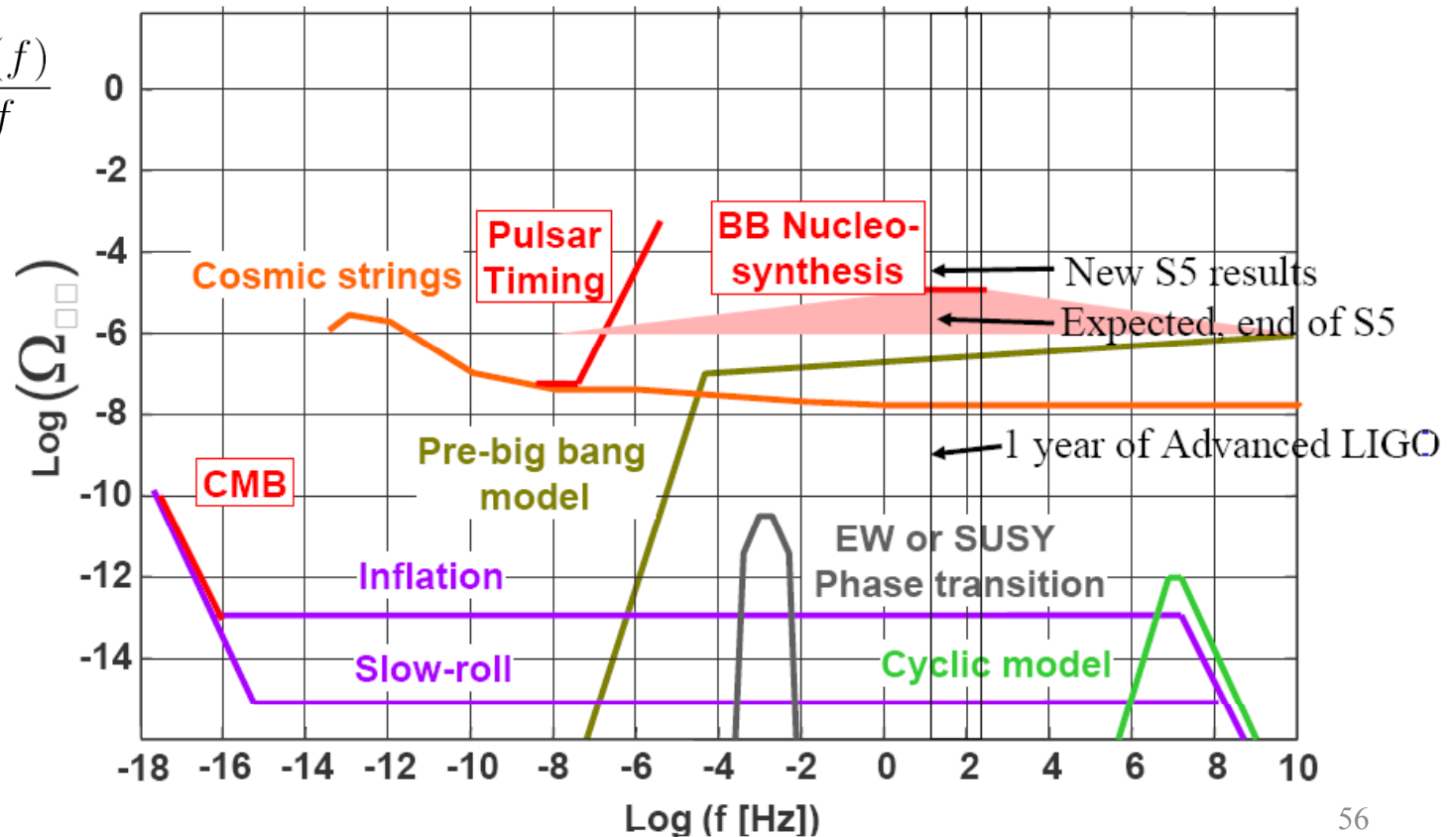


Fond stochastique

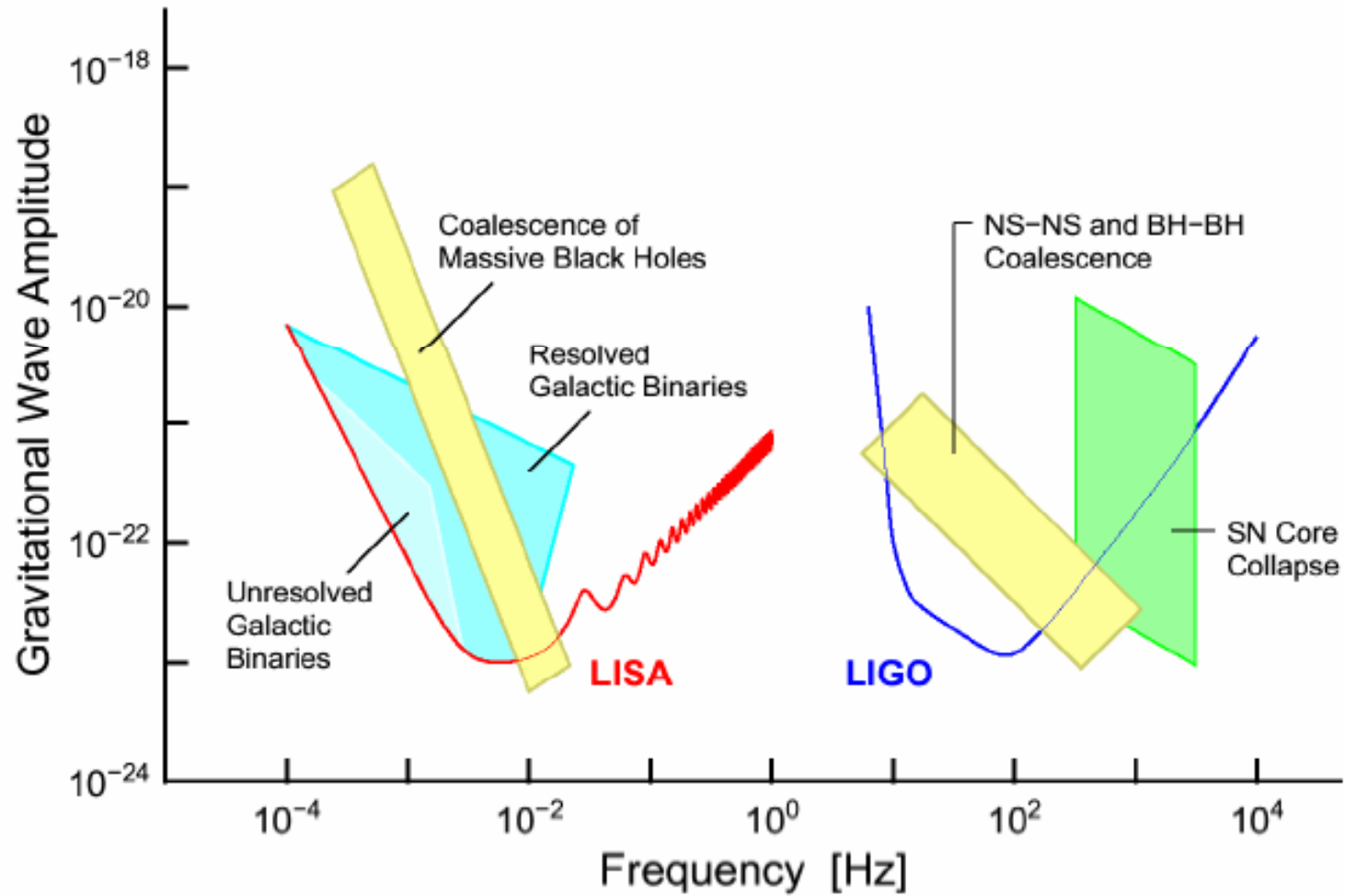
- Corrélation croisée entre deux détecteurs: l'un sert de filtre pour l'autre



$$\Omega_{GW}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{GW}(f)}{d \ln f}$$

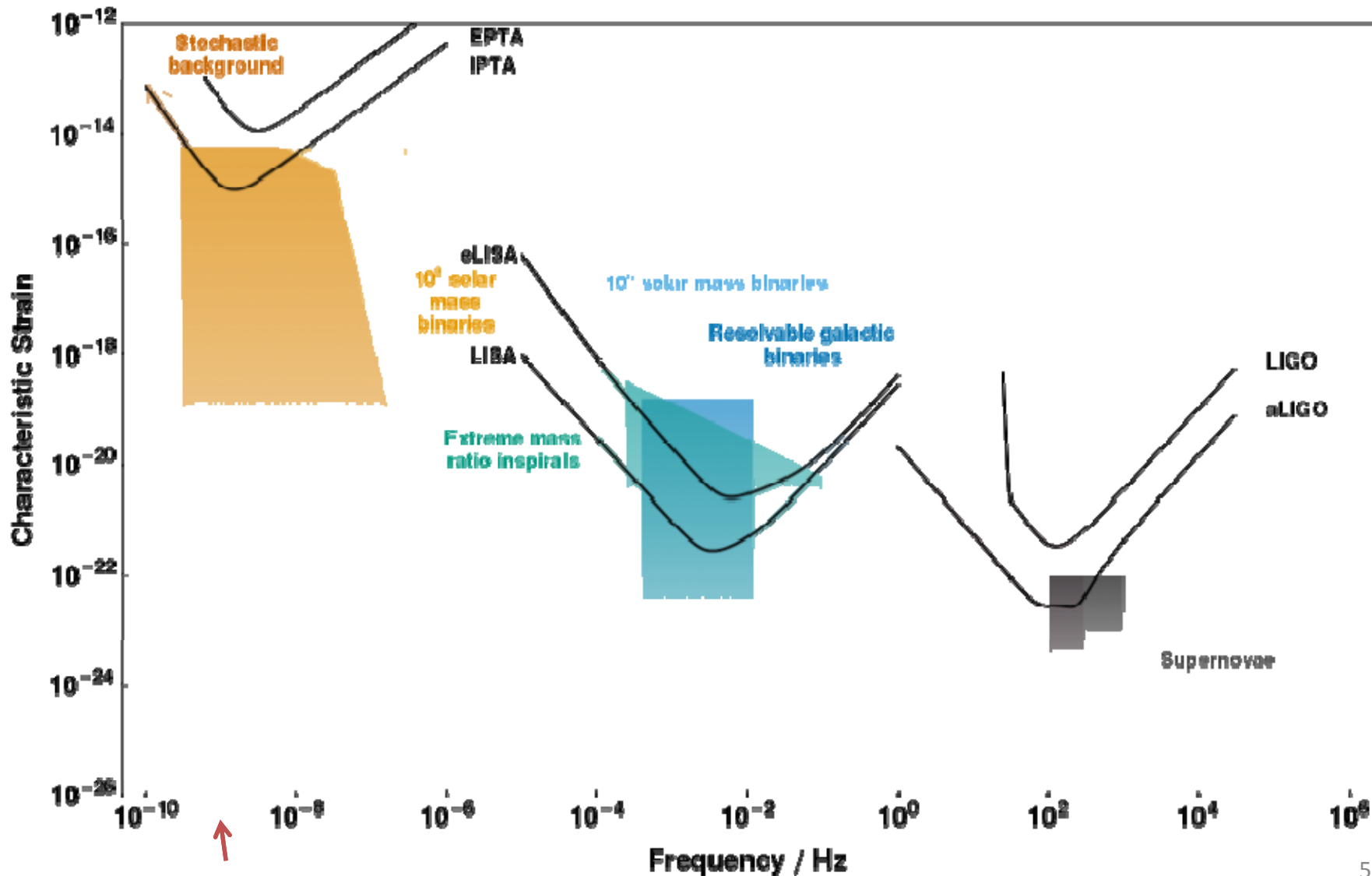


Comparaison Sol et Espace



Avec le timing des pulsars

EPTA: European Pulsar Timing Array -- IPTA International



Nano-fréquence $\lambda \sim 10a1$

Conclusions

Nature particulière des ondes gravitationnelles

- déformation de l'espace
- dues à un quadrupole variable, polarisation + et x, à 45°
- amplitude extrêmement faible 10^{-22}

Equation de RG complexes

→ Approximation PN, relativité numérique

Les sources selon la forme des ondes

- explosion de SN, binaires d'objets compacts
- émission continue des pulsars
- fond stochastique (confusion des sources), ondes du Big-Bang

Détection directe: 2nde génération (réseau LIGO, Virgo..)

3^{ème} génération ET, puis LISA dans l'espace