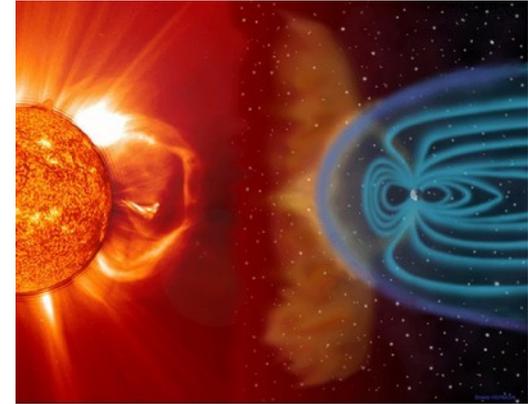
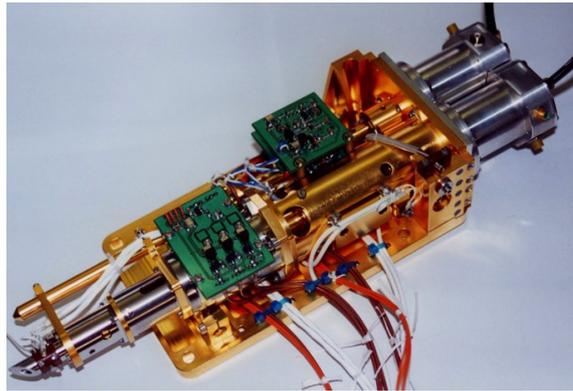


Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace



**Gilles Theureau**  
13 octobre 2017

## Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace

CNRS-Université d'Orléans

environ 25 chercheurs, 30 ingénieurs et techniciens, 11 CDD

OSUC : Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre  
(avec ISTO, Nançay, équipes associées + BRGM, INRA...)

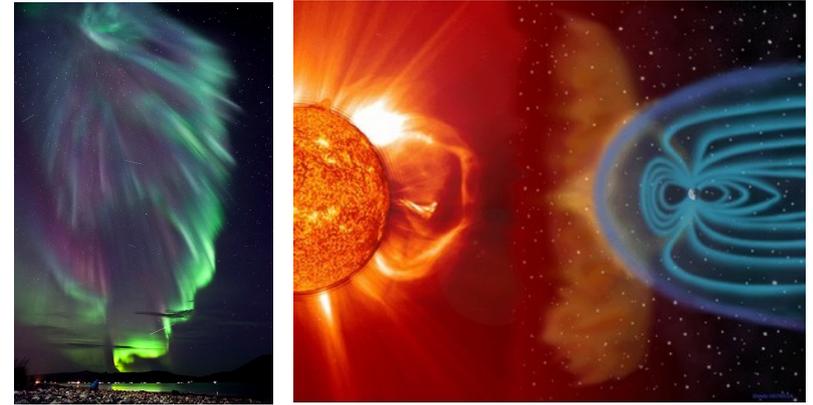
un des “Laboratoires Spatiaux” du CNRS :

*« concevoir, réaliser, exploiter des instruments scientifiques envoyés sur des satellites ou des ballons stratosphériques pour étudier le milieu spatial »*

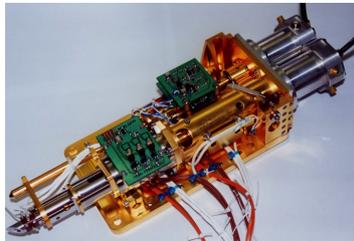
## Plasmas spatiaux

environnement ionisé de la Terre et des planètes  
relations Soleil – Terre (météo de l'espace)  
phénomènes lumineux transitoires  
électricité stratosphérique

capteurs électriques et magnétiques  
sur missions des agences spatiales : CNES, ESA, NASA, JAXA  
Cluster, Demeter, Rosetta, BepiColombo, Taranis, Solar Orbiter, Solar Probe, Juice...

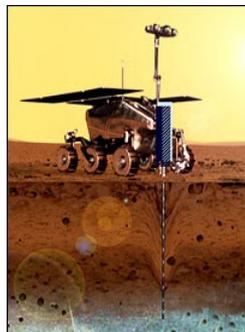


## Planétologie



planètes, astéroïdes, comètes  
poussières, spectrométrie de masse

CASSINI/Huygens  
Rosetta  
JUICE / RPWI  
ExoMars



## Environnement atmosphérique

stratosphère, couche d'ozone  
réchauffement global  
dynamique, chimie aérosols

tests en laboratoire  
expériences en microgravité  
mesures sous ballon et in-situ :  
Spirale, Salomon-N2, ELHYSA,  
STAC, LOAC, Spirit, Species



## **Astrophysique**

Radioastronomie (**pulsars**, magnétosphères planétaires)

I .Cognard, L.Guillemot, J.-M.Griessmeier, G.Theureau + 1 PhD

Physique Fondamentale (force propre, EMRI's)

A.Spallicci + 1PhD

## Astrophysique

Radioastronomie (**pulsars**, magnétosphères planétaires)

I. Cognard, L. Guillemot, J.-M. Griessmeier, G. Theureau + 1 PhD

Physique Fondamentale (f... EMRI's)

A. Spallicci + 1 PhD

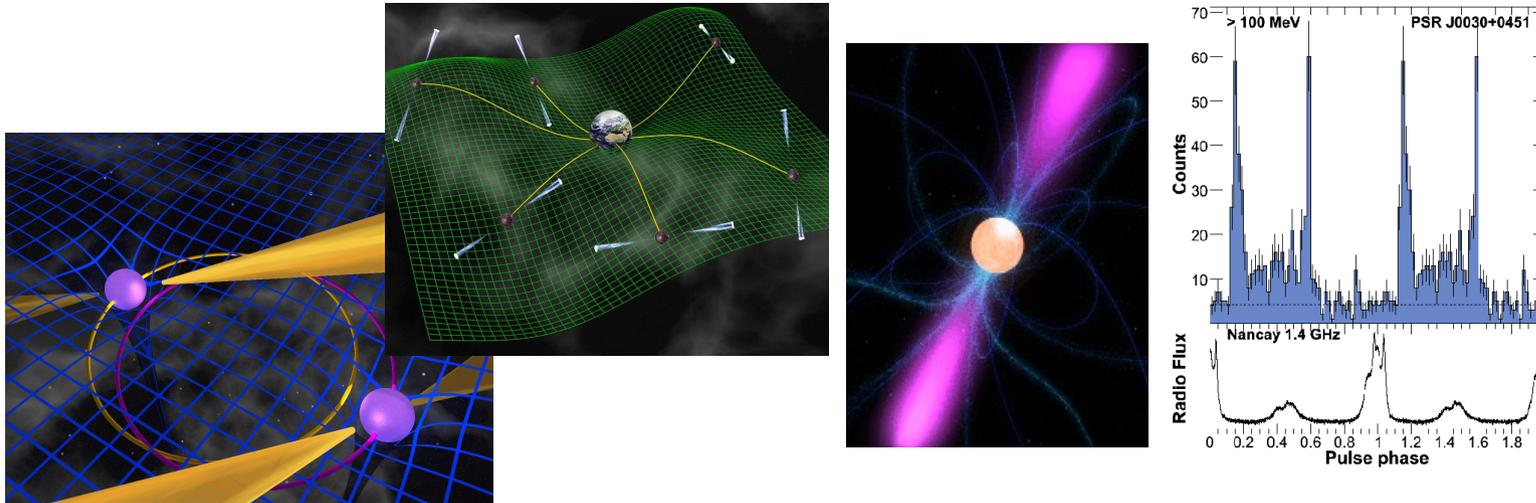
cf présentation  
jeudi après-midi

## Astrophysique

Radioastronomie (**pulsars**, magnétosphères planétaires)

I. Cognard, L. Guillemot, J.-M. Griessmeier, G. Theureau + 1 PhD

**Une longue expérience de la chronométrie radio  
(et gamma) des pulsars et des programmes scientifiques associés**

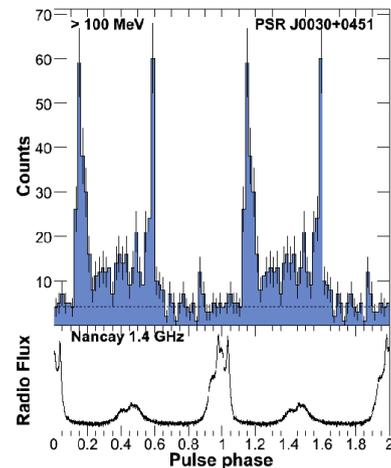
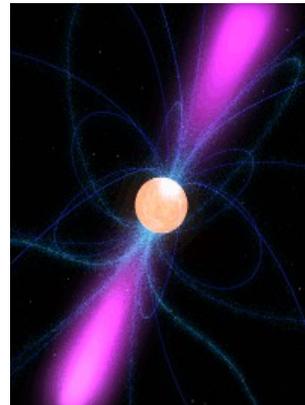
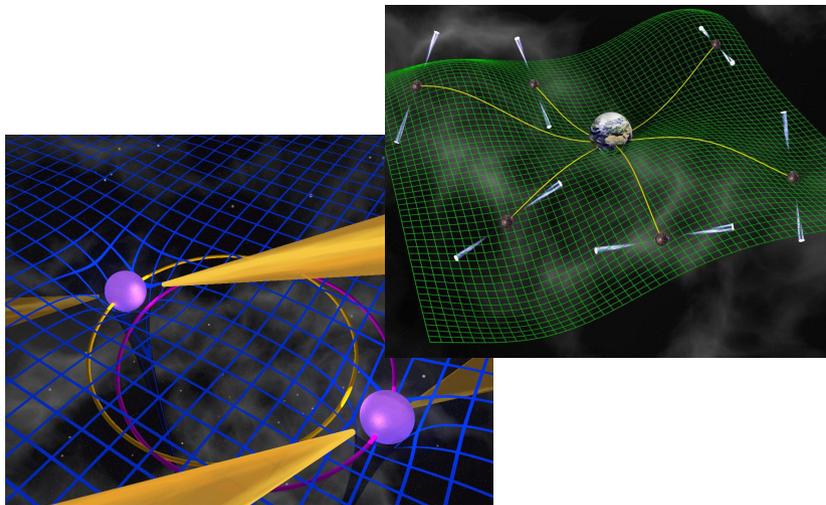


## Astrophysique

Radioastronomie (**pulsars**, magnétosphères planétaires)

I. Cognard, L. Guillemot, J.-M. Griessmeier, G. Theureau + 1 PhD

Une longue expérience de la chronométrie radio  
(et gamma) des pulsars et des programmes scientifiques associés



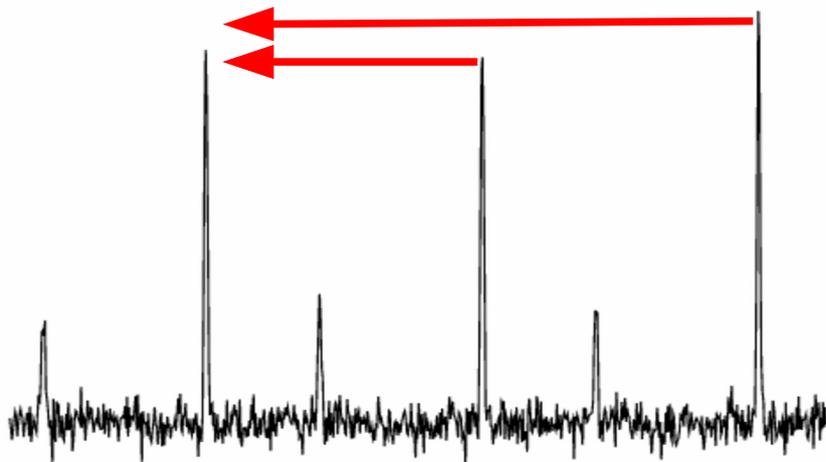
Une connexion forte avec la Station de Radioastronomie de Nançay :  
NRT, LOFAR, NenuFAR

Une implication dans SKA via le pulsar SWG et dans MeerKAT

# La chronométrie des pulsars

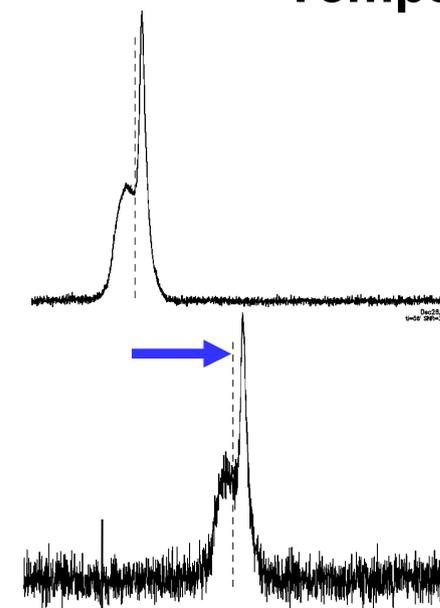
## II - empilement :

On empile le flot de données en phase avec la période apparente du pulsar selon un modèle de rotation



## III – ajustement

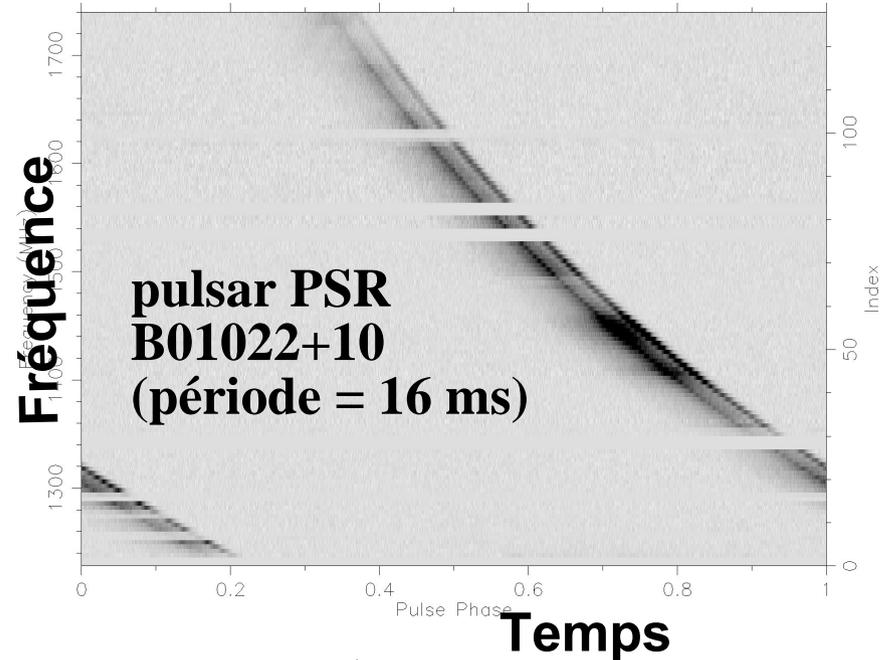
Comparer avec un template et extraire un temps d'arrivée (TOA)



## I - dédispersion

$$\tau = k DM f^{-2}$$

PSR B01022+10 calibP.zap  
 Freq: 1496.588 MHz BW: 512.000 Length: 3762.427 S/N: 1492.396

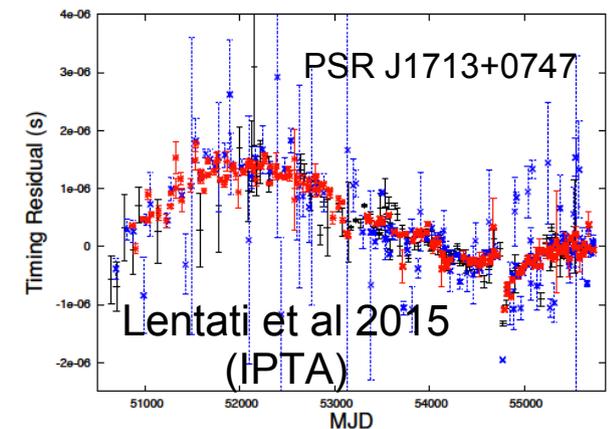
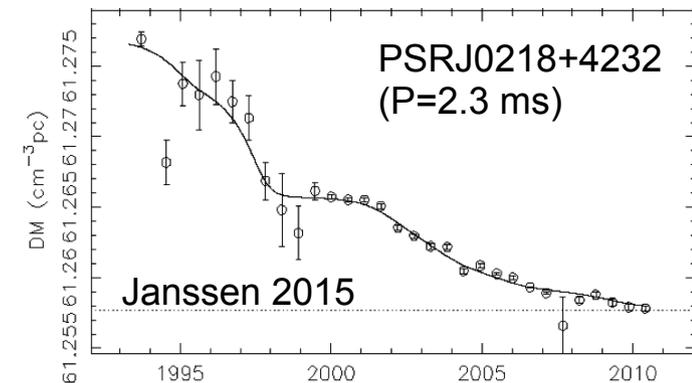
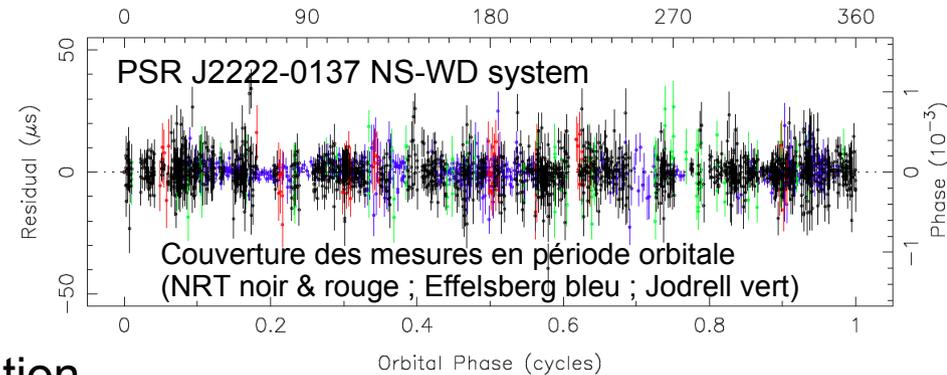


# La chronométrie des pulsars

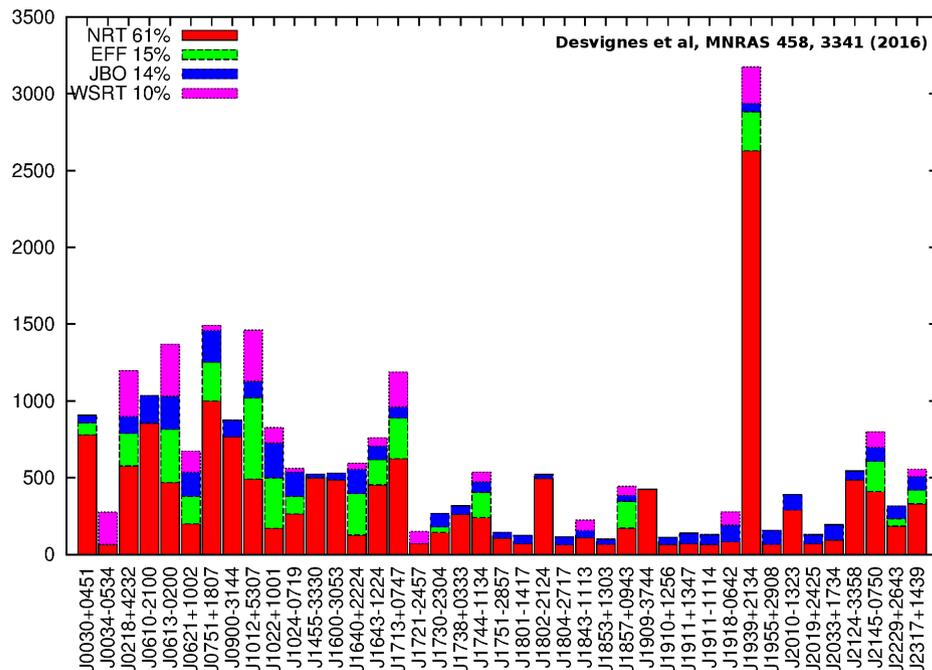
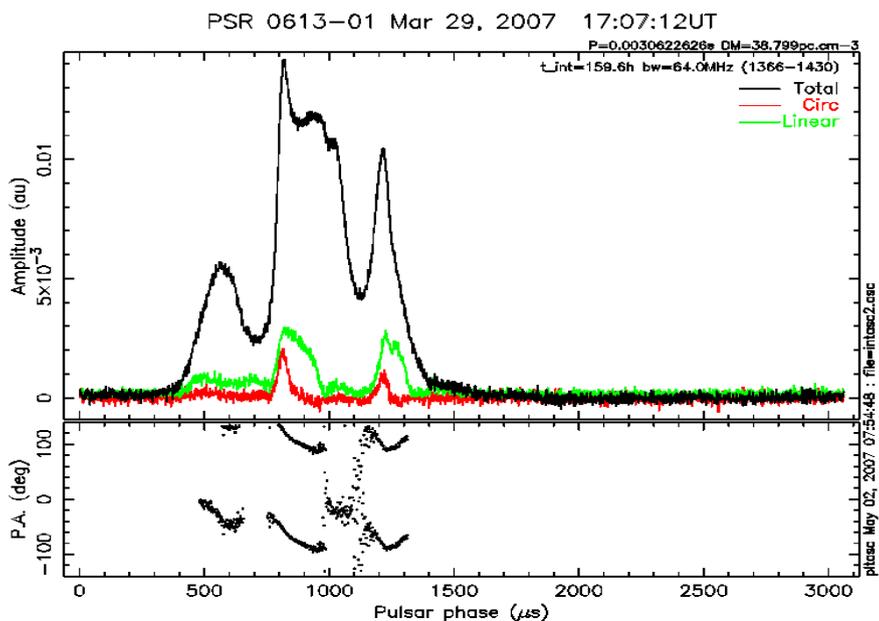
<b>PSR</b>	<b>J2222-0137</b>
RAJ	22:22:05.97117946
DECJ	-01:37:15.7304442
PMRA	44.7300
PMDEC	-5.6800
PX	3.7420
F0	30.471213809046(2)
F1	-5.386(3) $10^{-17}$
DM	3.279668
A1	10.8480255(8)
E	0.00038089(4)
T0	56001.38403(9)
PB	2.4457646(6)
OM	119.93(2)
OMDOT	0.10(1)
GAMMA	0.000004557
PBDOT	0.2643106
SINI	0.9974(2)
M2	1.27(3)
DTHETA	1.791852
XDOT	-0.01(2)
DR	1.6906916
NTOA	925

## Analyse des temps d'arrivées (TOAs)

- Modèle de rotation apparente (Tempo2)
- Stabilité du profil moyen et variations en fréquence
- Caractérisation de la dispersion interstellaire
- Caractérisation d'un « bruit rouge » intrinsèque

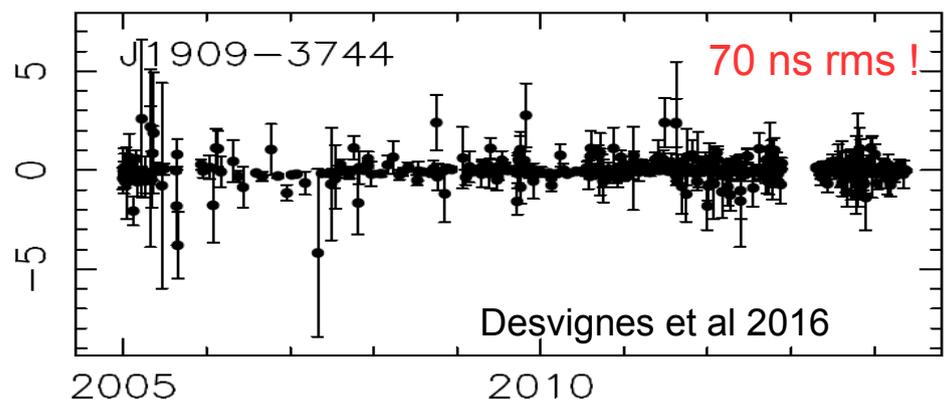
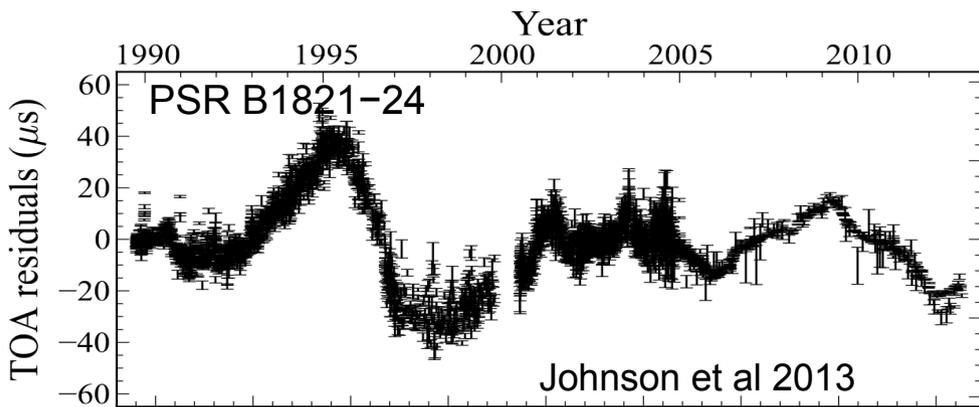


# Performances du NRT



**Résidus des TOAs : rms sur 6 ans avec NUPPI 512 MHz :**

- N(rms < 500 ns) = 15**
- N(rms < 800 ns) = 30**
- N(rms < 1 μs) = 40**



# Chronométrie des systèmes binaires :

→ mesure de  $\dot{P}_b$  et  $\dot{\omega}$  + ecc et masses

Systèmes double étoiles à neutrons NS-NS  
 Systèmes étoile-à-neutron / naine blanche NS-WD

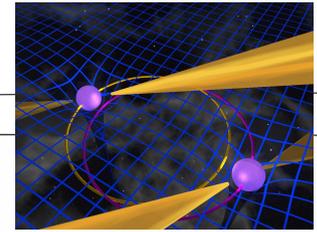
→ mesure du quadrupole

$$\dot{P}_b^{\text{GR}} = -\frac{192\pi}{5} \frac{m_p m_c}{M^2} \frac{1 + 73e^2/24 + 37e^4/96}{(1 - e^2)^{7/2}} \frac{V_b^5}{c^5}$$

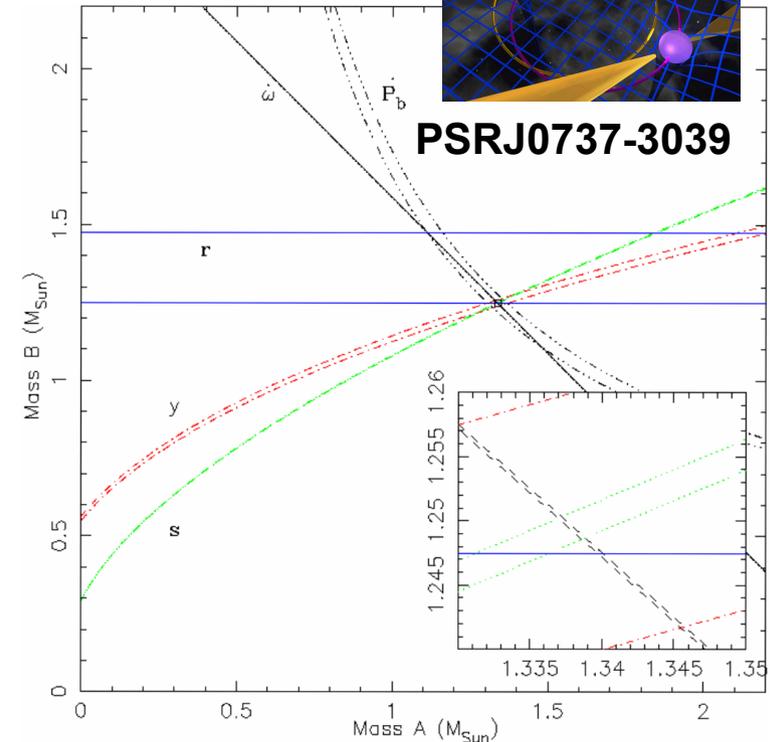
→ contrainte sur l'émission dipolaire

$$\dot{P}_b(\text{dipolar}) \propto (\alpha_{NS} - \alpha_{WD})^2 \quad 0?$$

→ mesure des deux masses et contraintes sur l'EoS



PSRJ0737-3039



$M_A = 1.3381(7)M_{\odot}$  et  $M_B = 1.2498(7)M_{\odot}$

# Chronométrie des systèmes binaires :

→ mesure de  $\dot{P}_b$  et  $\dot{\omega}$  + ecc et masses

Systèmes double étoiles à neutrons NS-NS  
Systèmes étoile-à-neutron / naine blanche NS-WD

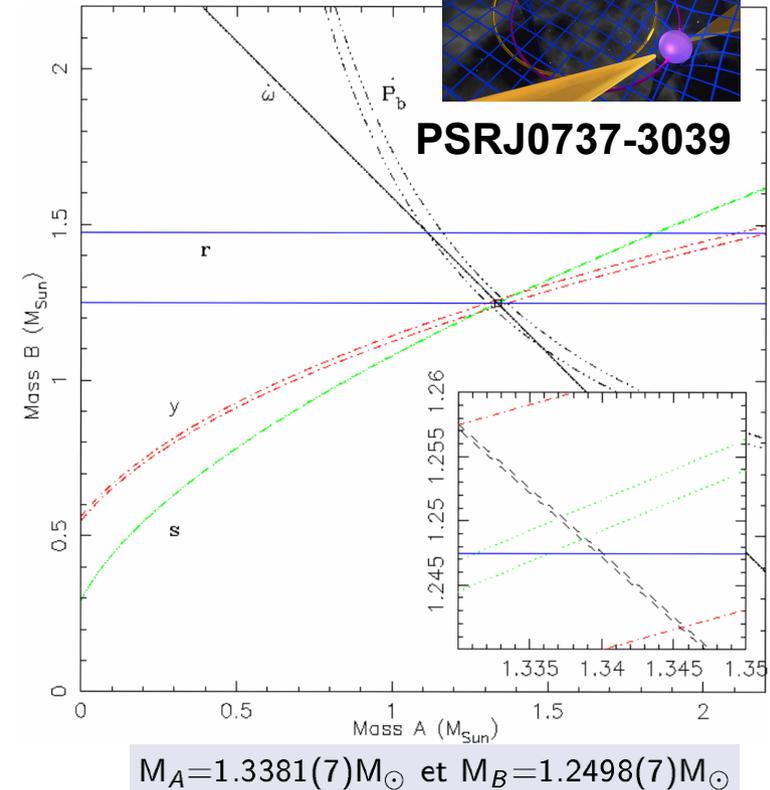
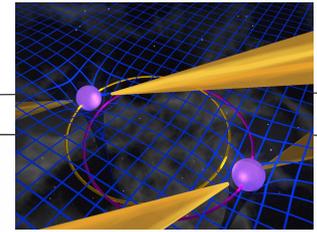
→ mesure du quadrupole

$$\dot{P}_b^{\text{GR}} = -\frac{192\pi}{5} \frac{m_p m_c}{M^2} \frac{1 + 73e^2/24 + 37e^4/96}{(1 - e^2)^{7/2}} \frac{V_b^5}{c^5}$$

→ contrainte sur l'émission dipolaire

$$\dot{P}_b(\text{dipolar}) \propto (\alpha_{NS} - \alpha_{WD})^2 \quad 0?$$

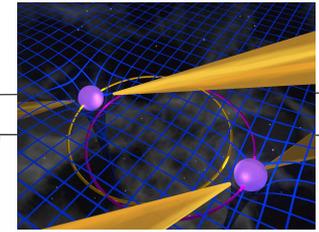
→ mesure des deux masses et contraintes sur l'EoS



**Exemple record de PSR1748-2446 :  $P_b = 1.8$  h →  $f = 2/P = 3 \cdot 10^{-4}$  Hz**

100 binaires connues avec  $P_b < 1$  jour (dont 30 dans 2 kpc, 10 NS-NS)

SKA : 100 systèmes NS-NS , éventuellement certains extrêmement relativistes + **NS-BH ?**



## Chronométrie des systèmes binaires :

→ mesure de  $\dot{P}_b$  et  $\dot{\omega}$  + ecc et masses

Systèmes double étoiles à neutrons NS-NS  
Systèmes étoile-à-neutron / naine blanche NS-WD

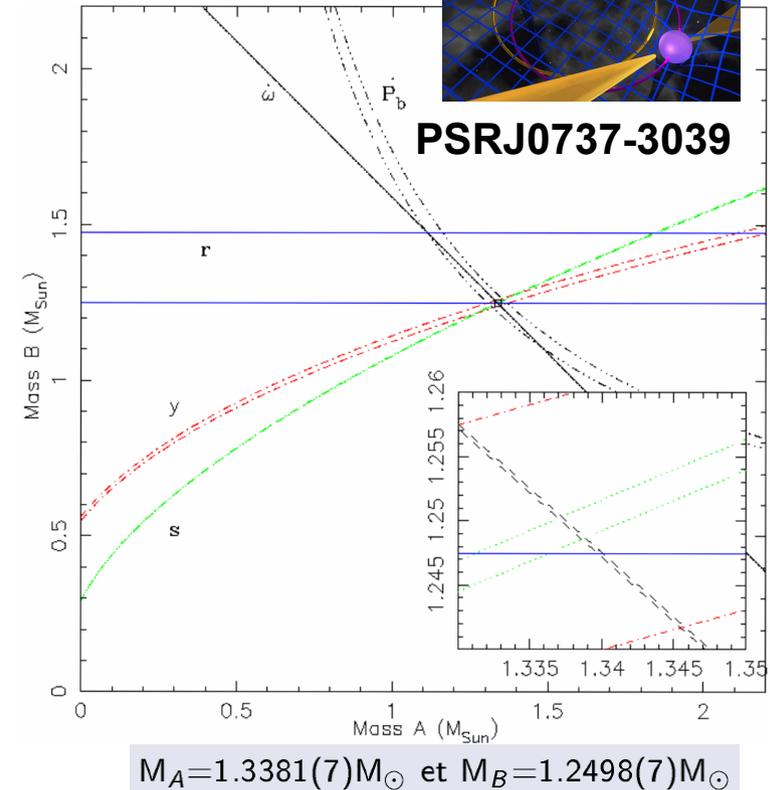
→ mesure du quadrupole

$$\dot{P}_b^{\text{GR}} = -\frac{192\pi}{5} \frac{m_p m_c}{M^2} \frac{1 + 73e^2/24 + 37e^4/96}{(1 - e^2)^{7/2}} \frac{V_b^5}{c^5}$$

→ contrainte sur l'émission dipolaire

$$\dot{P}_b(\text{dipolar}) \propto (\alpha_{NS} - \alpha_{WD})^2 \quad 0?$$

→ mesure des deux masses et contraintes sur l'EoS



**Exemple record de PSR1748-2446 :  $P_b = 1.8$  h →  $f = 2/P = 3 \cdot 10^{-4}$  Hz**

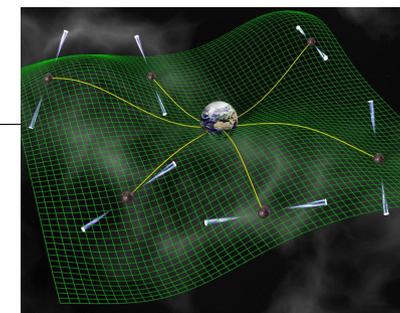
100 binaires connues avec  $P_b < 1$  jour (dont 30 dans 2 kpc, 10 NS-NS)

SKA : 100 systèmes NS-NS , éventuellement certains extrêmement relativistes + **NS-BH ?**

**Alternativement : SKA recherche de nouveaux systèmes détectés par LISA entre  $10^{-5}$  et  $10^{-3}$  Hz**

LISA : 1-10 deg<sup>2</sup> vs SKA\_low FoV : 1 deg<sup>2</sup> à 350 MHz (600 m core, 0.05 mJy)

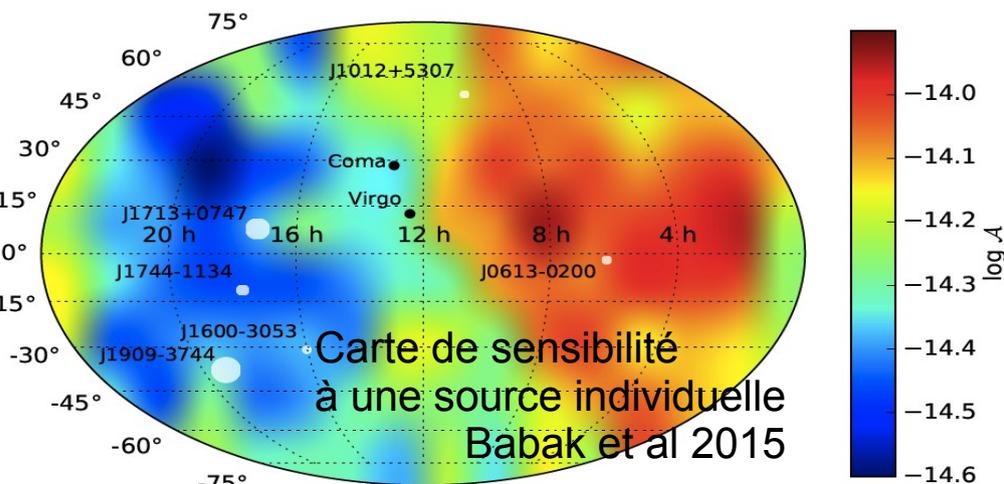
$P_b$  connue → pas de recherche en accélération !



# Pulsar Timing Arrays

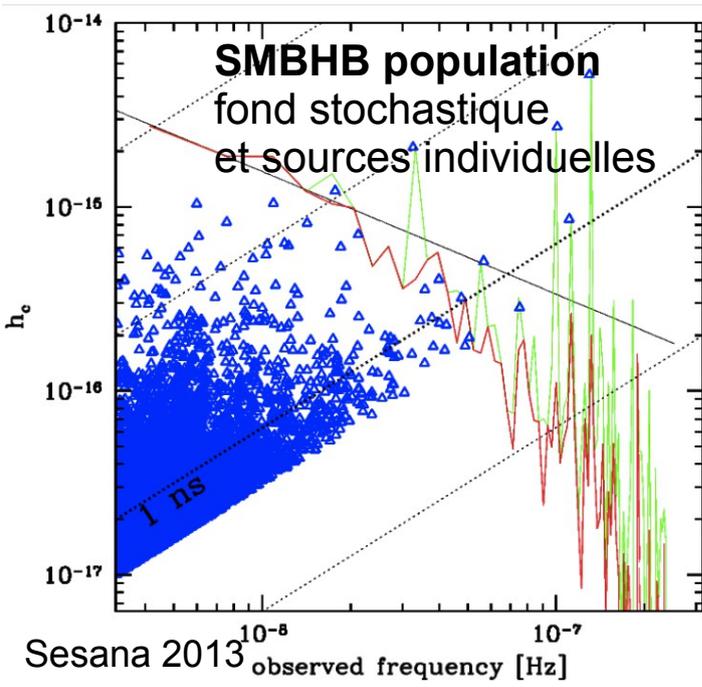
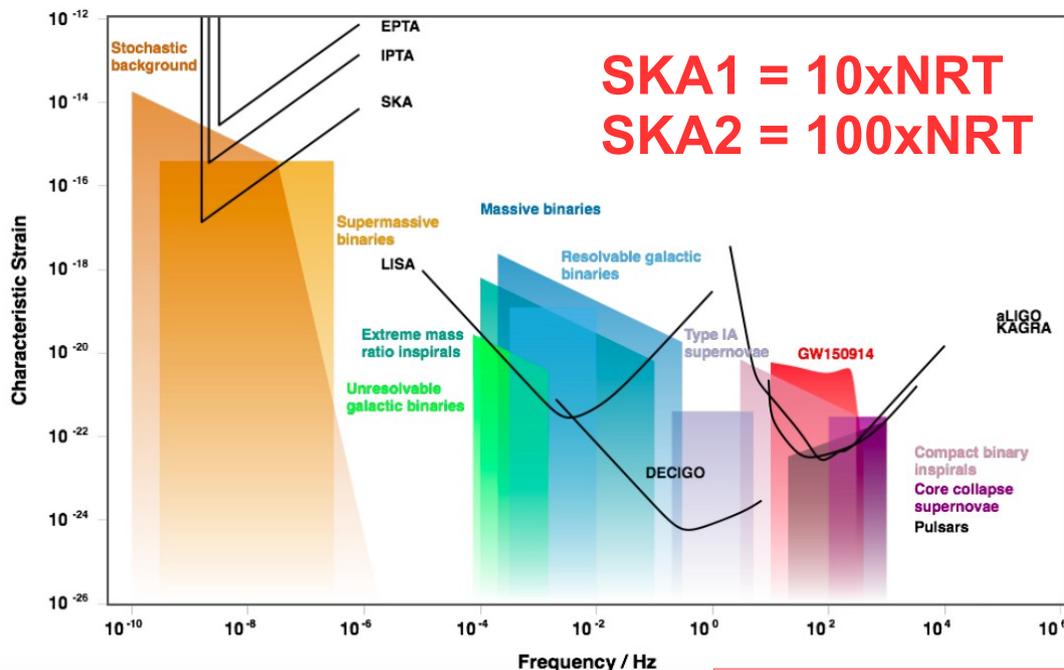
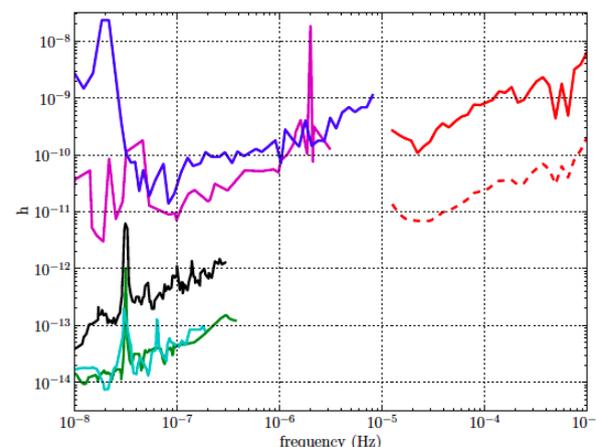
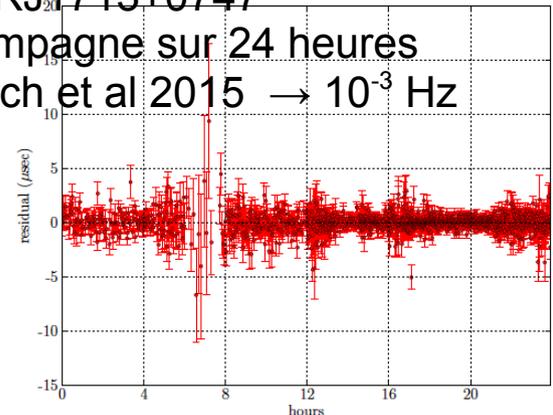
Détection du fond d'ondes gravitationnelles

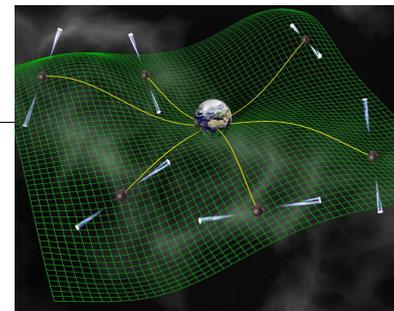
basse fréquences :  $10^{-9} - 10^{-6}$  Hz  
 $h \sim 10^{-15}$



Même population, certaines sources vues par LISA quelques dizaines d'années plus tard

PSRJ1713+0747  
 Campagne sur 24 heures  
 Dolch et al 2015  $\rightarrow 10^{-3}$  Hz



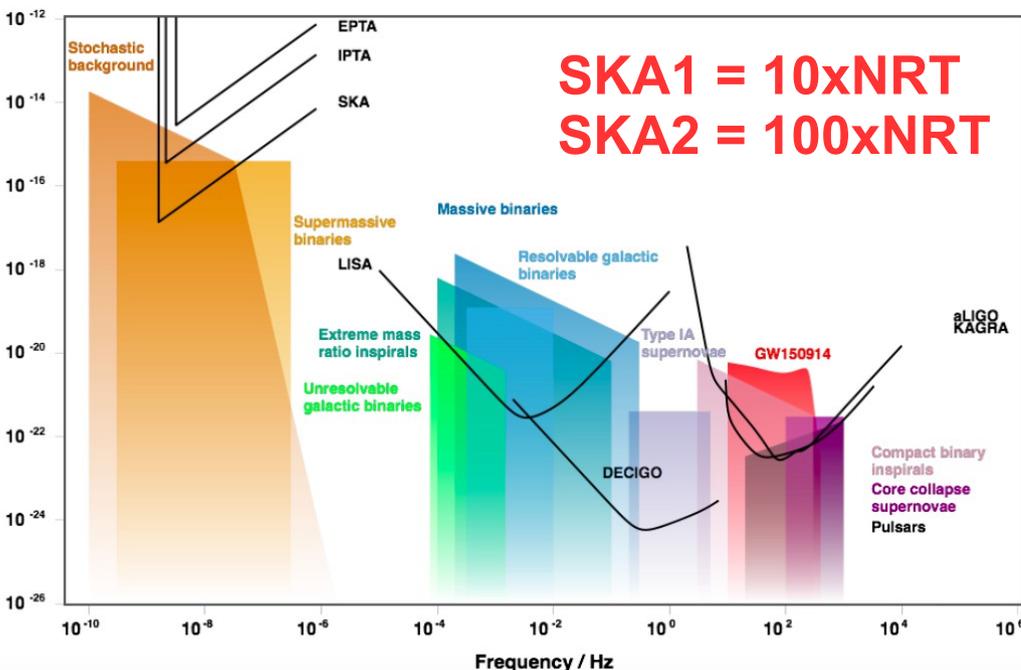
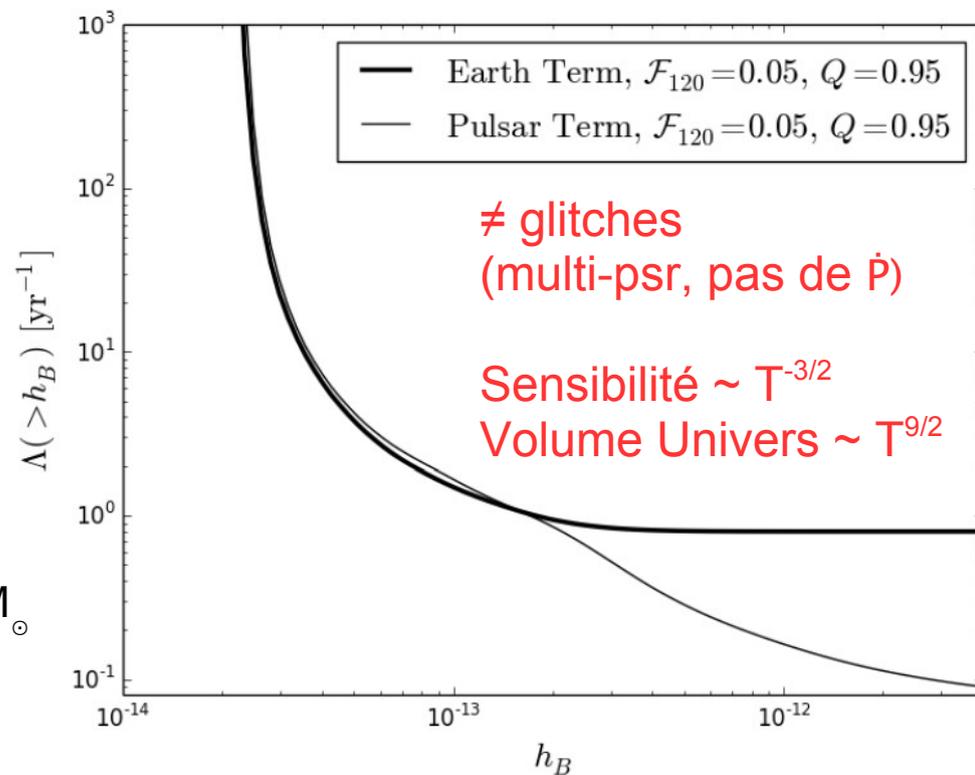


# Pulsar Timing Arrays

## Détection du fond d'ondes gravitationnelles

basse fréquences :  $10^{-9} - 10^{-6}$  Hz  
 $h \sim 10^{-15}$

Arzoumanian et al 2016  
 avec 5 ans de données NANOGRAV



**SKA1 = 10xNRT**  
**SKA2 = 100xNRT**

### « bursts with memory »

(Finn & Lommen 2010, Amaro-Seoane et al 2010)

- SMBHB coalescence
- SMBHB orbite très elliptique/hyperbolique
- SMBH triplets

→ un changement permanent dans la métrique

$$h_B \approx 1.5 \times 10^{-12} \left( \frac{\mu}{10^9 M_\odot} \right) \left( \frac{1 \text{ Mpc}}{D_L} \right)$$

Échelle de temps de l'évènement  $\sim 1$  jour pour  $M_{pm} \sim 10^9 M_\odot$

Détectable par PTA :  $M = 10^8 M_\odot$  à  $z \sim 0.1$

Mais rare 0.75 – 1.5 / an au dessus de  $h = 10^{-13}$