

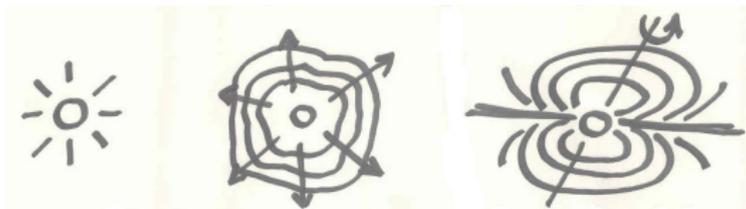
# Etat de l'art de la détection radio des pulsars

Ismaël Cognard

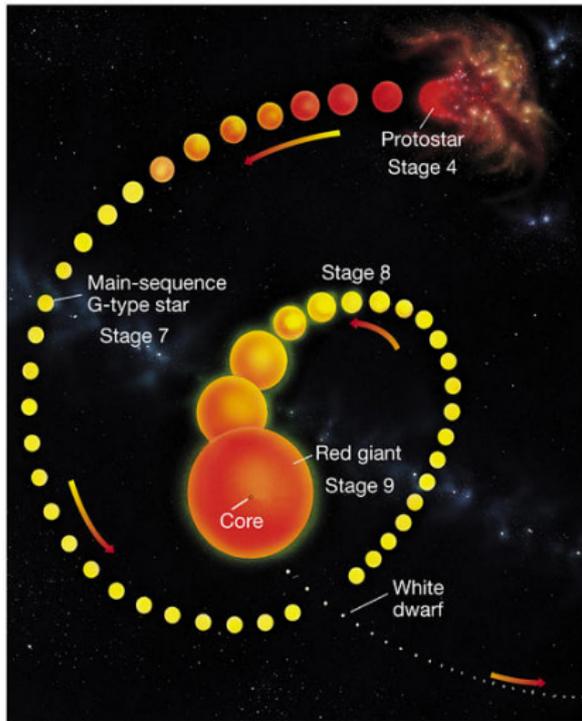
icognard@cnsr-orleans.fr  
LPC2E, CNRS et Université d'Orléans



## Les pulsars millisecondes : des horloges cosmiques



## La vie d'une étoile



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

### fusion nucléaire

Un nuage d'hydrogène se contracte, s'embrase et se consume puis s'éteint ...

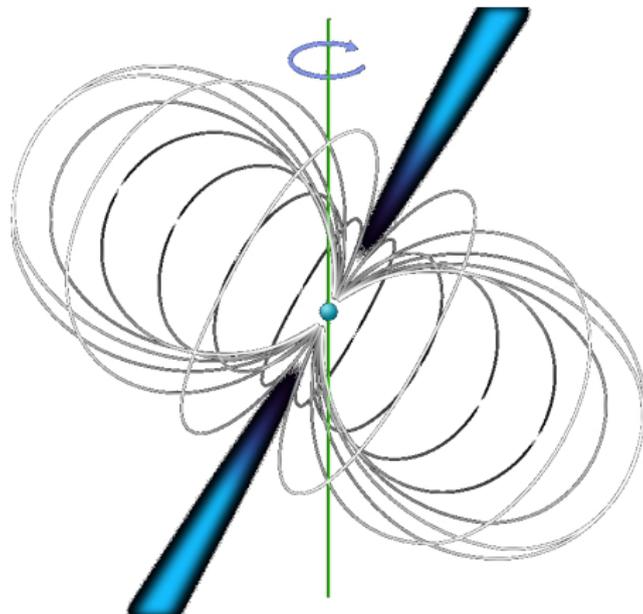
La durée et la fin de cette évolution dépendent étroitement de la masse de l'étoile :

au-dessous  $\sim 10M_{\odot}$  → naine blanche

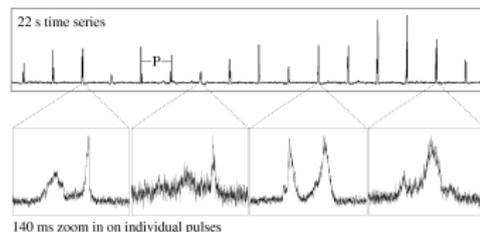
$\sim 10\text{-}20M_{\odot}$  → **étoile à neutrons**

au-dessus  $\sim 20M_{\odot}$  → trou noir

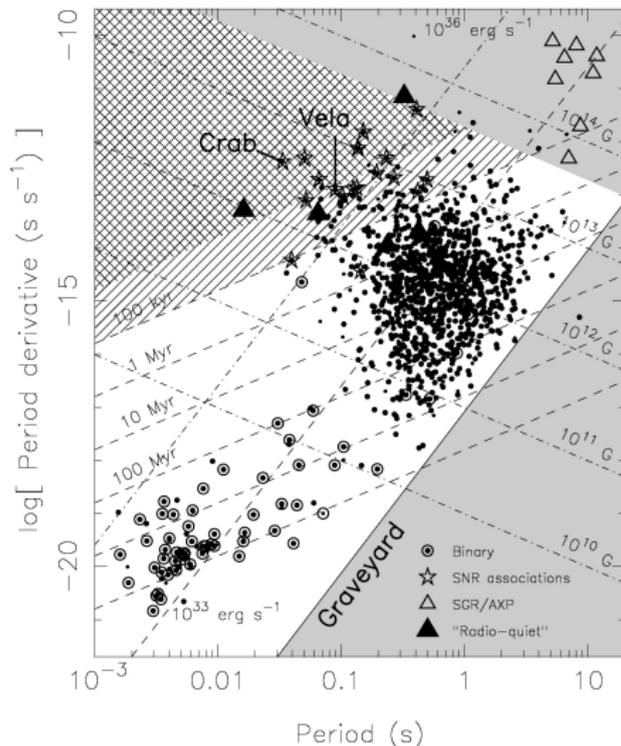
## Le pulsar : une étoile à neutrons magnétisée



Comme  
un phare au bord de la mer,  
les faisceaux radio  
interceptent  
le radiotélescope  
à chaque tour,  
produisant  
des impulsions régulières



## Une stabilité de rotation exceptionnelle



### Une première vie très courte...

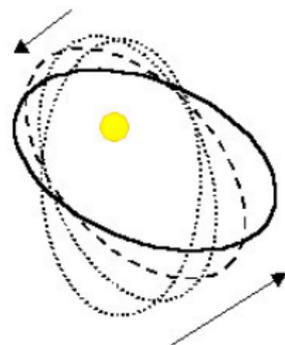
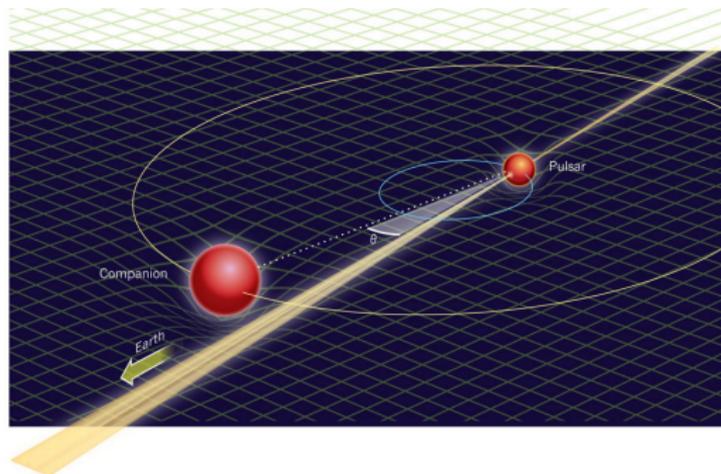
Après une naissance à  $\sim 30$ ms, le pulsar ralentit fortement et cesse d'émettre en quelques dizaines de millions d'années.

### ... puis l'éternité !

Ceux encore présents dans un système binaire se font ré-accélérer, et émettent à nouveau en radio, ce sont

les pulsars millisecondes recyclés à la stabilité de rotation exceptionnelle !

## Un pulsar double et... des effets spéciaux



### Effets relativistes

Les **accélérations importantes** subies par les deux étoiles à neutrons compactes pendant leur mouvement orbital respectif produisent des **effets "relativistes"**, détectables par le biais de **paramètres dits "post-Képlériens"** :

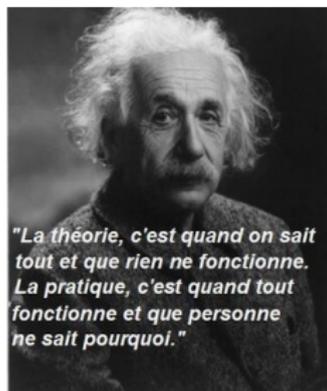
avance du périastre :  $d\omega/dt$

diminution de la période orbitale :  $dP_b/dt$

retard Shapiro :  $r, s$

## les effets relativistes en Relativité Générale

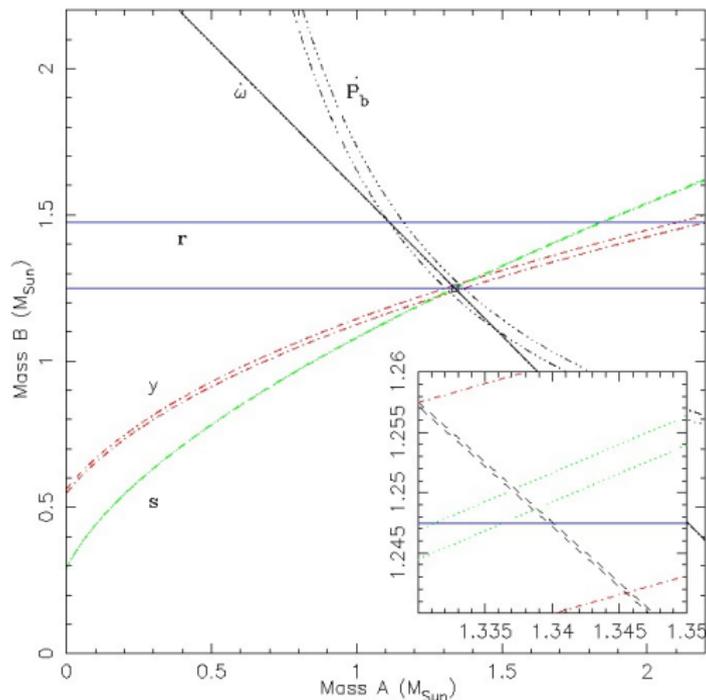
En Relativité Générale, les paramètres " post-képlériens" s'expriment selon :



$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= 3T_{\odot}^{2/3} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \frac{1}{1-e^2} (M_A + M_B)^{2/3}, \\ \gamma &= T_{\odot}^{2/3} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{1/3} e \frac{M_B(M_A + 2M_B)}{(M_A + M_B)^{4/3}}, \\ \dot{P}_b &= -\frac{192\pi}{5} T_{\odot}^{5/3} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \frac{(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4)}{(1-e^2)^{7/2}} \frac{M_A M_B}{(M_A + M_B)^{1/3}}, \\ r &= T_{\odot} M_B, \\ s &= T_{\odot}^{-1/3} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-2/3} x \frac{(M_A + M_B)^{2/3}}{M_B},\end{aligned}$$

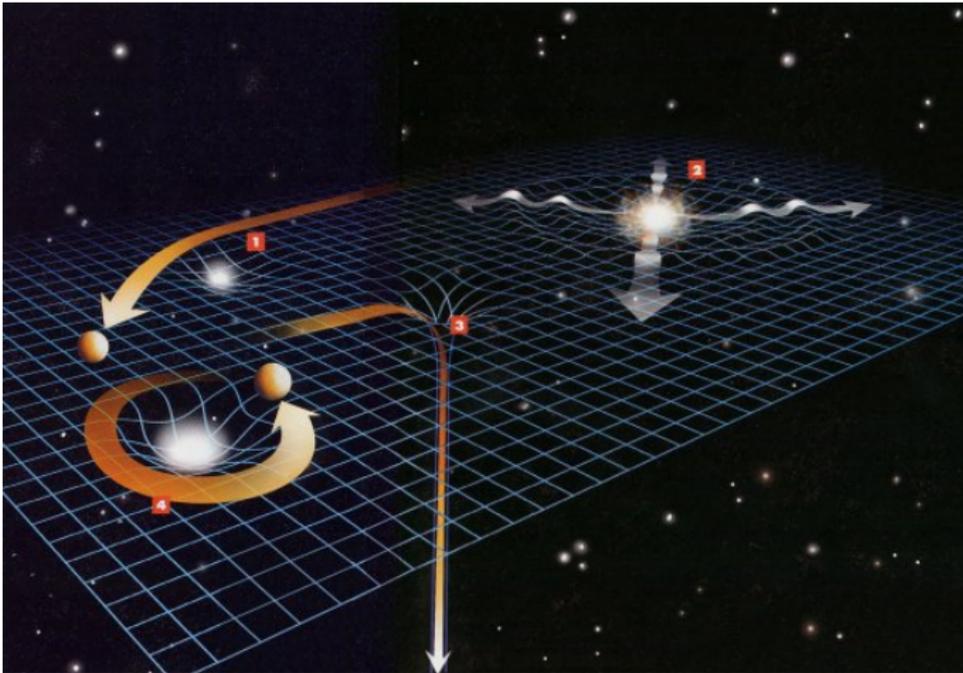
et il est possible pour chaque mesure d'un paramètre donné  
 d'en déduire des contraintes sur les masses (diagramme masse-masse).

# le pulsar double J0737-3039A observé à Nançay

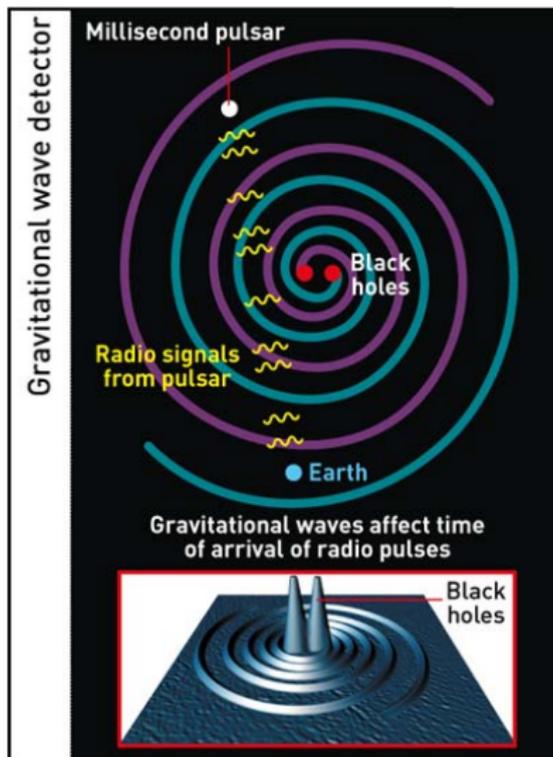


$$M_A = 1.3381(7)M_{\odot} \quad M_B = 1.2498(7)M_{\odot}$$

## Les ondes gravitationnelles ...



... perturbent la propagation des ondes radio



# Recherche d'un fond d'ondes gravitationnelles

## Diverses sources...

Trous noirs binaires  
super-massifs

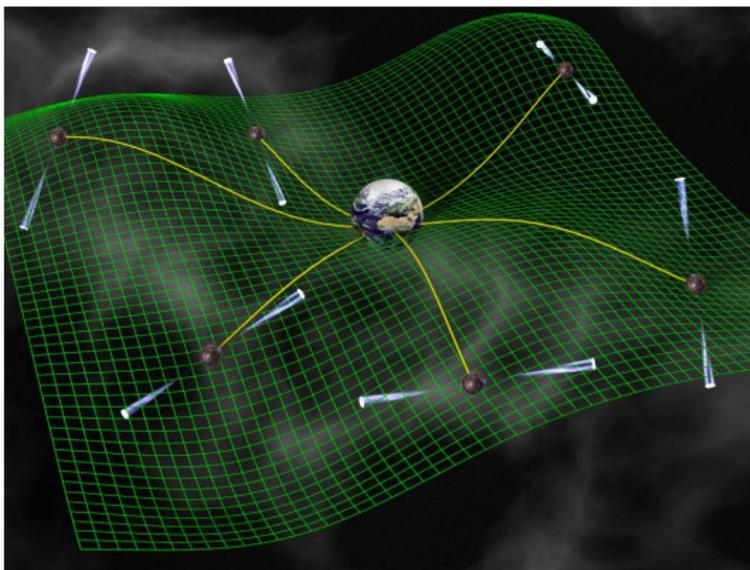
Fond cosmologique

Cordes cosmiques vibrantes

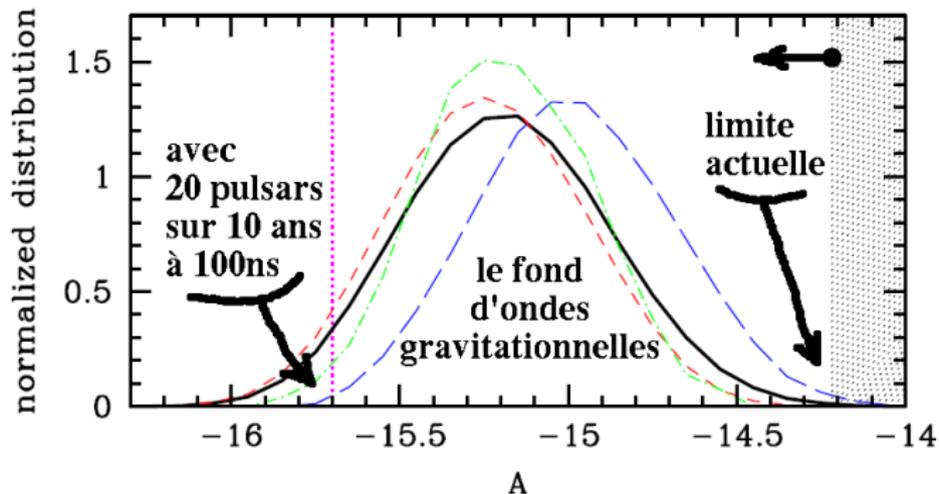
## Corréler...

Sur un ensemble de pulsars  
bien répartis sur le ciel,  
il s'agit de chercher  
un bruit corrélé  
provenant de l'effet  
des ondes gravitationnelles  
sur la Terre.

→ Pulsar Timing Array  
(PTA : EPTA, PPTA, ... )



## Une détection à court, moyen... ou long terme ?



Distribution normalisée de l'amplitude attendue des ondes gravitationnelles  
Sesana, MNRAS 433, L1, 2013

## Découvrir, dédisperser et chronométrer



## Difficulté 1 : le milieu interstellaire ionisé

Un plasma froid,  
ionisé et dispersif

Un retard chromatique

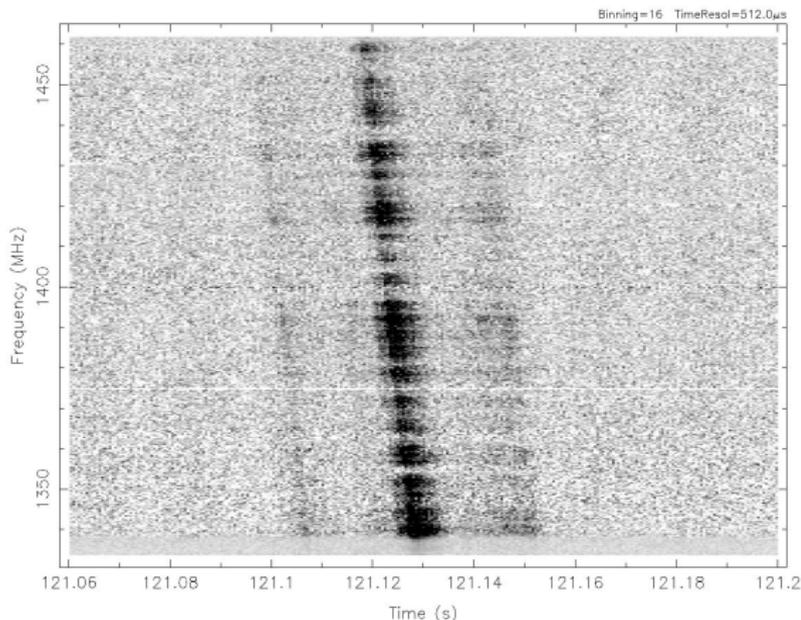
$$t = k \frac{DM}{f^2}$$

avec  $k$  une constante et

**DM** la 'mesure de  
dispersion',

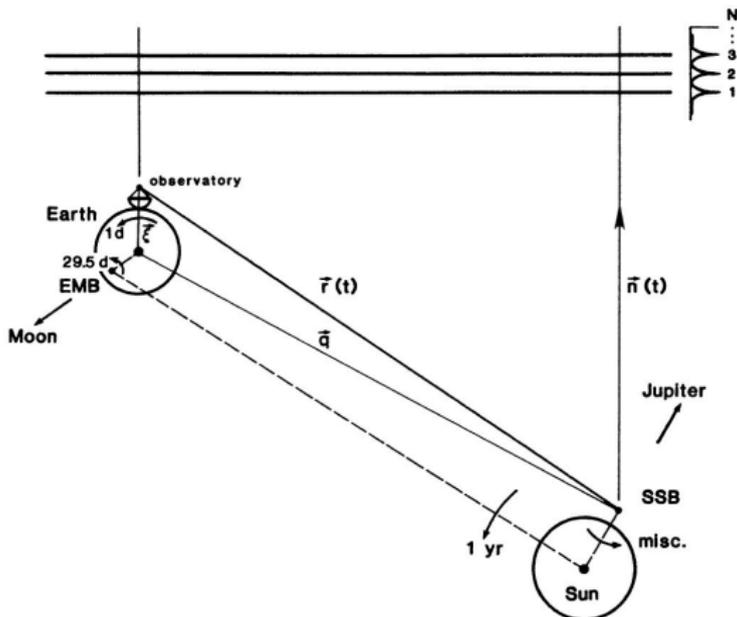
contenu électronique intégré  
le long de la ligne de visée :

$$DM = \int n_e dl$$



Une impulsion de pulsar PSR B0329+54  
de  $DM = 26.8 \text{ pc} \cdot \text{cm}^{-3}$  (140ms, 128MHz)

## Difficulté 2 : Le doppler



Le radiotélescope est animé d'un **mouvement** complexe par rapport au pulsar produisant, par **effet Doppler**, une **variation** importante de sa **période apparente**

## Découvrir de nouveaux pulsars...

des centaines/milliers de canaux sur des centaines de MHz  
intensité totale sur 2-4bits échantillonnée à 50-100 $\mu$ s

### une recherche en **périodicité**

sensibilité de la Transformée de Fourier utilisée pour chercher des pulsars faibles  
les impulsions individuelles étant bien trop faibles pour être détectées directement

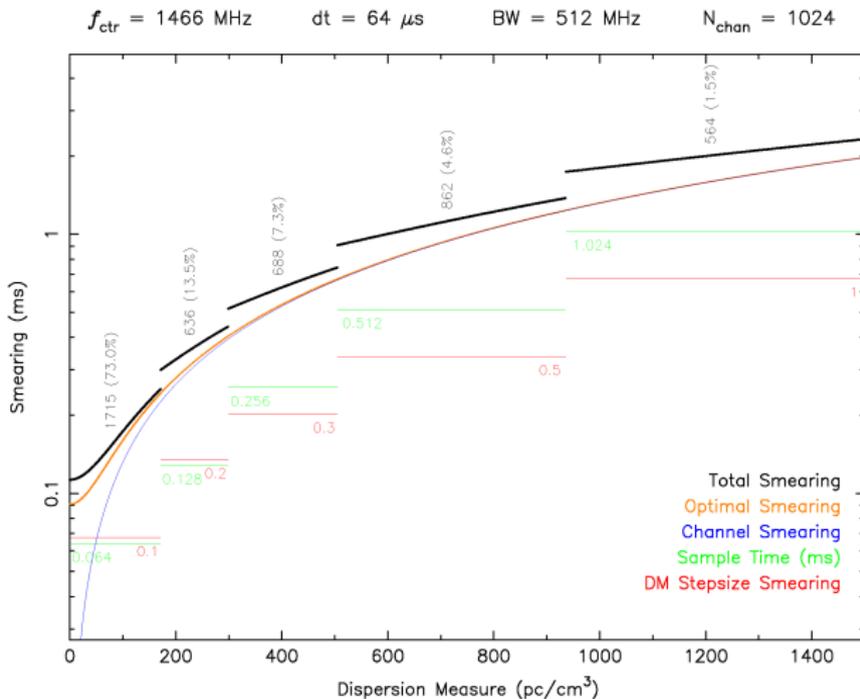
### une recherche d'**impulsions individuelles**

utilisée pour rechercher tout évènement impulsionnel dispersé  
(possible quasiment en temps réel sur les radiotélescopes actuels)

## Recherche de périodicité Fourier

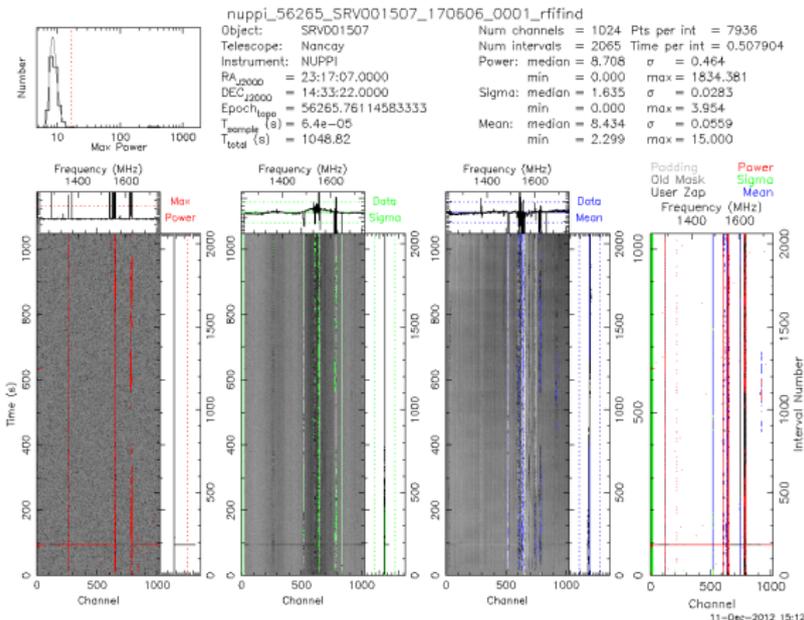
- **concaténer** les éventuels **multiples fichiers** d'une observation donnée
- pour **tous les DMs** désirés :
  - **dédisperser**
  - calcul de la **transformée de Fourier**
  - recherche de **candidats** (en accélération ou pas)
- **compilation** des candidats pour extraire les plus réalistes
- **empilement** et calculs **supplémentaires** sur une **sélection** de qq dizaines de candidats
- **inspection** des candidats sélectionnés et **décision**

## Choix des multiples DMs



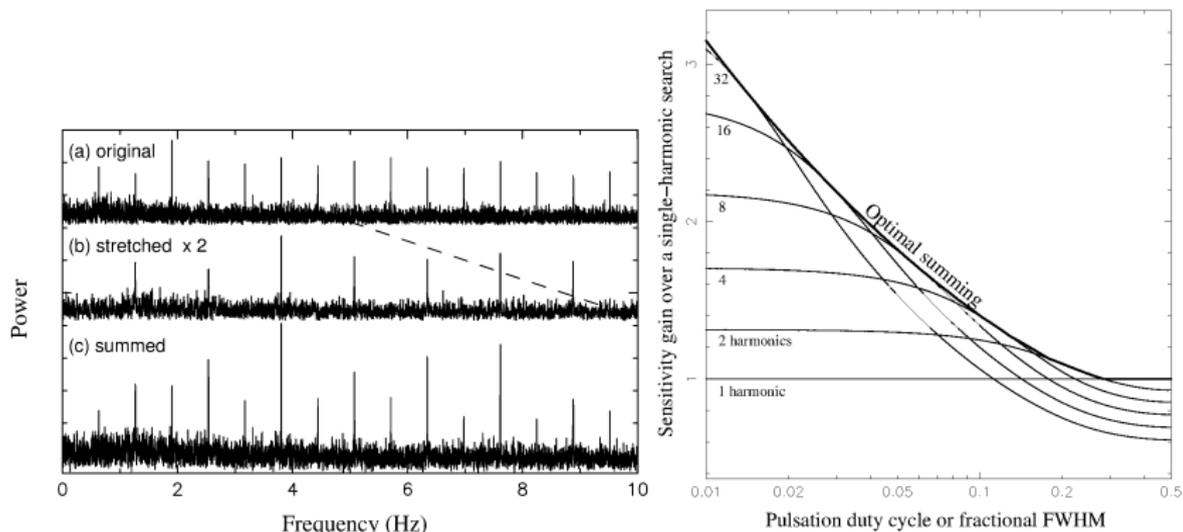
Sortie d'un outil d'aide à la construction d'un 'plan' de DMs utilisé pour la recherche SPAN512 en cours au radiotélescope de Nançay.  
 Ici, il faut dédisperser pour 4465 valeurs de DM différentes !

# Excision des parasites



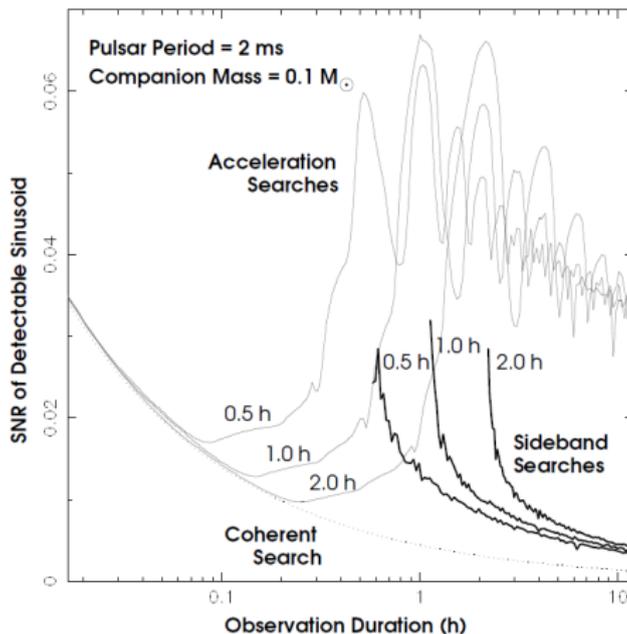
Des petits pavés de l'espace temps-fréquence sont exclus en se basant sur puissance, rms et moyenne.

## Empilement d'harmoniques



8 harmoniques sont en général intégrées dans les recherches actuelles

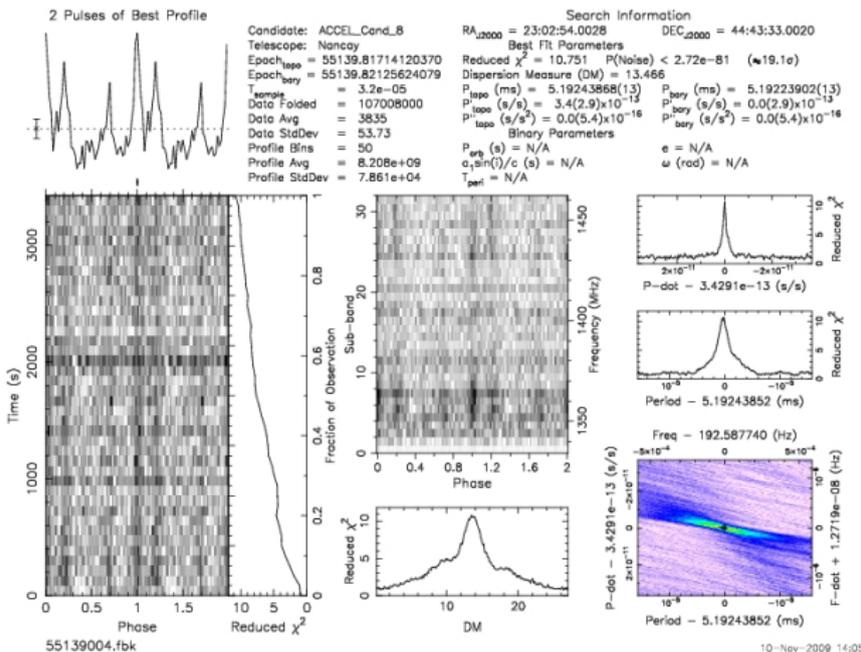
## Recherche en accélération



Efficacité comparée de différentes méthodes de recherche en accélération  
Ransom, PhD thesis, Harvard Univ., 2001

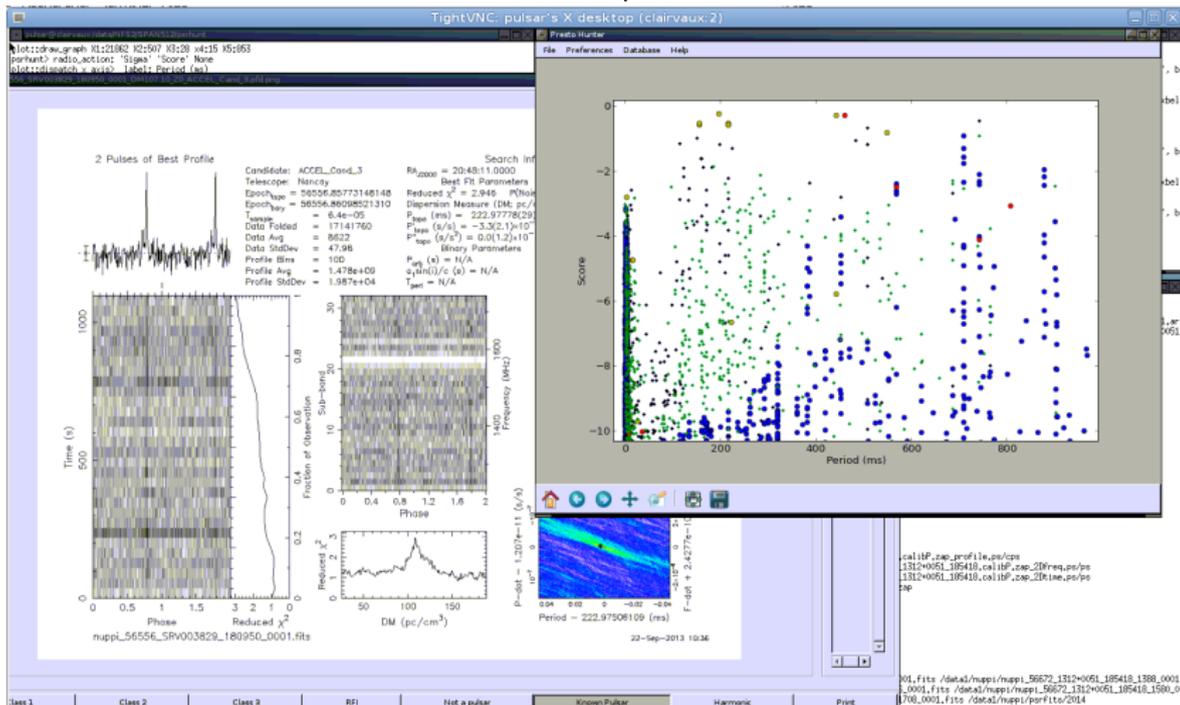
# Compilation des candidats

Les dizaines de milliers de candidats tous DM confondus sont compilés  
 et quelques dizaines de candidats sont traités à fond :



# Aide à la découverte

Des dizaines de candidats pour chacun des milliers de pointés sur le ciel  
 Un script (psrhunt.py) interroge une base de données de tous les candidats  
 et les classe selon divers critères pour faciliter la découverte.



# Recherche d'impulsions individuelles

## Une méthode simple...

Pour chaque observation de quelques dizaines de minutes,  
et sur chaque série temporelle dédispersée pour un DM donné,  
une recherche d'impulsions est effectuée  
généralement en cherchant des déviations par rapport à une moyenne glissante

## ... des découvertes diverses

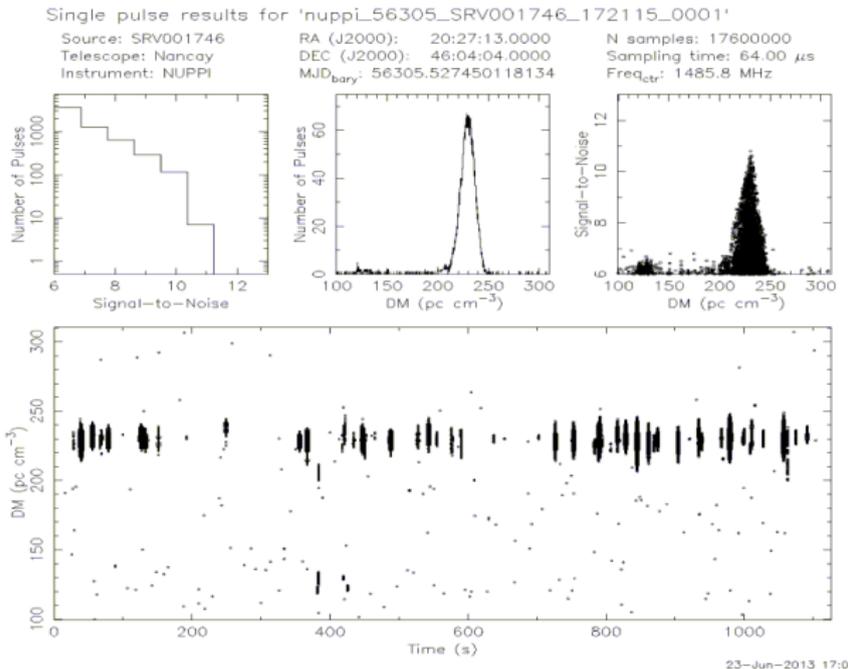
Les récepteurs multi-beams ont permis d'observer davantage de temps par pointé sur le ciel

Les moyens de calcul ont permis de chercher plus profondément dans les données...

→ différents types de sources ont été trouvés :

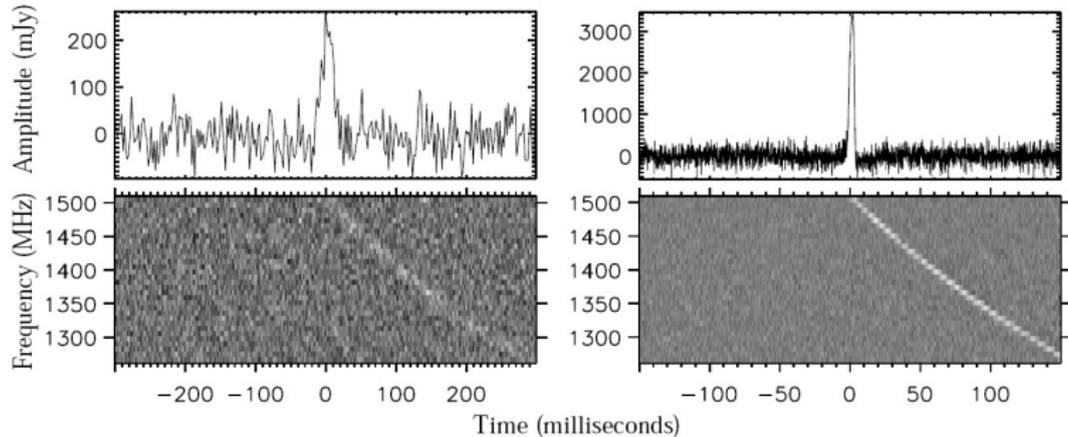
- des pulsars intermittents (allumés qqs semaines, éteints qqs mois)
- des RRATs (Rotating Radio Transients) avec des impulsions occasionnelles
- des FRBs (Fast Radio Bursts) avec une seule impulsion très dispersée

## Des impulsions individuelles



Un pulsar avec beaucoup d'impulsions individuelles...

## Fast Radio Bursts (FRBs)



un taux de  $1-3 \times 10^4 \text{ sky}^{-1} \text{ day}^{-1}$  (6 à Parkes et 1 à Arecibo)

Lorimer et al., Science 318, 777 (2007)

Thornton et al., Science 341, 53 (2013)

Spitler et al. in prep

## Etudier des pulsars connus

... intégrer en temps et en fréquence

### La 'radiometer equation'

Exprimées en degrés Kelvin, les fluctuations en sortie d'un récepteur caractérisé par une température  $T_{sys}$  sont

$$\Delta T_{sys} = \frac{T_{sys}}{\sqrt{n \cdot \Delta t \cdot \Delta f}}$$

où  $\Delta t$  est le temps d'intégration et  $\Delta f$  est la bande de fréquence intégrée et  $n$  le nombre de polarisation (1 ou 2) enregistrées.

Dicke R.H., Rev Sci Instrum 17, 268 (1946)

### Il FAUT une instrumentation spécifique...

... qui permet de s'affranchir de :

- la dispersion interstellaire pour **intégrer en fréquence**
- l'effet Doppler pour **empiler/intégrer en temps** les impulsions

et en minimisant le  $\Delta T_{sys}$ , obtenir des mesures de meilleures qualités.

# Dédisperser...

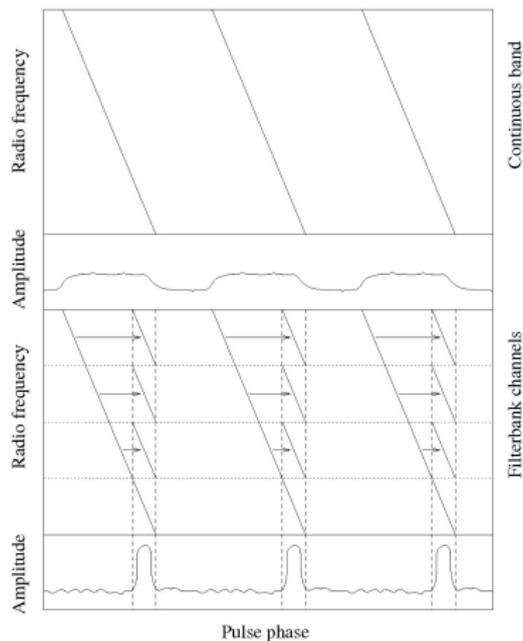
## Dédispersion incohérente

la dispersion est enlevée **après détection** du signal  
sur l'**intensité moyennée** sur une durée et une bande passante fixés  
par décalage temporel des données  
→ Instrumentation à canaux (en nombre dépendant du budget)

## Dédispersion cohérente

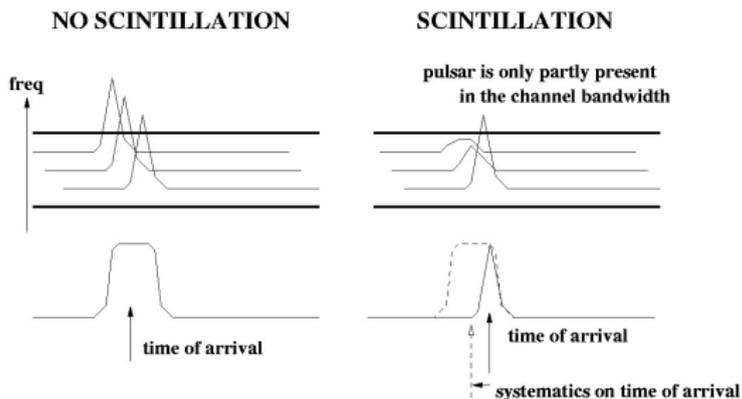
la dispersion est enlevée **avant la détection**  
directement sur les **tensions** proportionnelles au champ électrique reçu  
en jouant sur la phase des signaux  
→ Instrumentation à calculateur (dépendant du budget)

## Dédispersion incohérente



Décalage temporel des données des différents canaux de fréquence.

## Dédispersion incohérente : effets systématiques

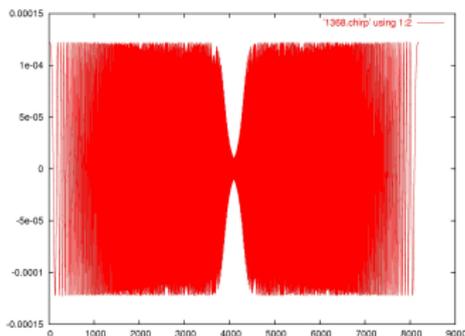


Il reste un peu de dispersion à l'intérieur des canaux qui, couplée à la scintillation due à la nature turbulente du milieu interstellaire produit des effets systématiques imprévisibles sur les temps d'arrivée

# Dédispersion cohérente

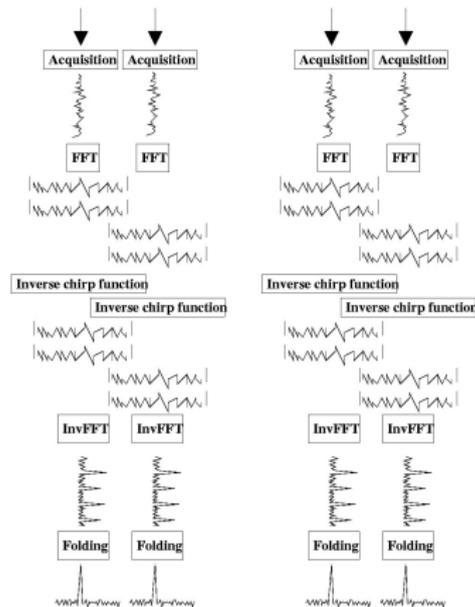
La dispersion par le milieu interstellaire agit comme un **filtre de phase**.  
 La dédispersion cohérente par ordinateur applique un **filtre inverse** dans le domaine de Fourier complexe :  
 $\text{FFT} + \text{filtre inverse} + \text{FFT}^{-1}$   
 (avec gestion de l'overlap)

Nécessité d'une imposante puissance de calcul

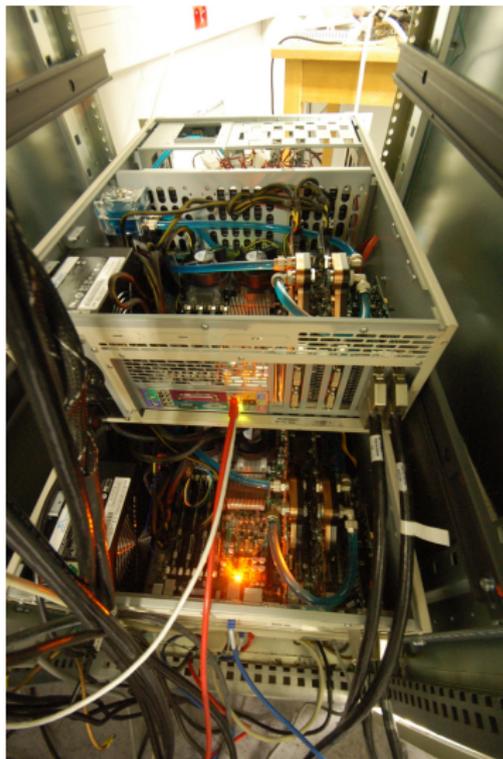


## NUMERICAL COHERENT DE- DISPERSION

2 complex polarizations



## Dédispersion cohérente numérique à GPUs (2008-)



### Détournement de GPUs

Avec l'utilisation des cartes graphiques haut de gamme (GPU) :

4 PCs / 8 GPUs peuvent facilement dédisperser en temps réel une bande passante de 512MHz (un flux de 16Gb/s)

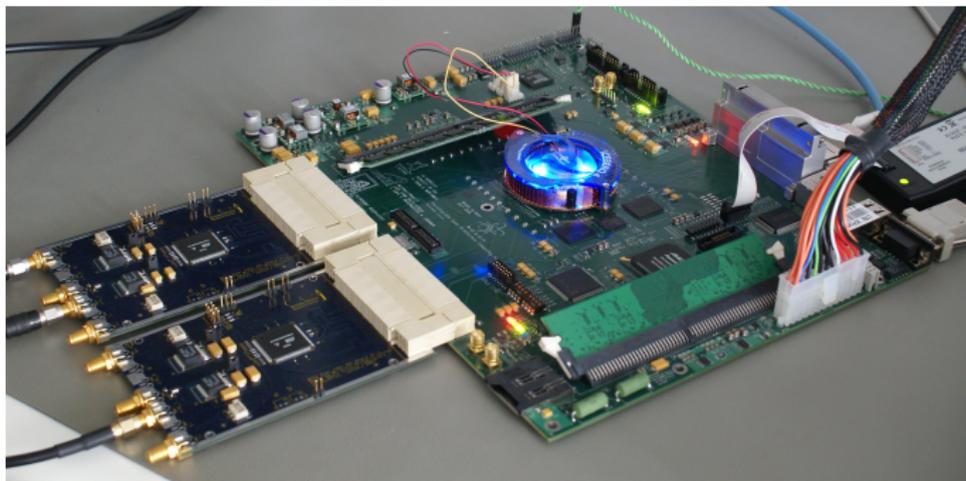
### Une précision extrême, un programme intensif

L'incertitude de datation peut descendre à 20-30ns pour quelques pulsars.

Environ 50% du temps de télescope à Nançay  
Plus de 150 pulsars suivis

Près de 50000 observations depuis Nov 2004

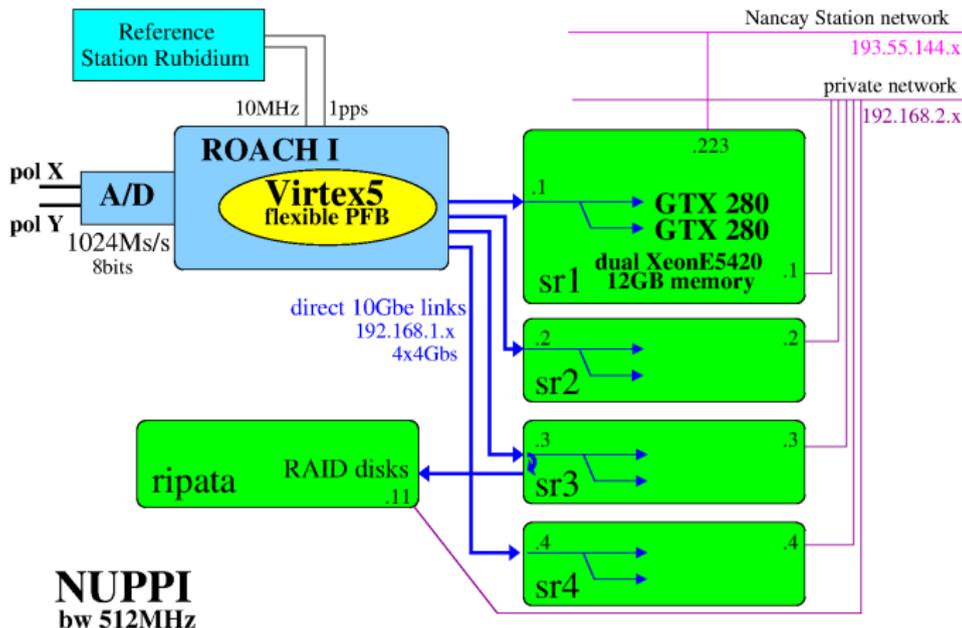
## Dédispersion cohérente numérique à GPUs (2008-)



Une carte 'ROACH' construite par le groupe CASPER (Berkeley Univ, CA)  
à laquelle est adjointe une carte de conversion 8 bits (ADC-2x1000-8)  
capable de numériser une bande passante de 512MHz (16Gb/s)  
envoie les données (liens 10Gb/s) vers un/des ordinateur/s pour traitement ultérieur.

# Dédispersion cohérente numérique à GPUs (2008-)

## Schéma du flot de données



# Nvidia et CUDA

## Utilisation des GPUs Nvidia et de la bibliothèque CUDA (Common Unified Development Architecture)

```
// -- Allocate and transfer of chirp function --
cudaMalloc((void*)&chirp_device, mem_chirp);
cudaMemcpy(chirp_device, chirp, mem_chirp, cudaMemcpyHostToDevice);

// -- CUFFT plan --
CUFFT_SAFE_CALL(cufftPlan1d(&plan, obs_params.fft_len, CUFFT_C2C, 2*NFFTinSend));

// -- Transfer data --
cudaMemcpyAsync(tbuf_device, tbuf_host, mem_tbuf, cudaMemcpyHostToDevice, 0);
CUDA_SAFE_CALL(cudaThreadSynchronize());

// -- Forward FFT --
CUFFT_SAFE_CALL(cufftExecC2C(plan, fftbuf_device, fftbuf_device, CUFFT_FORWARD));

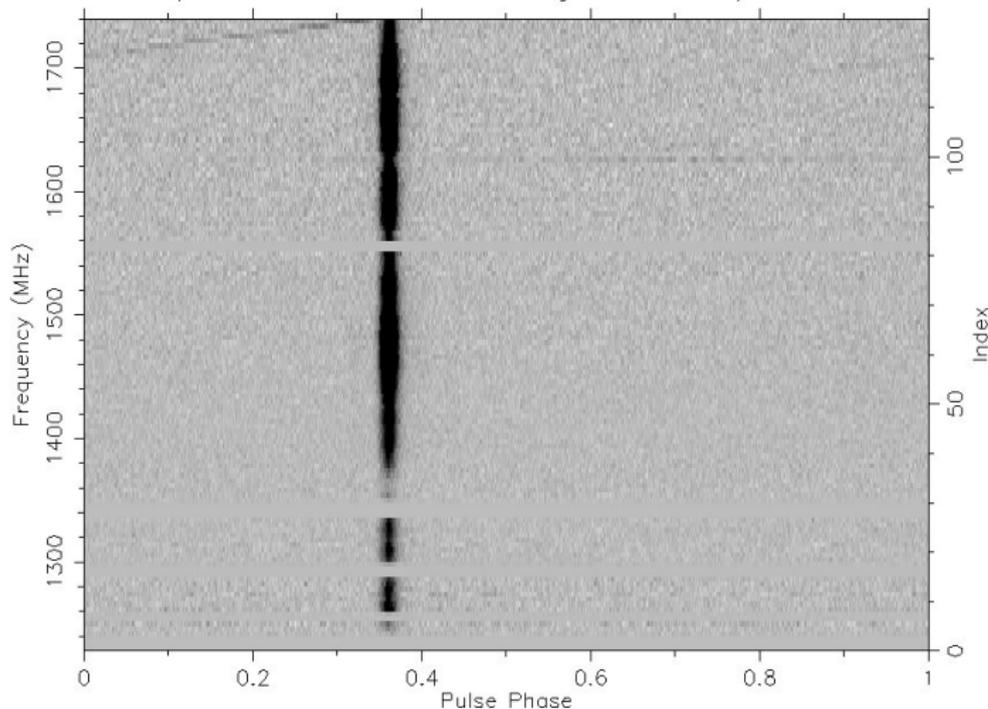
// -- Chirp filter multiply --
vec_mult_complex<<<nb_mult, 512>>>
( (float2 *)&fftbuf_device[i*obs_params.fft_len],
  (float2 *)&chirp_device[obs_params.fft_len*freq_chan],
  obs_params.fft_len, 2*NFFTinSend );

// -- Inverse FFT --
CUFFT_SAFE_CALL(cufftExecC2C(plan, fftbuf_device, fftbuf_device, CUFFT_INVERSE));

// -- Detect and Stokes --
detect_4pol<<<32, 64>>>((float2 *)fftbuf_device,
```

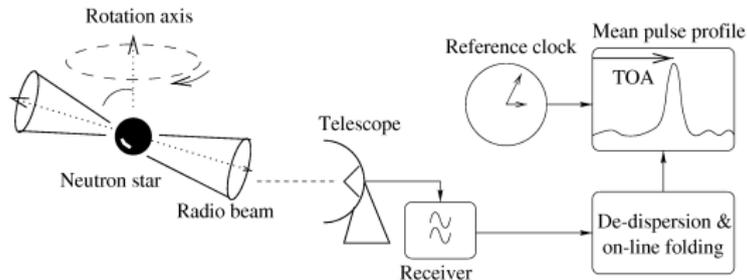
## Exemple d'une observation

1909-3744 /data1/nuppi/archives/nuppi\_56767\_1909-3744\_188901.calib.zap  
Freq: 1484.000 MHz BW: 512.000 Length: 3701.742 S/N: 1128.911



Observation du pulsar PSR J1909-3744 avec NUPPI.

## La chronométrie



### Déterminer un temps d'arrivée

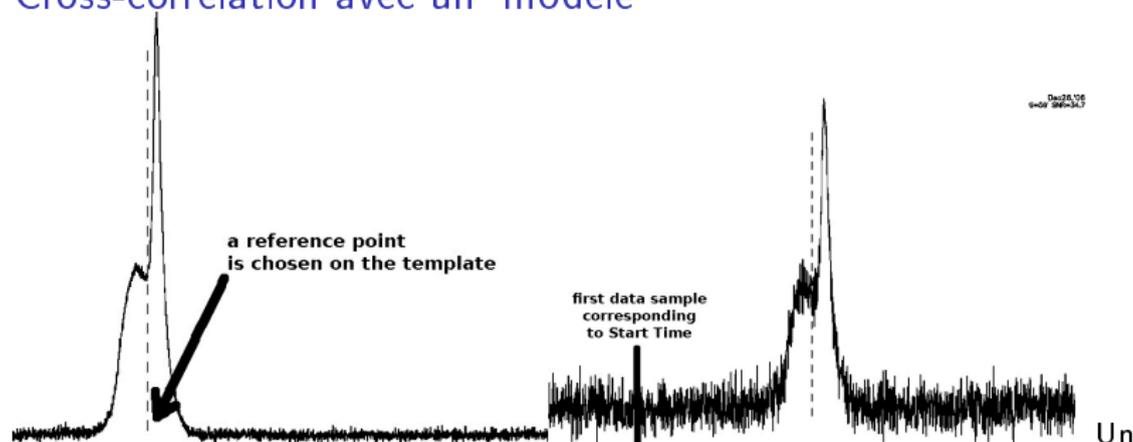
un grand radiotélescope  
une bonne horloge,  
et une instrumentation adéquate  
pour enlever la dispersion interstellaire

### Analyser une série de temps d'arrivée

- Se donner un jeu de paramètres du pulsar (période, position, etc...),
- déterminer des temps d'arrivée calculés en **modélisant** la propagation,
- ajuster les paramètres en minimisant les différences (appelées résidus) entre les temps d'arrivée mesurés et les temps d'arrivée calculés
- inspecter les résidus à la recherche d'effets nouveaux...

## Déterminer un temps d'arrivée

### Cross-corrélation avec un 'modèle'



'modèle' (ou template) est construit comme :

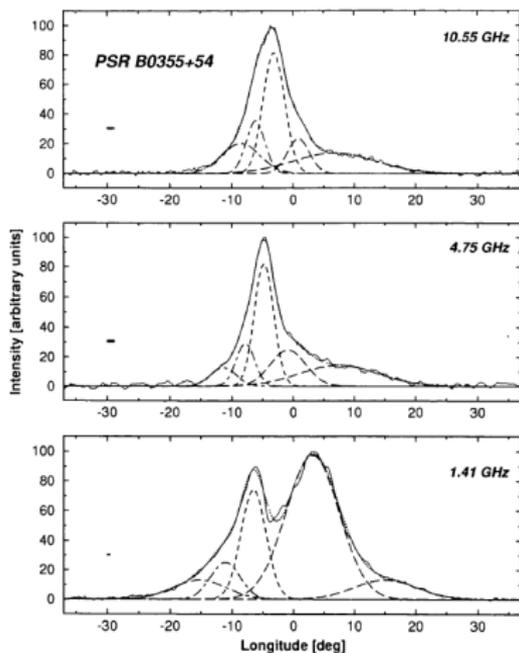
une version lissée d'une observation donnée, ou

une somme de gaussiennes, ou

l'intégration cohérente d'un grand nombre d'observations

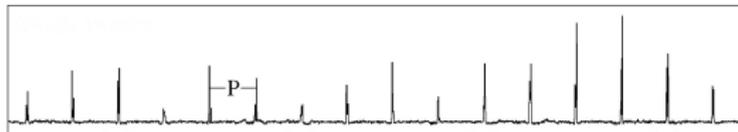
Une cross-corrélation du modèle avec chacune des observations  
produit un **décalage converti en temps d'arrivée**

## un modèle synthétisé comme une somme de gaussiennes



l'amplitude variable des gaussiennes  
permet d'obtenir un 'modèle'  
à différentes fréquences d'observation

## Analyser les temps d'arrivée : le 'timing model'



### Evolution de la rotation du pulsar

Dans un repère lié au pulsar,  
on représente l'évolution de la fréquence de rotation selon :

$$\nu(t) = \nu_0 + \dot{\nu}_0(t - t_0)$$

Pour les pulsars les plus jeunes, on ajoute  $\ddot{\nu}$ .

### Phase rotationnelle ou numérotation des impulsions

A partir de la relation précédente on peut écrire la phase rotationnelle  $\phi = \int \nu dt$  par :

$$\phi(t) = N(t) = N_0 + \nu_0(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}_0(t - t_0)^2$$

les impulsions correspondent au temps  $t$  pour lesquels  $\phi$  est un nombre entier à partie fractionnelle nulle

# S'affranchir de la Terre

## Conversion topocentrique - barycentrique

Un temps d'arrivée topocentrique  $t_{topo}$  est 'transféré' au barycentre  $t_{SSB}$  :

$$t_{SSB} = t_{topo} + t_{corr} - kDM/f^2 + \Delta_{R\odot} + \Delta_{S\odot} + \Delta_{E\odot}$$

avec :

$t_{corr}$  est la correction d'horloge (entre  $UT_{observatoire}$  et UTC par exemple)

$kDM/f^2$  est la correction du délai dispersif  
 produit par le contenu électronique du milieu interstellaire

$\Delta_{R\odot}$  est le délai dit Römer du à la position de la Terre  $\vec{r}$  sur l'orbite terrestre

$$\Delta_{R\odot} = -\frac{1}{c} \vec{r} \cdot \vec{s} = -\frac{1}{c} (\vec{r}_{SSB} + \vec{r}_{EO}) \cdot \vec{s}$$

$\vec{r}_{SSB}$  est obtenu des meilleures éphémérides planétaires JPL DE405 ou INPOP06

$\Delta_{S\odot}$  est le délai Shapiro

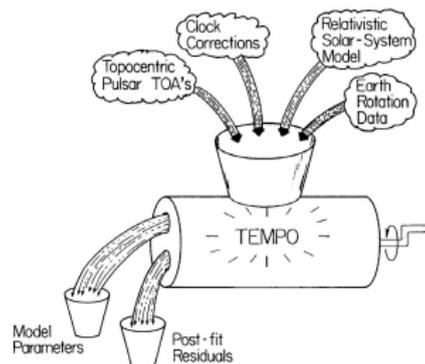
produit par la courbure de l'espace-temps due à la masse du Soleil (et Jupiter?)

$$\Delta_{S\odot} = -2 \frac{GM_{\odot}}{c^3} \ln[1 + \cos\theta]$$

avec  $\theta$  l'angle pulsar-Soleil-Terre

$\Delta_{E\odot}$  est le délai d'Einstein, dilatation temporelle due au mouvement de la Terre dans le champ gravitationnel du système solaire

## Ajustements des paramètres



### Utiliser les codes Antiope/TIMAPR/tempo/tempo2

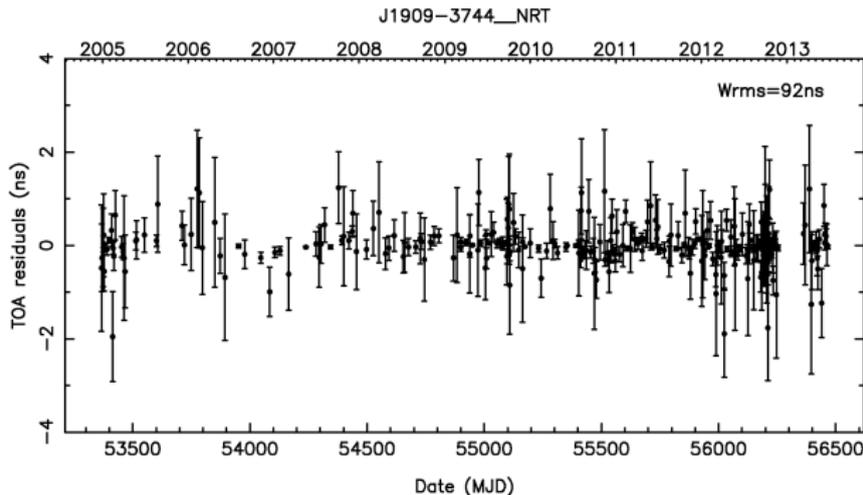
A partir d'un ensemble de temps d'arrivée  $t_i$  (incertitudes  $\sigma_i$ ) et de paramètres astrométriques, rotationnels et éventuellement binaires, il est possible de calculer  $N(t_i)$  et de minimiser l'expression :

$$\chi^2 = \sum_i \left( \frac{N(t_i) - n_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad n_i \text{ entier le plus proche de } N(t_i),$$

en ajustant les paramètres utilisés dans le calcul de  $N(t_i)$ .

C'est en général une minimisation par moindres carrés avec linéarisation.

## Des résidus de temps d'arrivée



Résidus, après ajustement, de temps d'arrivée du pulsar J1909-3744

# Conclusion

## Des horloges cosmiques

Les pulsars rapides les plus stables  
ont de nombreuses applications en physique fondamentale.

## Des instrumentations performantes

De gros efforts sont menés pour découvrir de nouveaux pulsars,  
depuis peu, la limitation n'est plus l'instrumentation  
mais le radiotélescope et le traitement des données!

## Un univers radio impulsional

Détection de nombreuses sources de différents types :

- pulsars intermittents et RRATs
- Fast Radio Bursts (à l'origine toujours controversé)