

Des ondes Mécaniques aux ondes de Gravitation Epiphymaths

Exposé de Daniel VAN LABEKE : Février 2018

Les Ondes de Gravitation (2) : **Pulsars binaires**

Des ondes Mécaniques aux ondes de Gravitation

1) Généralités sur les ondes

- a) Ondes mécaniques dans un solide: Equation d'onde.
- b) Onde acoustique
- c) Ondes Electromagnétiques

2) Ondes de Gravitation

- a) Historique de leur invention Historique des Observations
- b) Généralités
- c) Ordres de grandeur
- d) **Mise en évidence indirecte : Pulsars binaires**
- e) Détection mécanique
- f) Détection optique

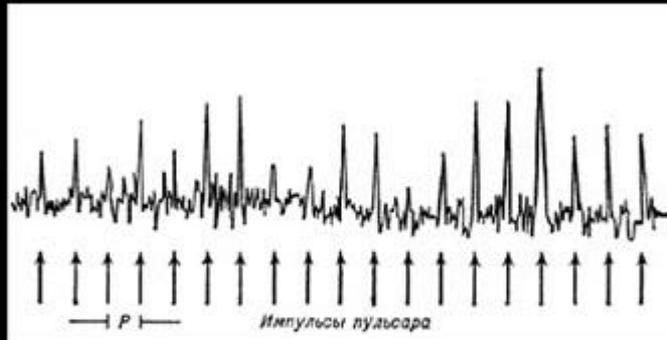
3) Théorie des ondes de gravitation

- a) Rapide rappel des principes théoriques de la Relativité Générale
- b) Equation d'Einstein
- c) Approximation linéaire et équation des ondes de gravitation
- d) Problèmes et questions à propos de l'invariance de jauge en théorie de la gravitation
- e) Polarisation des ondes de gravitation
- f) Principe des calculs de rayonnement des ondes de gravitation
- g) Paramètres physiques déterminant la vitesse des ondes de Gravitation ???

Pulsars Binaires

- a) Découverte
- b) Nature des pulsars: Pulsar =Etoile à Neutrons
- c) Pulsar= horloge très précise
- d) Rappel : Mécanique de Newton
 - Problème à 2 corps
 - Problème de Kepler
 - Orbites Elliptiques
 - Equation de Kepler
- e) Pulsar binaire et Gravitation

Pulsar = Etoile à Neutrons



1967 : découvrirent une source émettant de façon très régulière des impulsions radio (périodicité de 1.337 seconde et fréquence de 81.5 MHz), source qu'ils ont nommé PSR 1919+21, en raison de sa position céleste.

La période 1.33730113 seconde de PSR 1919+21 entre Jocelyn Bell et Anthony Hewish.

Emetteur radio : Emettant des impulsions très puissantes, très régulières
= Source extraterrestre ??? Little Green Man

1932 James Chadwick découvre le neutron.

1934 Lev Landau et Walter Baade et Fritz Zwicky = Etoile à Neutrons

Très vite Pulsar = Etoile à Neutrons. Fin de vie d'une étoile, gravité comprime l'étoile
1,3-3,4 Masse solaire, Très petit rayon, (10-30 km) très dense

Prix Nobel 1974 : Hewish ainsi que son collaborateur Martin Ryle, qui avaient construit l'instrument ayant permis la découverte, mais pas à Jocelyn Bell,

Pulsating Star = Pulsar

Détection des pulsars



Figure 4a The Interplanetary Scintillation (IPS) Array used by Hewish and Bell-Burnell to discover pulsars. The array consists of 1,000 posts hammered into the ground, and strung with almost 200 km of wire, making a total of 2,048 aerials. (Courtesy Graham Woan.)

Le récepteur est situé sur une plateforme de 900 tonnes suspendue à 150 m au-dessus de l'antenne par 18 câbles

Arecibo (Porto Rico, Université Cornell, Ithaca, NY)

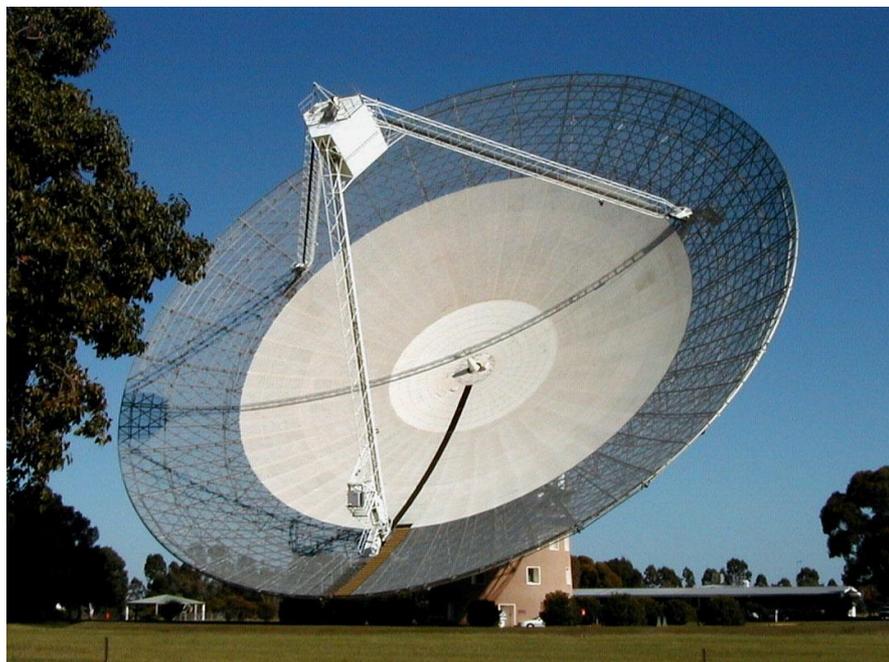


Antenne Sphérique de 305 m de diamètre. La surface de l'antenne est faite de 38 778 panneaux d'aluminium perforés, chacun mesurant environ 1 m sur 2 m, supportés par un maillage de câbles en acier

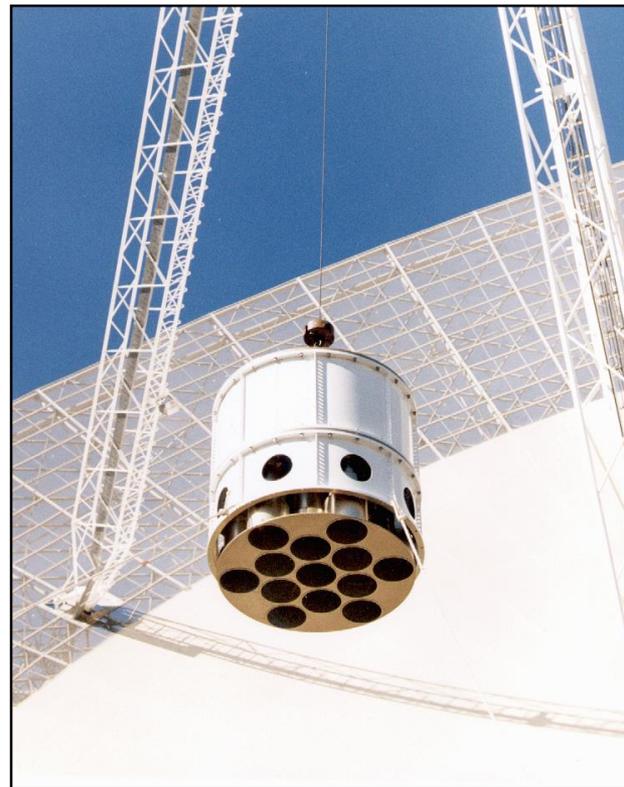


Le récepteur est situé sur une plateforme de 900 tonnes suspendue à 150 m au-dessus de l'antenne par 18 câbles

Radio-Télescope Moderne



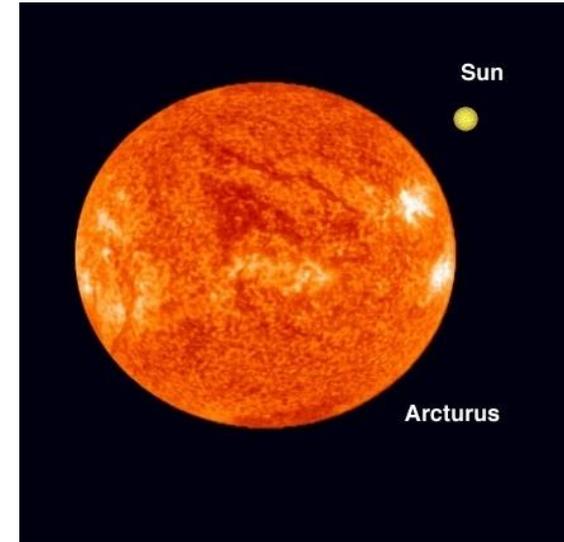
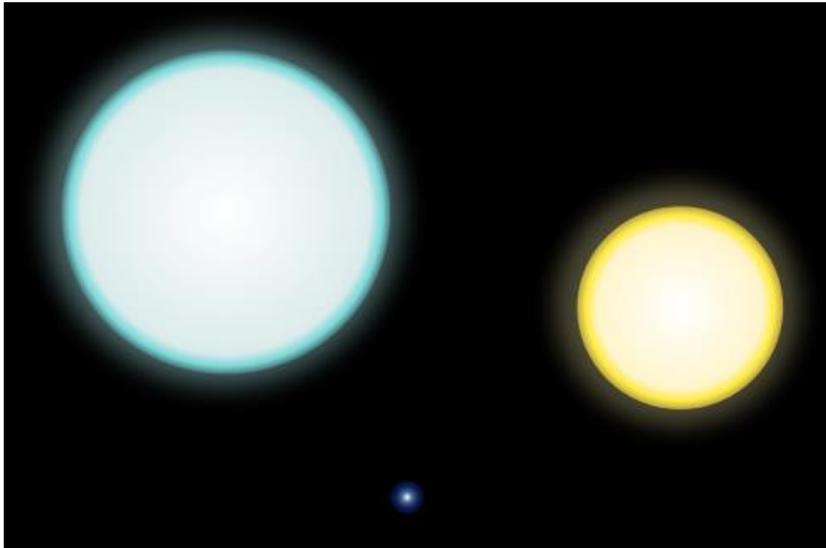
The Parkes radio telescope.



Multibeam receiver - 13 beams at 1.4 GHz - very efficient for pulsar surveys

More than **850 pulsars** discovered with the multibeam system since 1997

Différentes étoiles



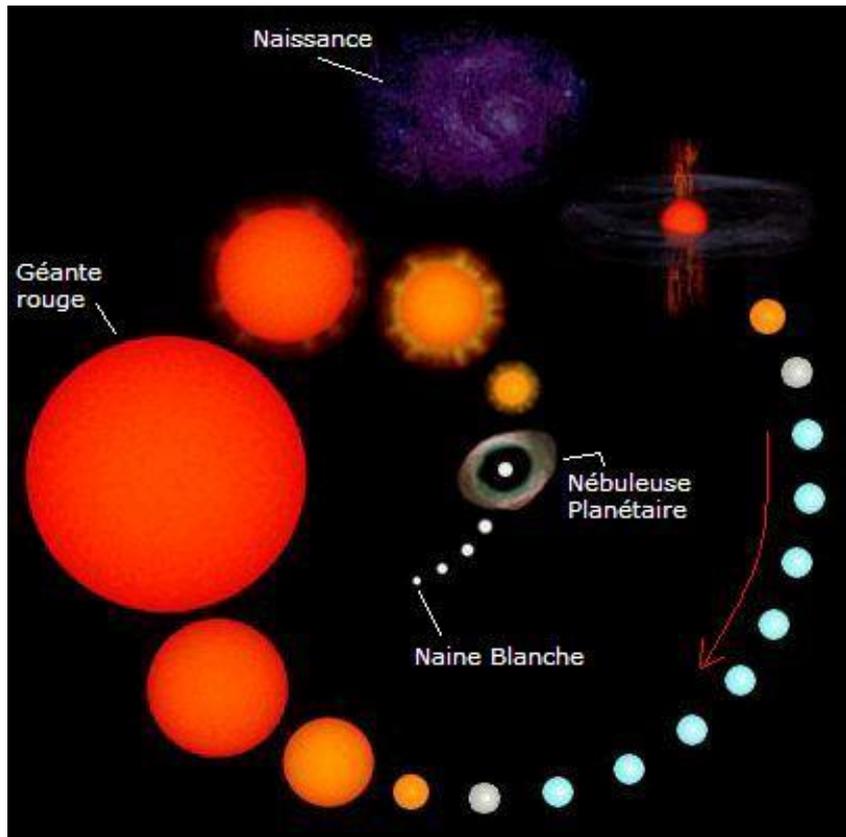
Soleil : Masse = 2×10^{30} kg R = 696 000 Km d=1,4 g/cm³

Géante Rouge M=10 Ms R=100 Ms d= 10^{-5} g/cm³

Naine blanche M=Ms R= Rs/100 d= 10^6 g/cm³

Etoile à neutrons M=2-3 Ms Rs=10km d= 10^{15} g/cm³

Evolution stellaire



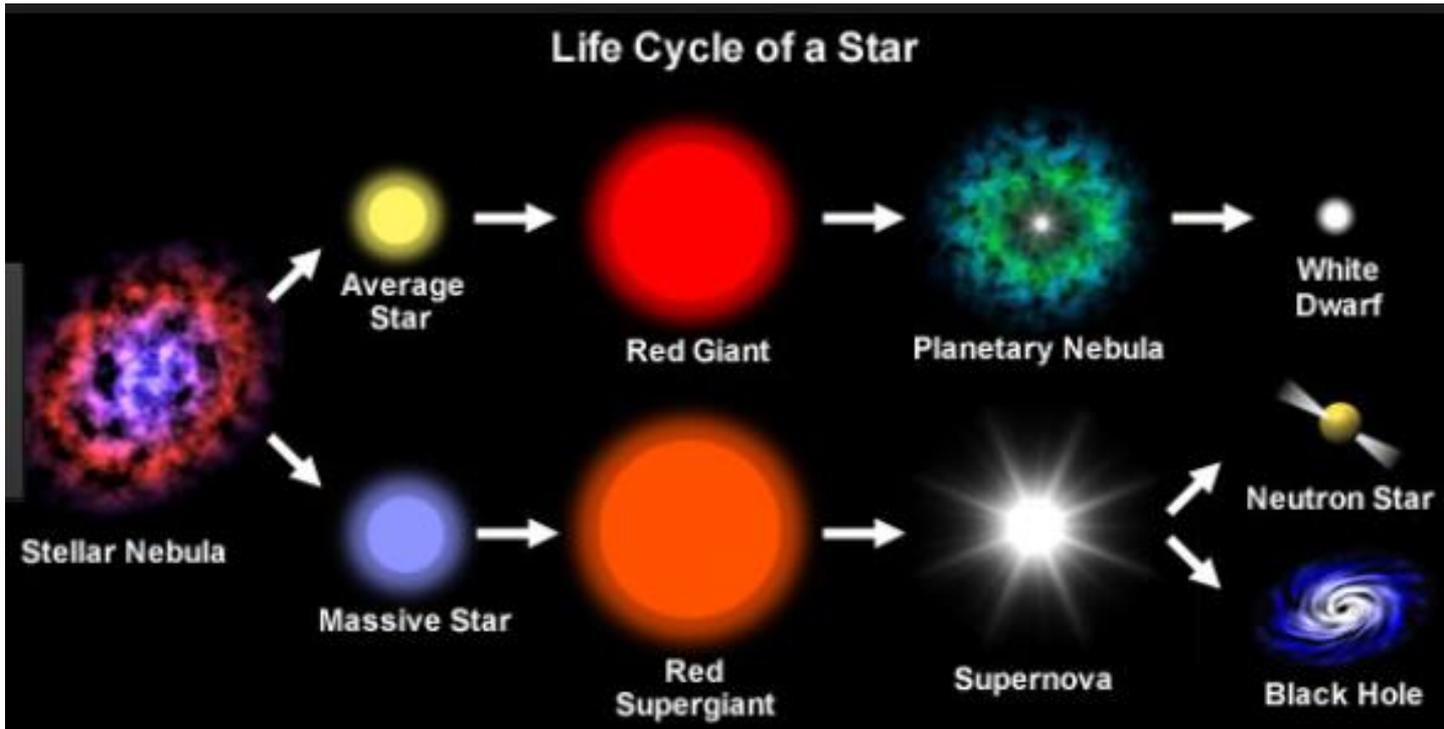
Soleil : Masse = 2×10^{30} kg $R = 696\,000$ Km $d = 1,4$ g/cm³

Géante Rouge $M = 10 M_s$ $R = 100 M_s$ $d = 10^{-5}$ g/cm³

Naine blanche $M = M_s$ $R = R_s/100$ $d = 10^6$ g/cm³

Etoile à neutrons $M = 2-3 M_s$ $R_s = 10$ km $d = 10^{15}$ g/cm³

Evolution Stellaire : selon la masse



Soleil : Masse = 2×10^{30} kg R = 696 000 Km $d = 1,4$ g/cm³

Géante Rouge M=10 Ms R=100 Ms $d = 10^{-5}$ g/cm³

Naine blanche M=Ms R= Rs/100 $d = 10^6$ g/cm³

Etoile à neutrons M=2-3 Ms Rs=10km $d = 10^{15}$ g/cm³

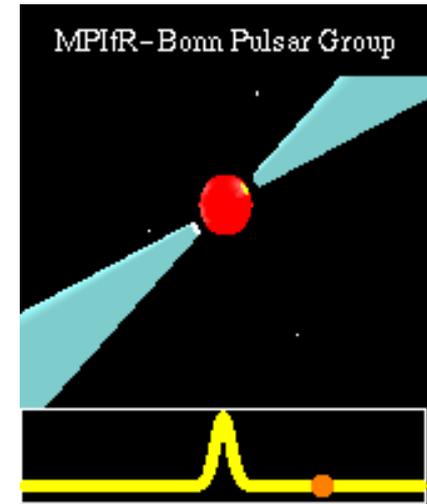
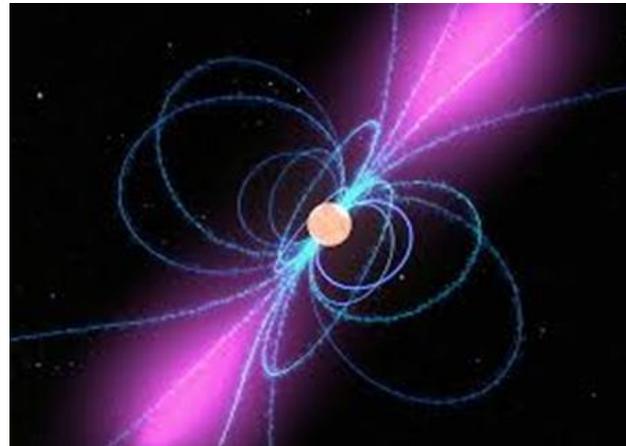
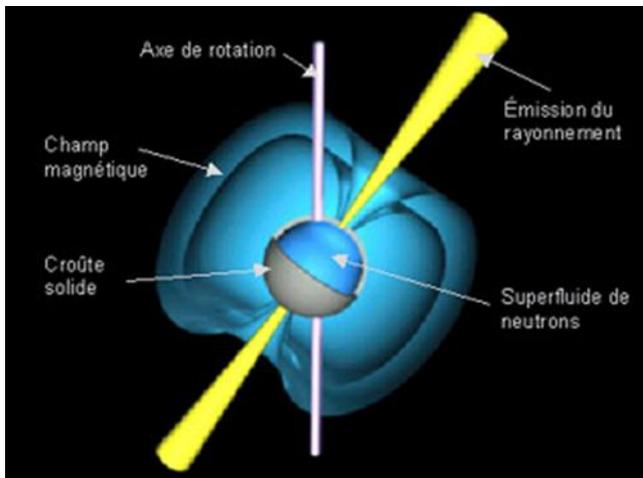
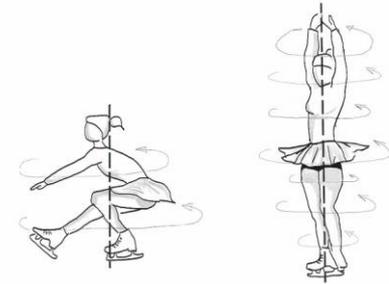
Physique du Pulsar

Forte contraction d'une masse

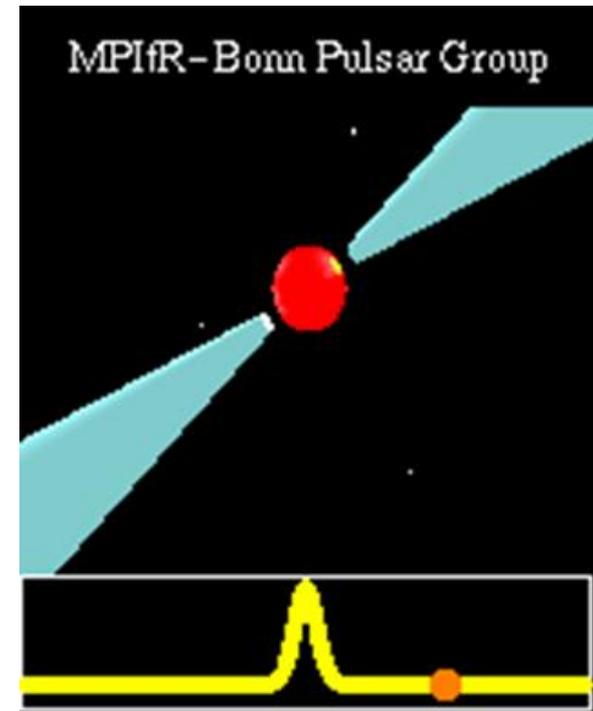
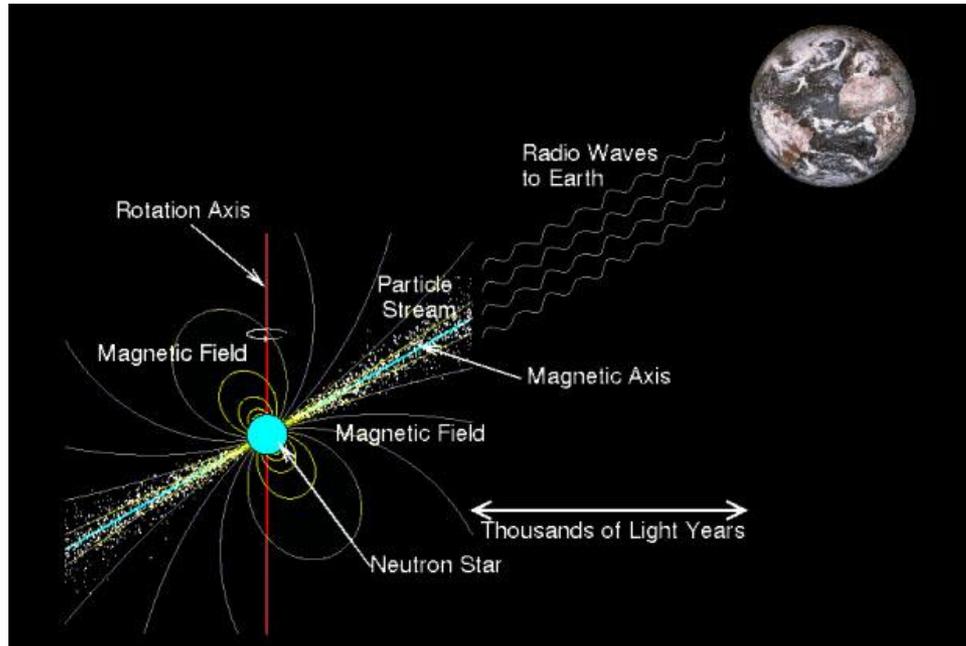
1) Conservation du moment cinétique : l'étoile à neutron **tourne très vite sur elle même** :

10s- **0,2s-2 s** Il existe des Pulsar millisecondes

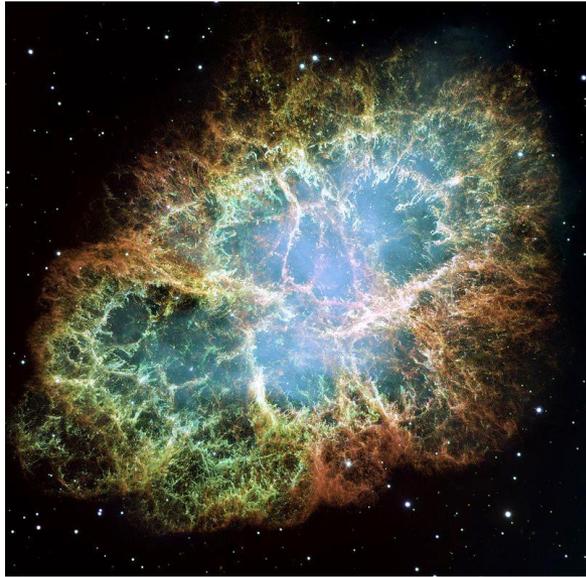
2) **Enorme champ magnétique**



Pulsars



Pulsar du crabe



PSR B0531+21

Résidu de la Supernova de 1054 (Constellation du Taurus)

Distance = 2,49 Kpc

Période = 0,033 s

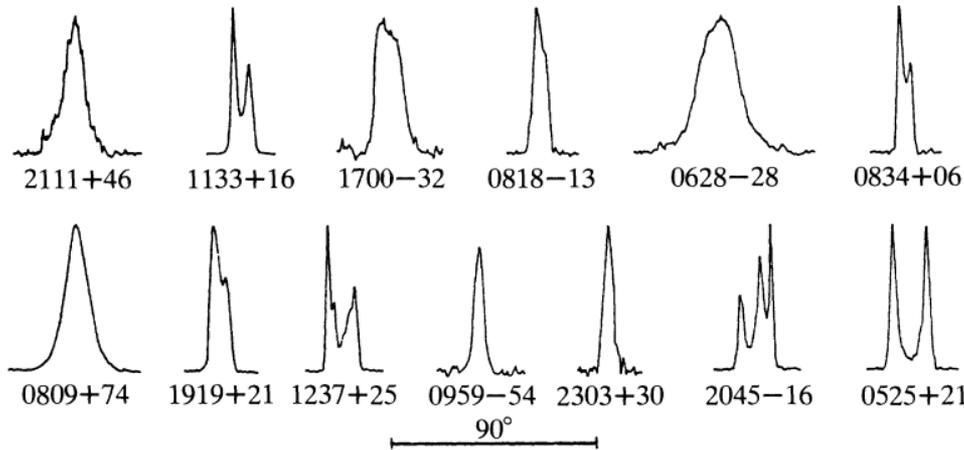
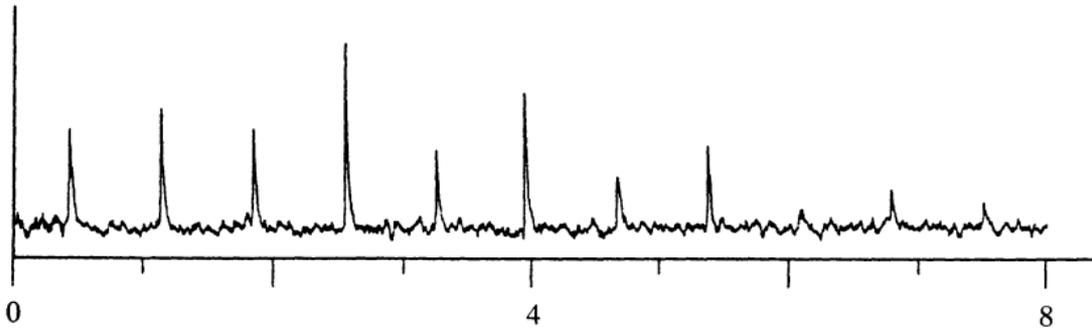
Champ magnétique = $4 \cdot 10^8$ T



L'environnement immédiat du pulsar du Crabe,
en optique (image Hubble, en rouge) et
en X (image Chandra, en bleu).

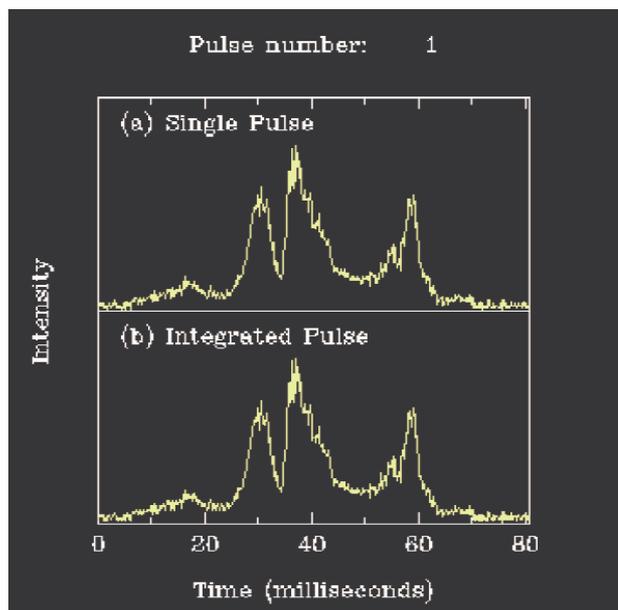
Pulsars as Physics Laboratories (R. D. Blandford et al 1993)

A train of pulses from the strong pulsar, PSR 0329 + 54, recorded at a radio frequency of 410 MHz (Manchester & Taylor 1977).

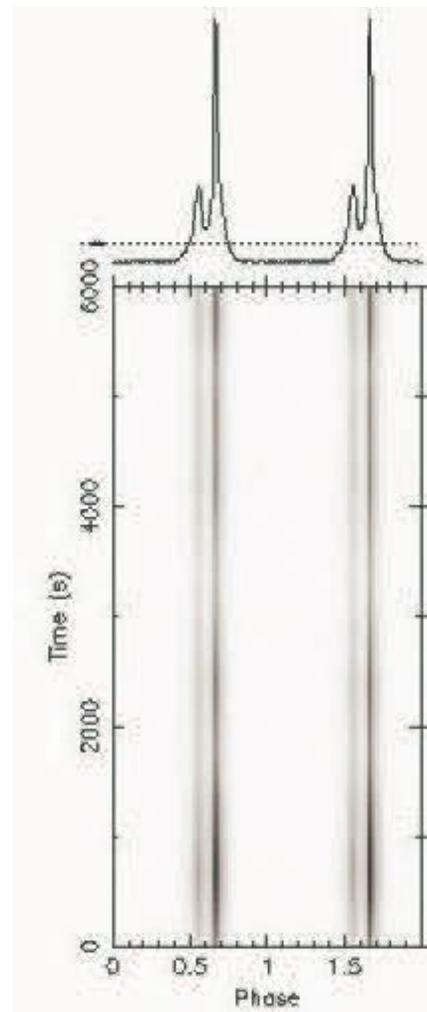


Mean pulse profiles for several pulsars illustrating the diversity of shapes observed. The horizontal bar represents 90° of pulse phase or one quarter of the pulse period (after Manchester & Taylor 1977).

Pulsar Timing



Toutes les impulsions sont différentes mais en moyennant sur de nombreuses impulsions on obtient un profil d'impulsion caractéristique du Pulsar



Un Pulsar de Période 3,6 ms
En 1h 10^6 rotations
Précision de mesure 1 ms

On détermine la période avec une précision de 10^{-12}

“if we can count the pulses unambiguously, then the precision in the measurement of the rotational period increases linearly with time. Therefore, an error in the period of 10^{-12} s after one hour into an error of 10^{-17} s after ten years”.

Avant de faire de la Physique il faut corriger certains effets.

Le vide interstellaire n'est pas vide : les ondes sont ralenties.

L'indice du milieu dépend de la fréquence, la vitesse des ondes radios dépend de la fréquence

La mesure du temps d'arrivée en fonction de la fréquence, et l'utilisation d'un modèle théorique permet de déterminer la distance de la source (grande fréquence, grand retard (ms à s))

Si le pulsar est immobile il faut enlever le mouvement de la Terre.

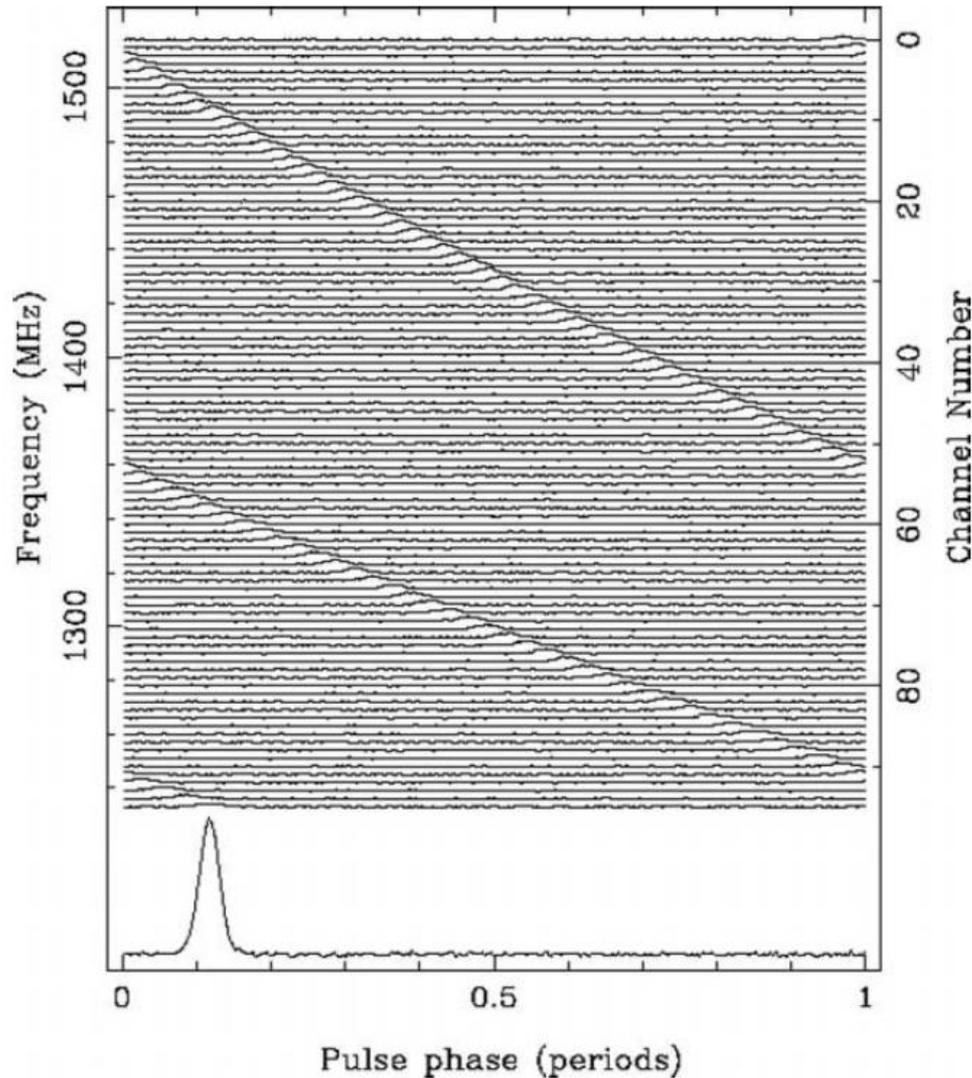
Ces corrections dépendent de la position du Pulsar sur la route céleste.

- Délai de Römer-Effet Doppler
- Effet Einstein
- Effet Shapiro

En fait le mouvement de la Terre étant connu on en détermine les coordonnées célestes du Pulsar (quelques microseconde d'arc de précision)
Erreur de quelques expérimentateurs (orbite Terre=Cercle ??)

Pulsar = Radiophares=balise célestes

Dispersion en fréquence du timing des impulsions



Plot showing how each pulse from a pulsar is dispersed across a range of frequencies. The signals from pulsars need to be 'de-dispersed' before they can be analyzed. From Handbook of Pulsar Astronomy (Lorimer & Kramer 2005).

$$\text{Refractive index: } \mu = [1 - (\nu_p/\nu)^2]^{1/2}$$

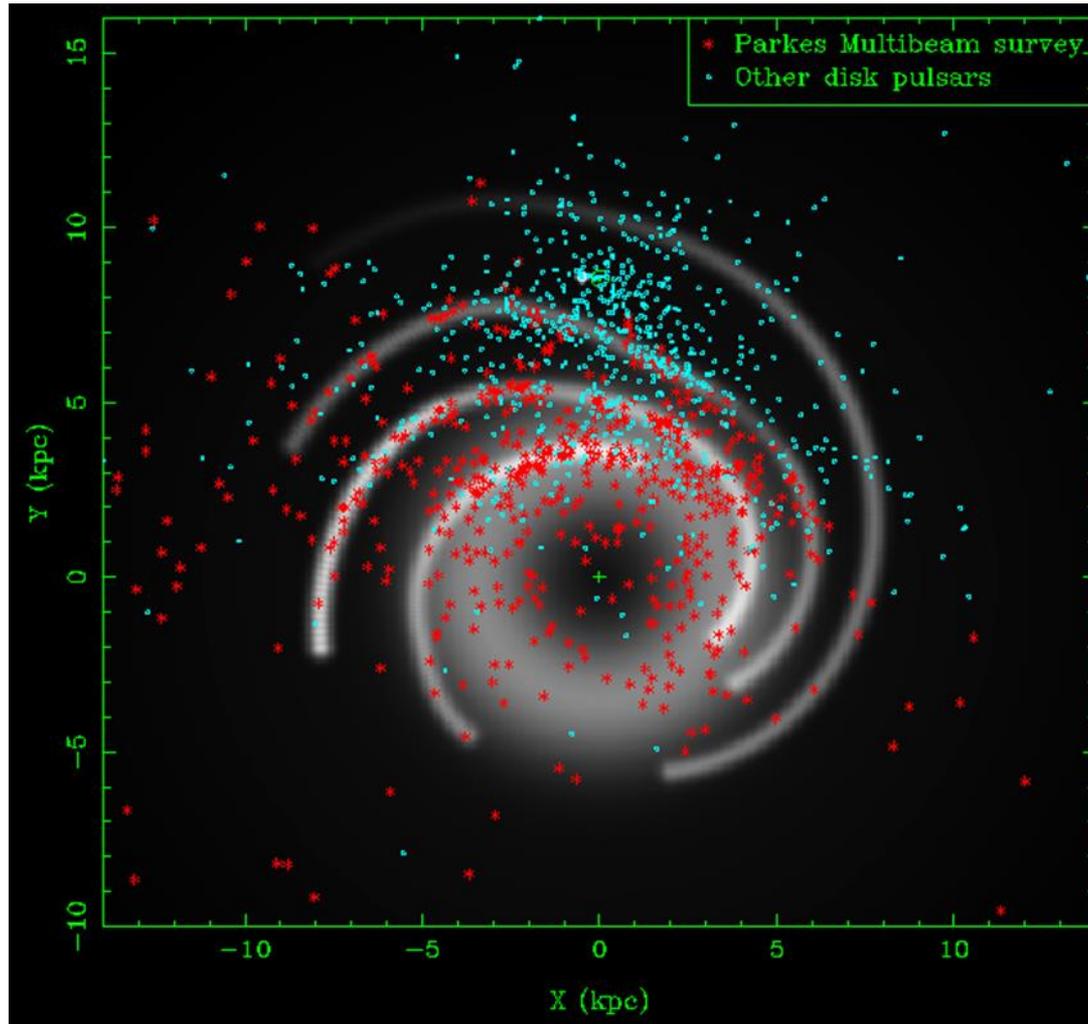
$$\text{Plasma frequency: } \nu_p = \left(\frac{e^2 n_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}$$

$$\text{Group velocity: } v_g = \mu c$$

$$\text{Delay: } \Delta t = \int_0^d \frac{dl}{v_g} = \frac{e^2}{2\pi m_e c} \frac{\int_0^d n_e dl}{\nu^2}$$

$$\text{Dispersion Measure: } \text{DM} = \int_0^d n_e dl$$

Position des Pulsars dans notre Galaxie



- For pulsars with **independent** distances (parallax, SNR association, HI absorption) can determine mean n_e along path. Typical values $\sim 0.03 \text{ cm}^{-3}$
- From many such measurements can develop **model** for Galactic n_e distribution, e.g. NE2001 model (Cordes & Lazio 2002)
- Can then use model to determine distances to other pulsars

Pulsar = horloge très précise

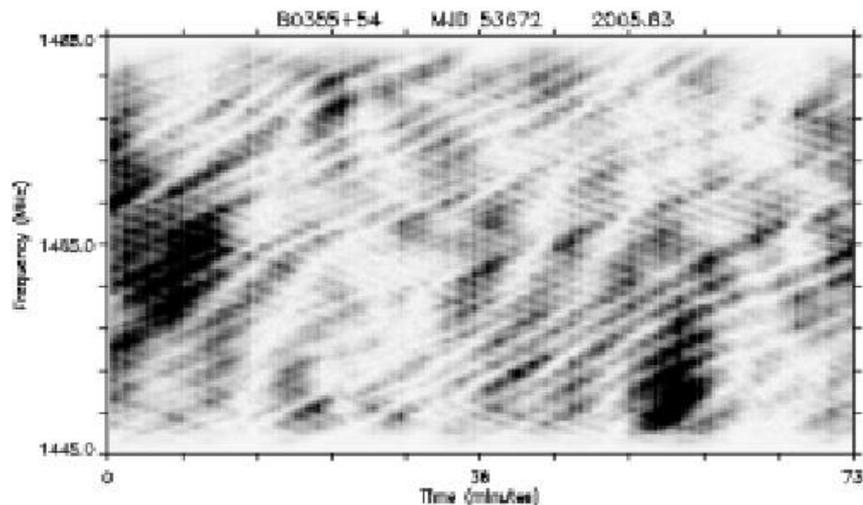
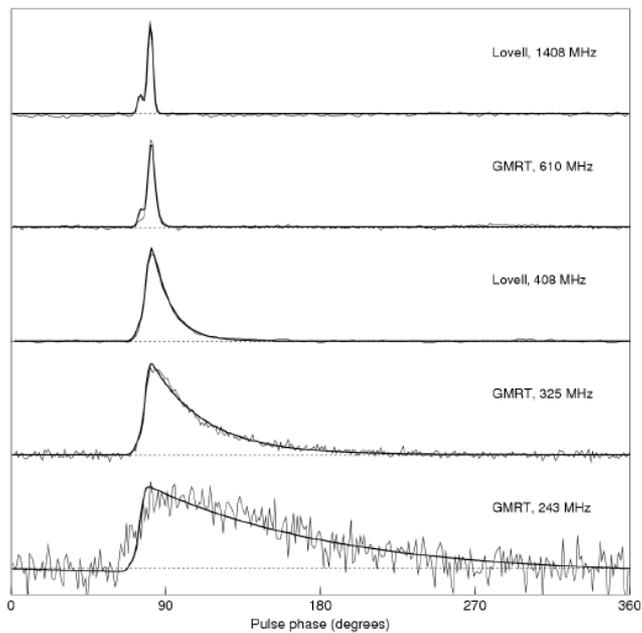
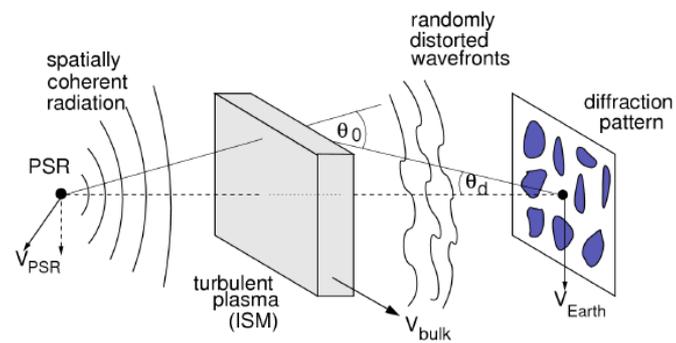
- La période d'un Pulsar est très très stable et peut être mesurée avec grande précision :

16 Jan 1999, PSR J0437-4715

$P = 5.757451831072007 \pm 0.0000000000000008 \text{ ms}$

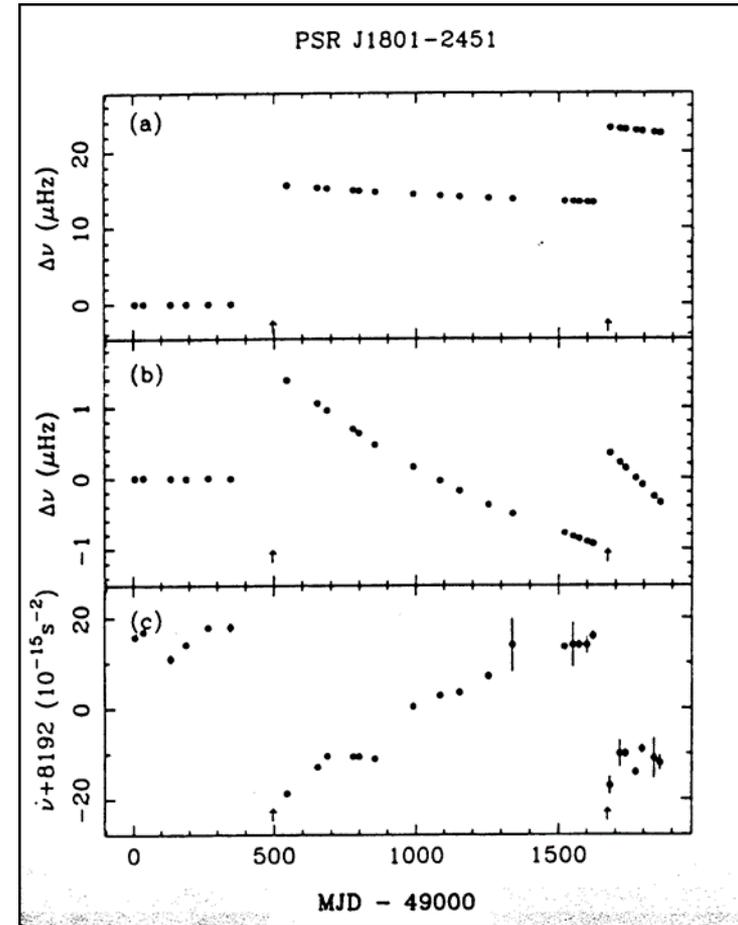
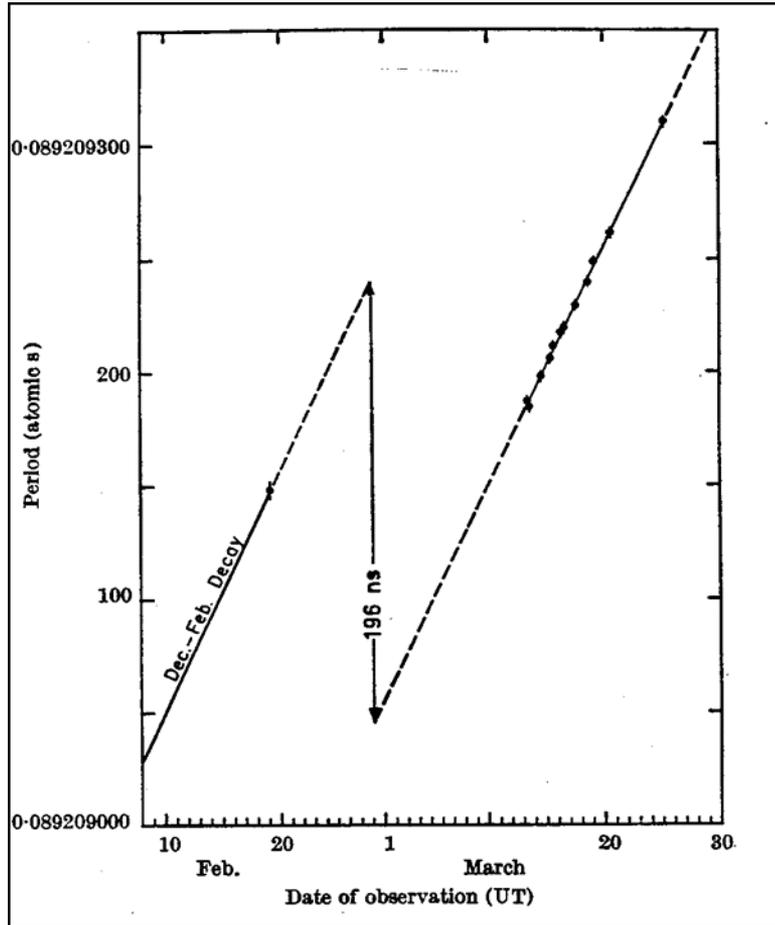
- Stable
- mais pas constant. Les pulsars perdent de l'énergie et leur rotation ralentit : dP/dt 10^{-15} à 10^{-20} pour MSP
- Les jeunes pulsars ont des irrégularités de période, des "glitches" (petites défaillances)
($\Delta P/P < \sim 10^{-6}$) glitche absent des MSP

Diffusion des impulsions



Pulse broadening caused by scattering. Scattering of the pulsed signal by ISM inhomogeneity, results in delays that cause a scattering tail. This scatter-broadening can greatly decrease both the observational sensitivity and the timing precision for such pulsars. (From the Handbook of Pulsar Astronomy, by Lorimer and Kramer)

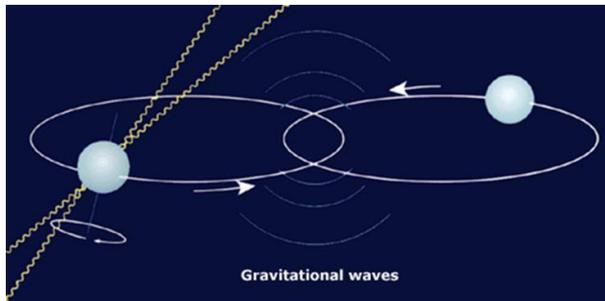
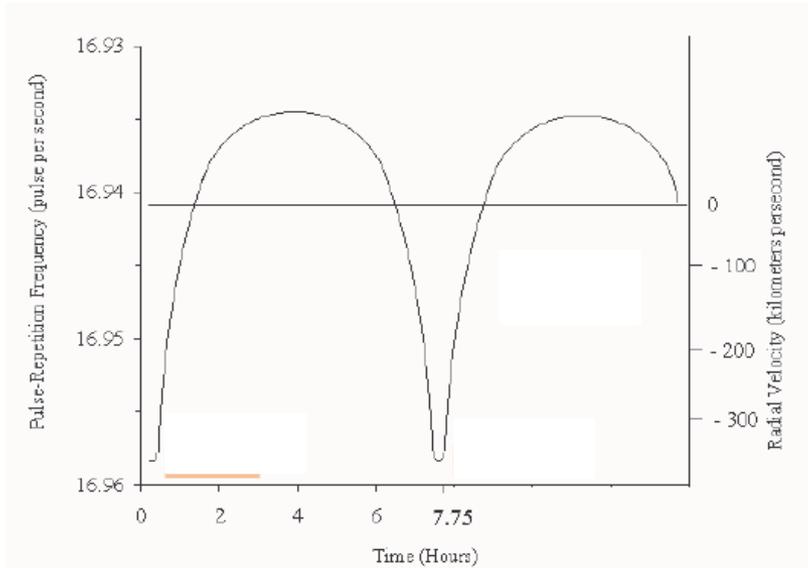
Pulsar Glitches



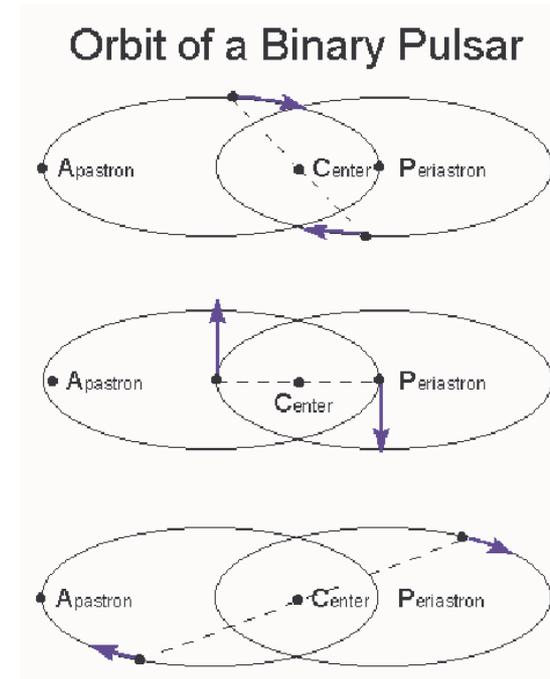
Oscillations du temps d'arrivée

Mais en 1974 Joseph Taylor and Russell Hulse avec le Radio Télescope d'Arecibo vont à la chasse aux Pulsars. Ils en trouvent 40 nouveaux.

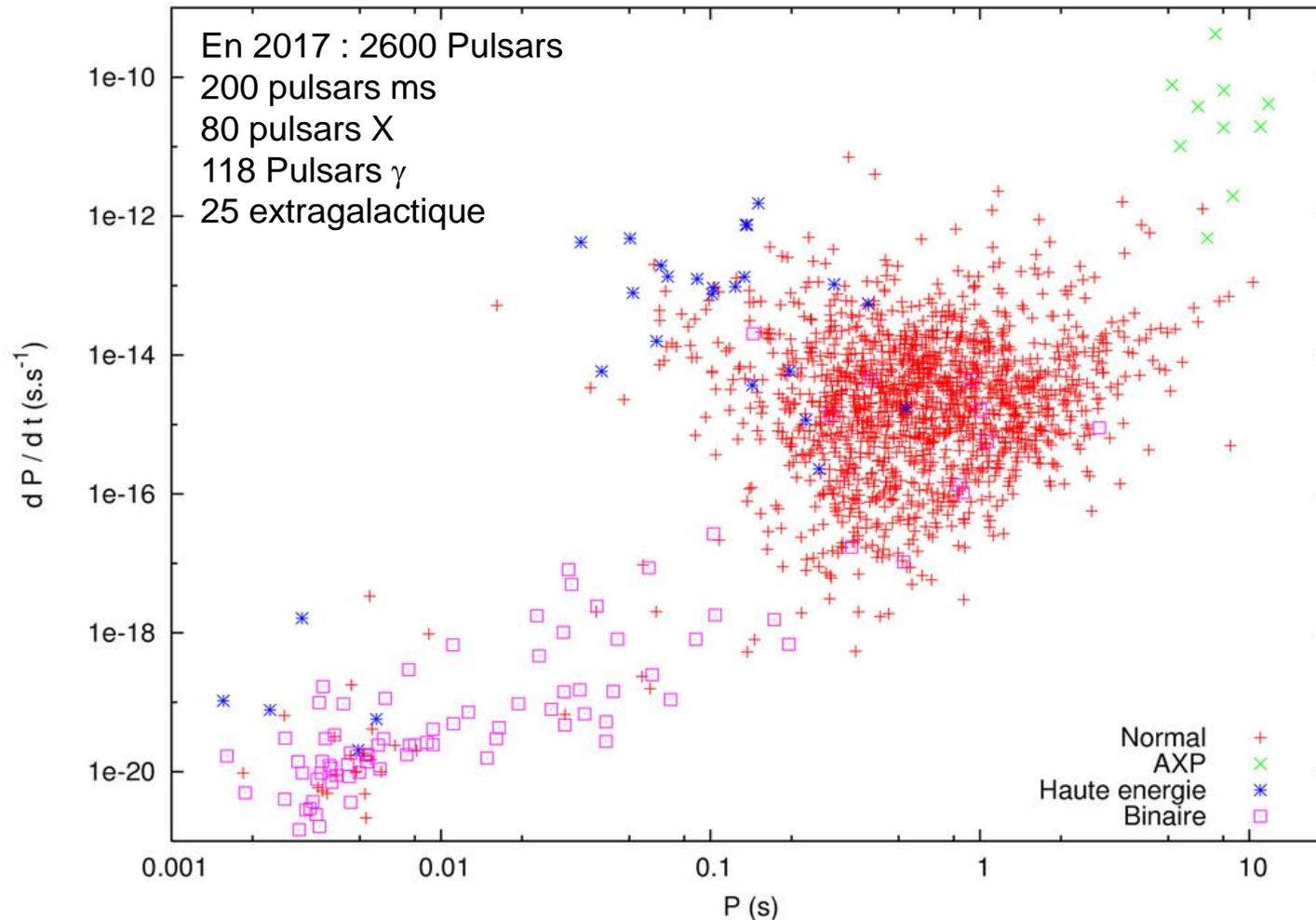
Dont un curieux : les impulsions arrivent tantôt en retard, tantôt en avance



Interprétation : étoile double

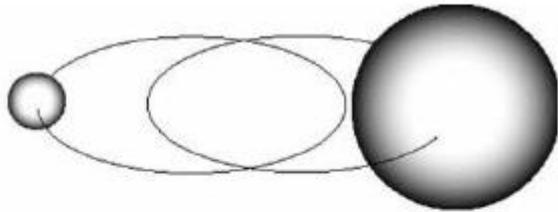


Population de Pulsars



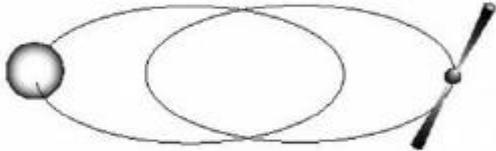
La période de rotation des Pulsars est fixe : sauf un lent ralentissement

Pulsar ms = Pulsar rajeuni



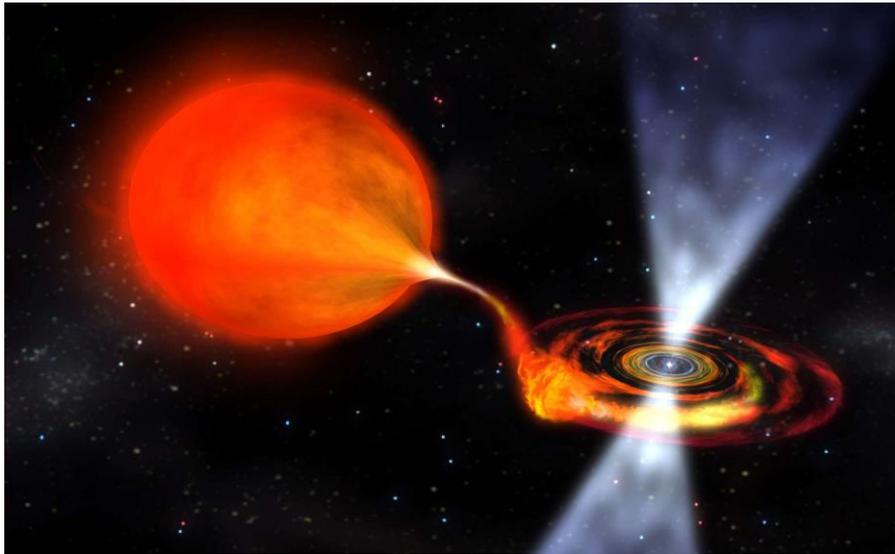
Etoile double

La plus massive évolue plus rapidement en géante rouge



Etoile double

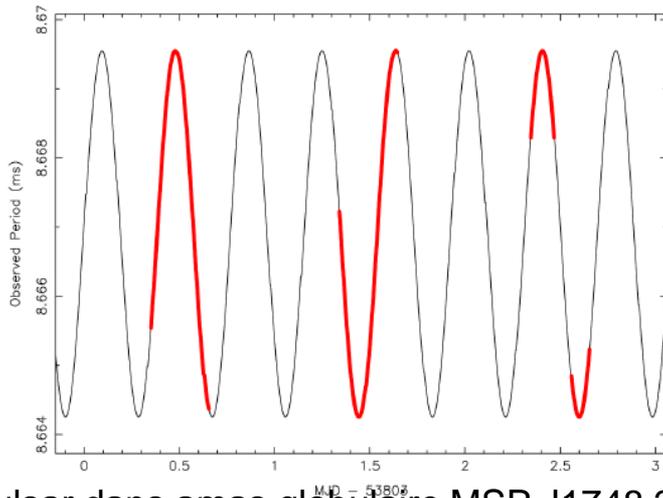
La plus massive évolue plus rapidement en étoile à neutrons



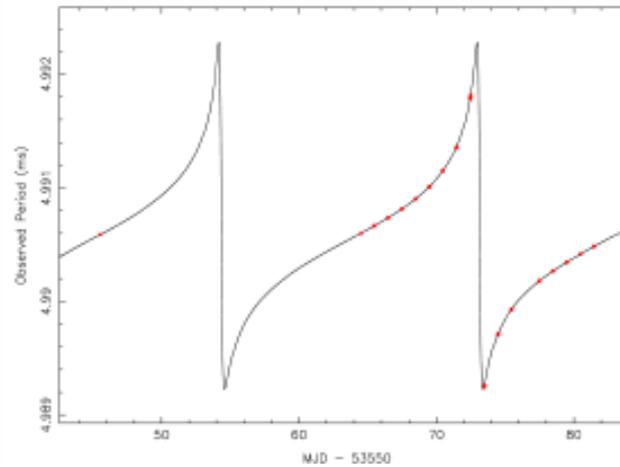
Puis la deuxième étoile évolue en géante rouge
Son enveloppe est captée par le pulsar. La rotation du Pulsar s'accélère

Pulsar Binaire : Oscillations du temps d'arrivée

- Un certain nombre de Pulsars sont en orbite autour d'une autre étoile.
- **Période orbitale** de 1.6 h à qq années
- 1/100 des pulsars normaux
- 50% des pulsars ms
- Le compagnon (invisible) a une masse entre
 - 10^{-2} - 10^{-1} Ms = naine blanche
 - 1-10 Ms = étoile normale
 - 5-6 pulsars ont un autre Pulsar pour compagnon (Pulsar Double)
 - 1 Pulsar a des planètes



Pulsar dans amas globulaire MSP J1748 2446N in Terzan 5. orbite quasi circulaire ($e=4.6 \cdot 10^{-5}$)
Masse du compagnon 0.47 Ms. La difference entre le demi grand axe et le demi petit axe est d'environ 51 cm



Pulsar MSP J0514 4002A dans l'amas globulaire NGC 1851. Orbite très excentrique ($e = 0.88$)

Problème à 2 corps en interaction de Gravitation

Deux masses m_1 et m_2 en M_1 et M_2 . Centre de Masse G :

$$\vec{r} = \overrightarrow{M_1 M_2} = \overrightarrow{GM_2} - \overrightarrow{GM_1} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

$$m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 = \vec{0}$$

$$\vec{r}_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{r} \quad \vec{r}_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{r}$$

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} : \text{masse réduite}$$

$$M = m_1 + m_2 : \text{masse totale}$$

$$E_c = \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_2^2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \vec{v}^2 = \frac{1}{2} \mu \vec{v}^2$$

$$\vec{L} = \overrightarrow{GM_1} \wedge m_1 \vec{v}_1 + \overrightarrow{GM_2} \wedge m_2 \vec{v}_2 = \vec{r} \wedge \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \vec{v}$$

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge \mu \vec{v}$$

$$E_p = -G \frac{m_1 m_2}{r} = -G \frac{\mu M}{r}$$

$$E = \text{Conste} ; \vec{L} = \text{Const}$$

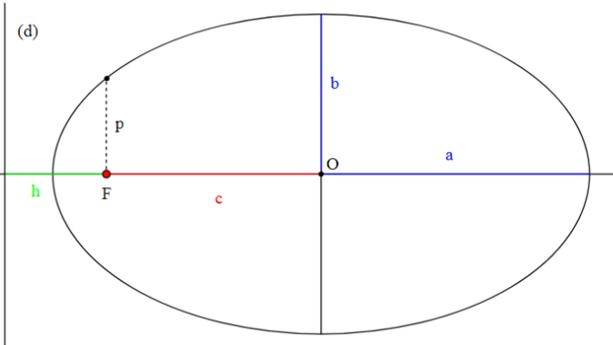
⇒ Trajectoire plane, lois des aires,

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta)}$$

$$e^2 = 1 + \frac{2EL^2}{G^2 M^2 \mu^3} \quad p = \frac{L^2}{GM \mu^2}$$

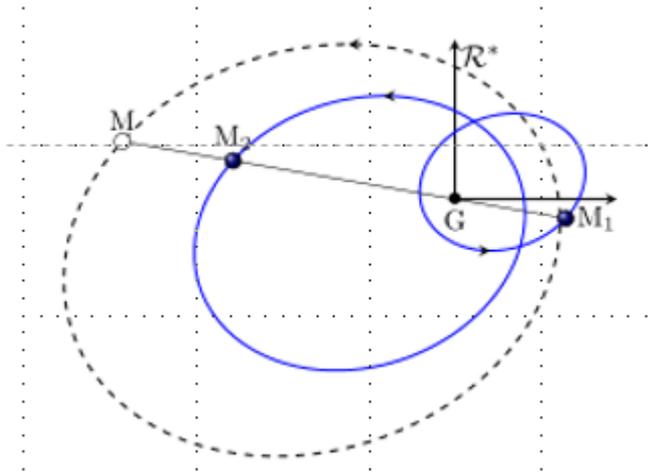
Conique de paramètre p et d'excentricité e
 $e < 0$ ellipse, $e = 0$ Parabole; $e > 0$ Hyperbole

Trajectoires elliptiques : $E < 0$



$$\text{Math} \Rightarrow a = \frac{p}{1-e^2} \quad b = \frac{p}{\sqrt{1-e^2}} \quad e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a} \quad p = \frac{b^2}{a}$$

$$\text{Physique} \Rightarrow a = \frac{GM\mu}{2|E|} \quad \text{et} \quad \frac{a^3}{P^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$



$$\vec{r}_1 = -\frac{m_2}{m_1+m_2} \vec{r} \quad \vec{r}_2 = \frac{m_1}{m_1+m_2} \vec{r}$$

$$a_1 = \frac{m_2}{M} a \Rightarrow a_1^3 = \left(\frac{m_2}{M}\right)^3 \frac{GM}{4\pi^2} P^2 = \frac{Gm_2^3}{(m_1+m_2)^2} \frac{P^2}{4\pi^2}$$

$$a_1^3 = \frac{Gm_2^3}{(m_1+m_2)^2} \frac{P^2}{4\pi^2}$$

$$a_2^3 = \frac{Gm_1^3}{(m_1+m_2)^2} \frac{P^2}{4\pi^2}$$

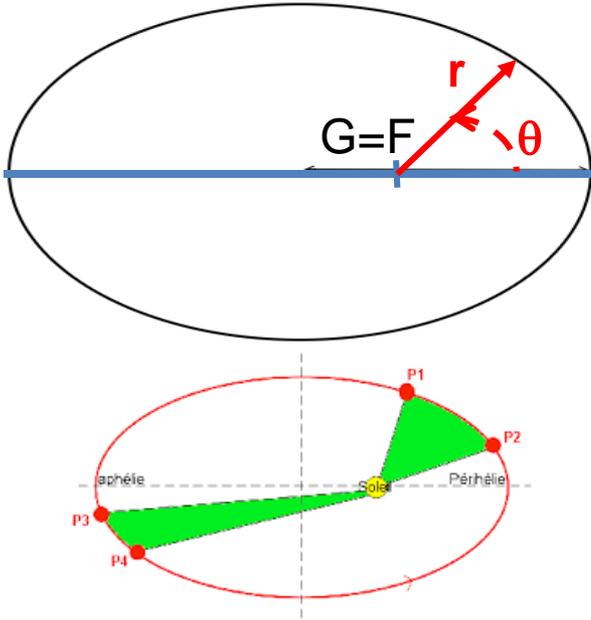
Equation de Kepler

Equation polaire de l'ellipse $r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta)}$

Mais pour une ellipse
la relation entre θ et t n'est pas linéaire
(pour un cercle : oui)

Pourquoi ?

$\vec{L} = \text{Conste} \Rightarrow$ loi des aires : $L = \mu r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{Conste}$



Nouvelle équation paramétrique (Cf Landau Mécanique) : u anomalie excentrique

$$r = a(1 - e \cos(u)) ; x = r \cos \theta = a(\cos u - e) ; y = r \sin \theta = a \sqrt{1 - e^2} \sin u$$

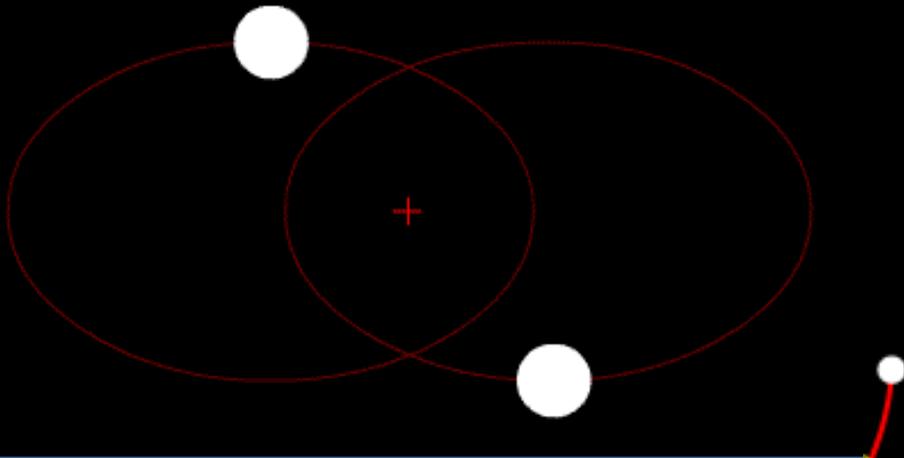
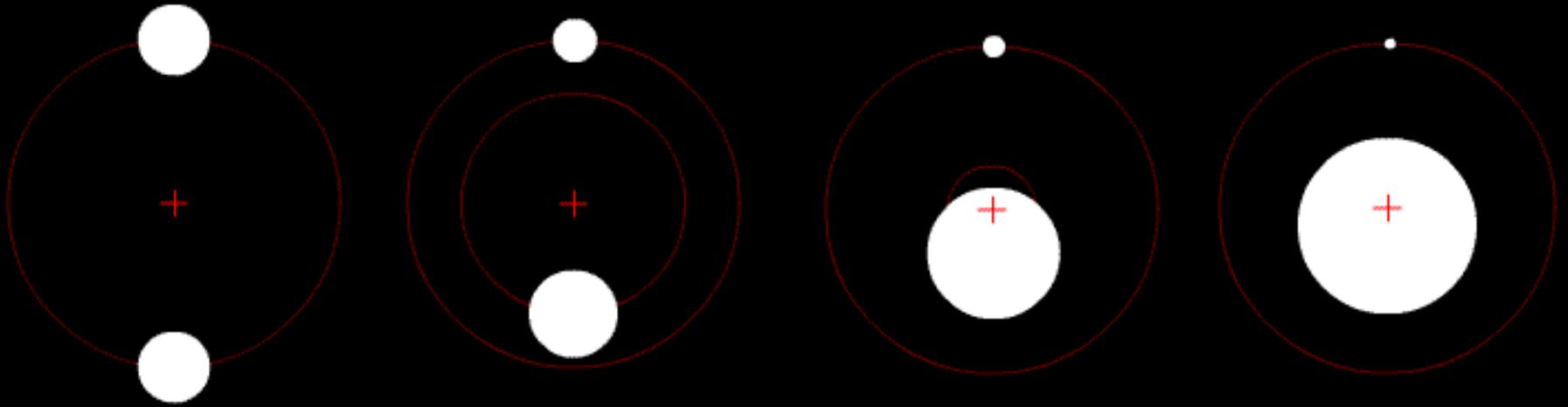
$$\cos \theta = \frac{a}{r} (\cos u - e)$$

$$\sin \theta = \frac{a}{r} \sqrt{1 - e^2} \sin u$$

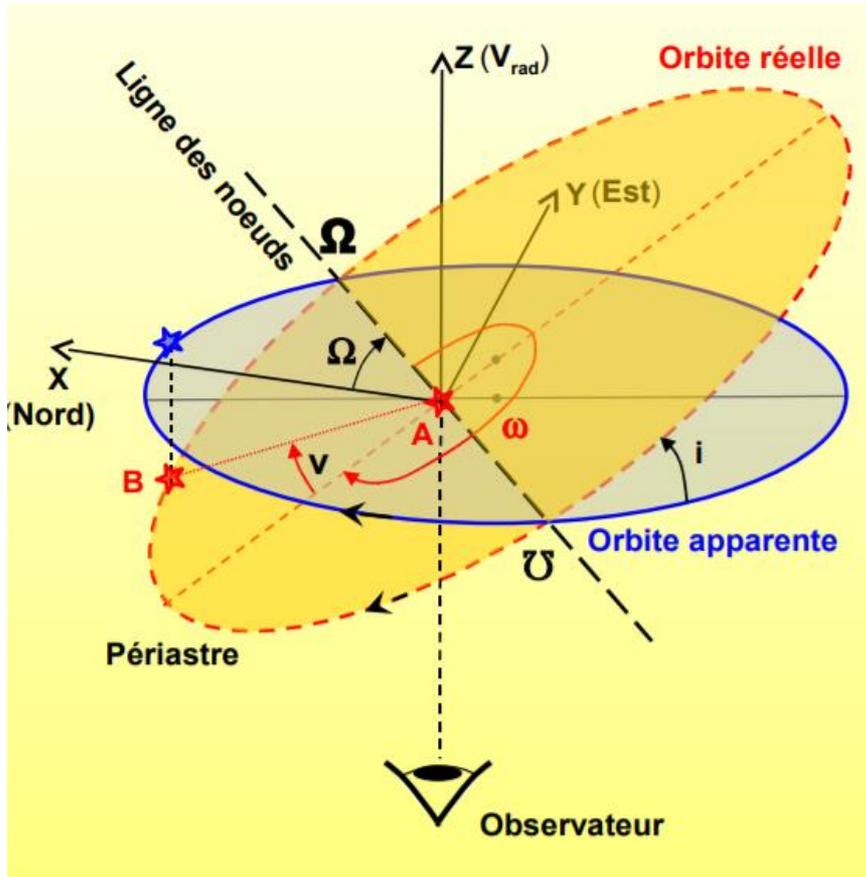
Pour trouver $u = f(t)$ résoudre l'équation de Kepler

$$\omega t = \frac{2\pi}{P} t = u - e \sin(u)$$

Etoiles doubles



Paramètres de l'Orbite d'une étoile binaire (double)



P période autour du centre de gravité

T passage au Périastre

a demi grand axe

e excentricité

Ω Angle de position de la ligne des nœuds

Ω (nœud ascendant)

ω : argument du périastre dans l'orbite réelle mesuré dans le sens du mouvement

à partir du nœud ascendant

i : inclinaison du plan de l'orbite

- mouvement direct $0^\circ \leq i < 90^\circ$

- mouvement rétrograde $90^\circ < i < 180^\circ$

AZ, sens des valeurs croissantes de la vitesse radiale

AX,AY axes du plan tangent à la sphère céleste

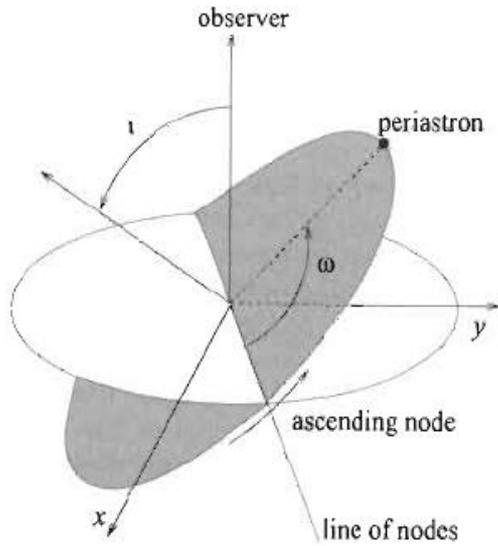
ce système de coordonnées est rétrograde.

Paramètres en Mécanique de Newton (Képlérien)

Sans perturbation, sans relativité générale tout est constant

(sauf translation d'ensemble)

Roemer's « Time delay »



Orbite vraie origine au périastre : $r_1(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos(\theta)}$

Orbite vraie origine au nœud ascendant :

$$r_1(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos(\theta + \omega)}$$

Coordonnée z de l'astre par rapport au plan perpendiculaire à la visée

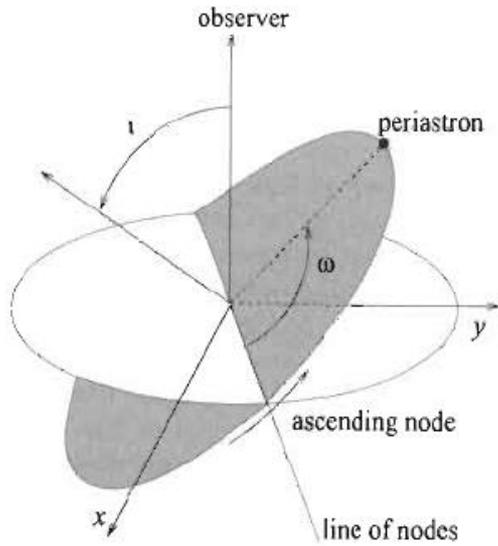
$$z = r_1 \sin(\theta + \omega) \sin(i)$$

Délai de Roemer :

$$\tau = \frac{z}{c} = \frac{r_1}{c} \sin(\theta + \omega) \sin(i)$$

Attention : θ ne varie pas proportionnellement au temps (loi des aires). Sauf pour une orbite circulaire

Roemer's « Time delay » :



$$\tau = \frac{r_1}{c} \sin(\theta + \omega) \sin(i) = \frac{r_1 \sin(i)}{c} [\sin \theta \cos \omega + \cos \theta \sin \omega]$$

u anomalie excentrique :

$$\cos[\theta(u)] = \frac{\cos u - e}{1 - e \cos u} \quad \sin[\theta(u)] = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin(u)}{1 - e \cos u}$$

$$r_1(u) = a_1 (1 - e \cos(u))$$

$$\tau = \frac{r_1 \sin(i)}{c(1 - e \cos u)} [(1 - e^2)^{1/2} \sin(u) \cos \omega + (\cos u - e) \sin \omega]$$

$$\tau = \frac{a_1 \sin(i)}{c} [(1 - e^2)^{1/2} \sin(u) \cos \omega + (\cos u - e) \sin \omega]$$

+ Equation d'Euler : $u - e \sin(u) = \frac{2\pi}{P} t$

Connaissant P, ω , e, $a_1 \sin i$ on peut calculer la courbe $\tau(t)$

Détermination des Paramètres Képlériens

Expérimentalement on obtient la courbe donnant le delay sur 1 période.

L'Etude de la courbe permet d'obtenir :

P période orbitale

T passage au Périastre

$a \sin(i)$

e excentricité

ω : argument du périastre dans l'orbite réelle

Méthode : John B. Irwin « The determination of light time orbit » Astrophysical Journal, vol. 116, p.211 (1952) Pour Binaires à Eclipses

Mais si on observe Une seule des 2 étoiles de la binaire, la mécanique de Newton ne donne pas les masses, ni l'inclinaison de l'orbite

Lois de Kepler donnent la relation de masse :
$$\frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{1}{499^3 (1 - e^2 \cos^2 \omega)^{3/2}} \frac{K^3}{P^2}$$

Mesures sur PSR1913+16

- Le fit de la formule du timing (après 27 ans d'observations!), **permet de déterminer les paramètres keplerien avec une très bonne précision :**

$$a_1 \sin i = 2.341774(1) \text{ s} , \quad e = 0.6171338(4)$$

$$T_0 \text{ (MJD)} = 46443.99588317(3) , \quad \omega = 226.57518(4) \text{ deg}$$

$$P = 27906.9807807(9) \text{ s}$$

Mais en plus les paramètres varient lentement :

$$d\omega/dt = 4.226607(7) \text{ deg/an},$$

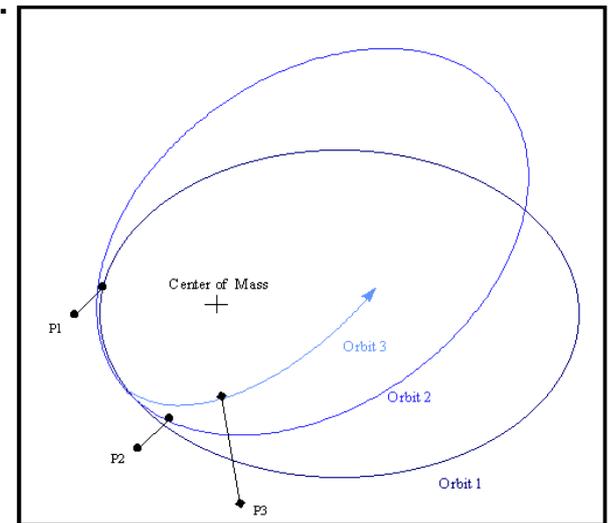
Précession du Périastre

Vérification d'Einstein pour Mercure

Relativité Générale sans Ondes de Gravitation

$$\text{Résultat nouveaux : } dP/dt = -2,425 \times 10^{-12}$$

Ondes de gravitation



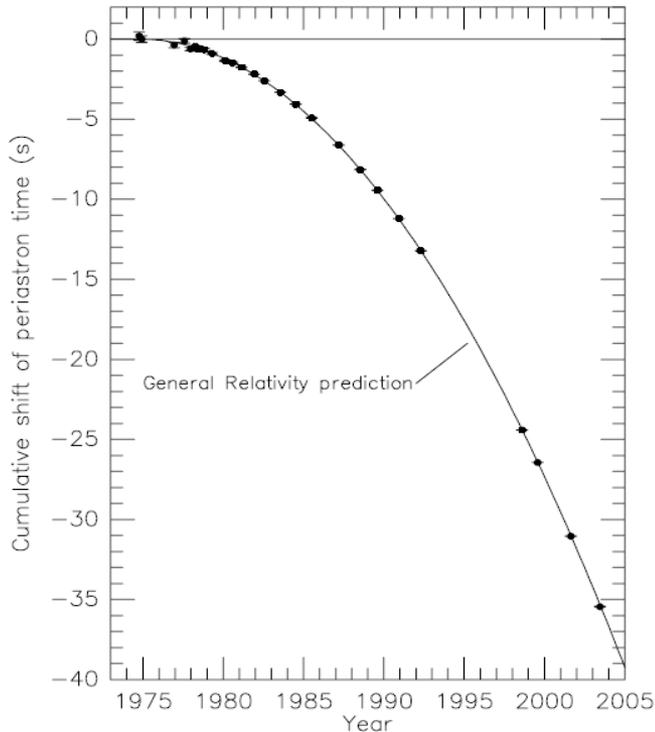
Taylor et Hulse : Prix Nobel 1993



Joseph H Taylor Jr.
1941 -

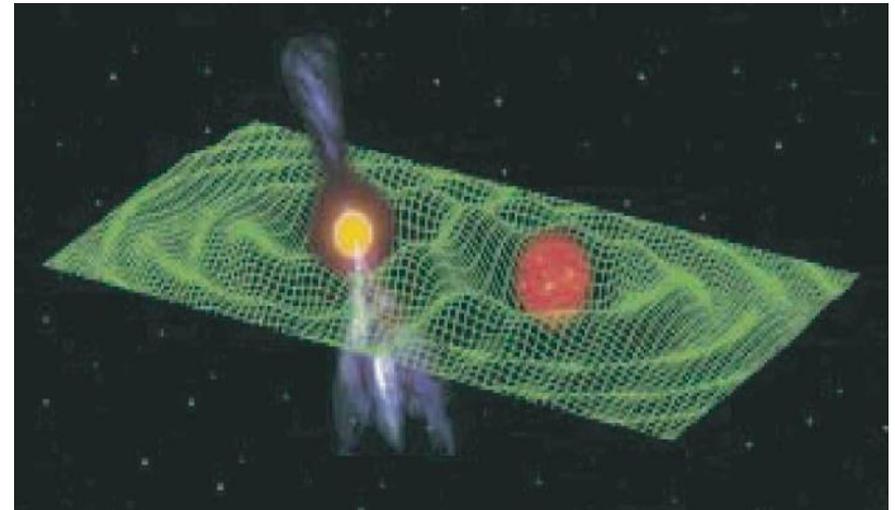


Russell A Hulse
1950 -



Pulsar 1913+16: système binaire d'étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre

- **Diminution de la période orbitale (Séparation $\sim 10^6$ km, Diminution de 3mm/orbite(8h))**
- **Diminution en accord avec la prédiction de la Relativité Générale (perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles)**



Détermination des masses (et de $\sin i$ et de a_1 et de a_2)

$$\dot{\omega} = 3G^{2/3}c^{-2}(P_b/2\pi)^{-5/3}(1-e)^{-1}(m_p+m_c)^{2/3}$$

Précession du Périastre
(Einstein, Landau)

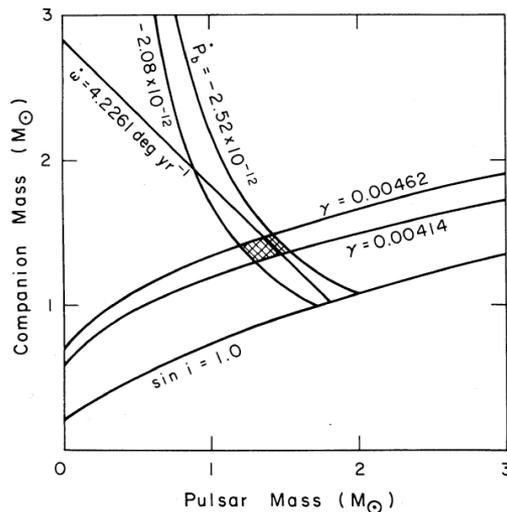
$$\dot{P}_b = -\frac{192\pi G^{5/3}}{5c^5}(P_b/2\pi)^{-5/3}(1-e^2)^{-7/2}$$

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

Rayonnement d'Ondes
de Gravitation (Einstein)

$$\gamma = G^{2/3}c^{-2}e(P_b/2\pi)^{1/3}m_c(m_p+2m_c)(m_p+m_c)^{-4/3}$$

Dilatation du Temps
(Einstein, Damour)



Solution graphique :

Membres de gauche : mesurés avec leurs incertitudes
Membres de droite : fonction de m_p et m_c .

**Si RG est juste et pas d'erreurs expérimentales :
Les courbes se couperaient en 1 point**

En fait : zone d'intersection non nulle.

Damour & Deruelle 1986; Taylor & Weisberg 1989;
Damour & Taylor 1992, and references therein):

Détermination des paramètres physiques

$$\sin i = G^{-1/3} c (a_p \sin i / m_c) (P_b / 2\pi)^{-2/3} \\ \times (m_p + m_c)^{2/3},$$

$$a = G^{1/3} c^{-1} (P_b / 2\pi)^{2/3} (m_p + m_c)^{1/3},$$

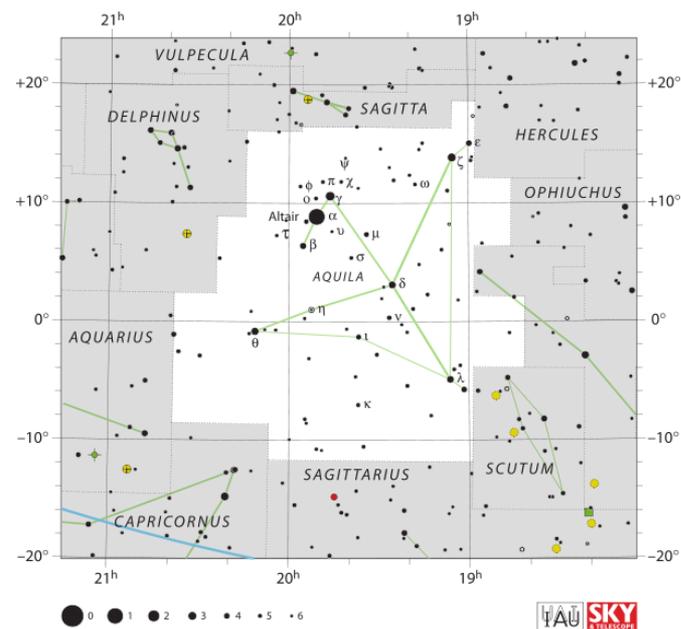
$$a_p = a m_c (m_p + m_c)^{-1},$$

$$a_c = a m_p (m_p + m_c)^{-1}.$$

Grâce à la relativité générale tous les paramètres sont déterminés avec grande précision.

Et ceci en détectant qu'une étoile sur les deux

PSR B1913+16



Constellation Aigle

Ascension droite (α) : 19h 15m 28,00s

Déclinaison (δ) : $+16^\circ 06' 27,4''$

Distance : 23 250 al (7 128,5 pc)

$M_1 = 1,4414 \pm 0,0002 M_\odot$

$M_2 = 1,3867 \pm 0,0002 M_\odot$

La séparation minimale des composants, au périastre, est de 1,1 fois le rayon du Soleil, la maximale, à l'apoastre, de 4,8 fois le rayon du Soleil. L'orbite est inclinée de 45° et orientée de telle façon que le périastre soit presque perpendiculaire à la ligne de visée.

Vérification de la relativité générale avec grande précision

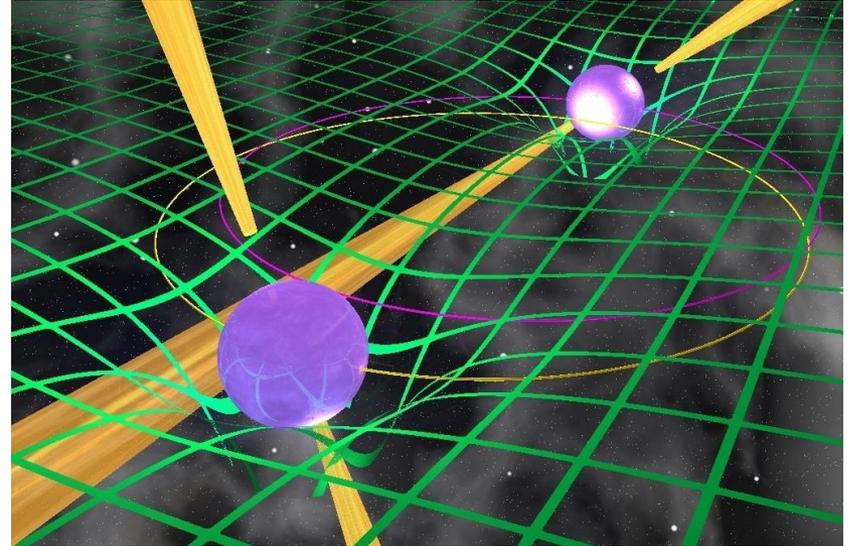
Élimination de théories concurrentes

Mise en évidence indirectes des ondes de gravitation

RG+Pulsars binaires = outils de l'astrophysique

pulsar double PSR J0737-3039

- deux étoiles à neutron, détectées comme pulsars, gravitant l'un autour de l'autre
- période de l'orbite 2.4 h !
- $P_A = 22 \text{ ms}$, $P_B = 2.7 \text{ s}$



- Périastre avance de 16.9 deg/an! : Système très relativiste

5 paramètres post-Keplerien mesurés

après seulement 2.5 ans de données, test de la RG au niveau de 0.05%,
beaucoup mieux que le pulsar de Hulse-Taylor

PSR J0737-3039A/B Post-Keplerian Effects

R: Mass ratio

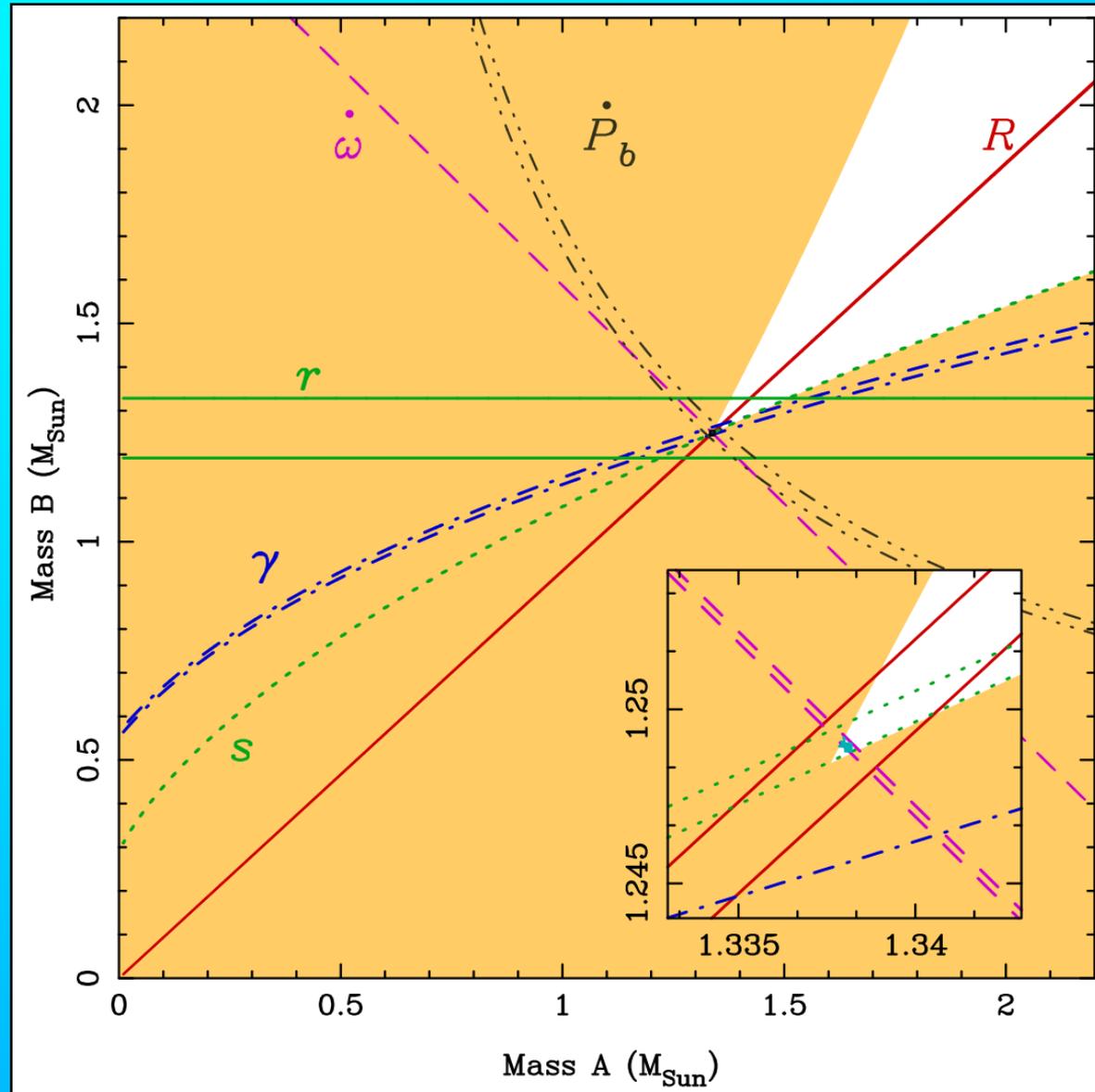
$\dot{\omega}$: periastron advance

γ : gravitational redshift

r & s : Shapiro delay

\dot{P}_b : orbit decay

GR is OK!
Consistent at the
0.05% level!



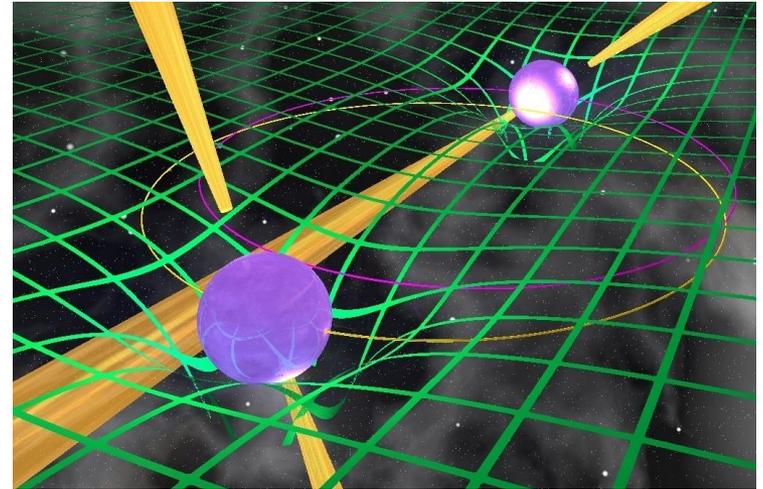
(Kramer et al. 2006)

PSR J0730-3039A/B : Premier Pulsar double

- Découvert à Parkes en Parkes en 2003

Property	Pulsar A	Pulsar B
Spin period	22.699 milliseconds	2.773 seconds
Mass	1.337 solar masses	1.250 solar masses
Orbital period	2.454 hours (8834.53499 seconds)	

Avance du Périhélie :16.9 deg/an!



Due to relativistic spin precession, the pulses from Pulsar B are no longer detectable as of March 2008, but are expected to reappear in 2035 due to precession back into view.

As a result of energy loss due to gravitational waves, the common orbit shrinks by 7 mm per day. The two components will coalesce in about 85 million years.

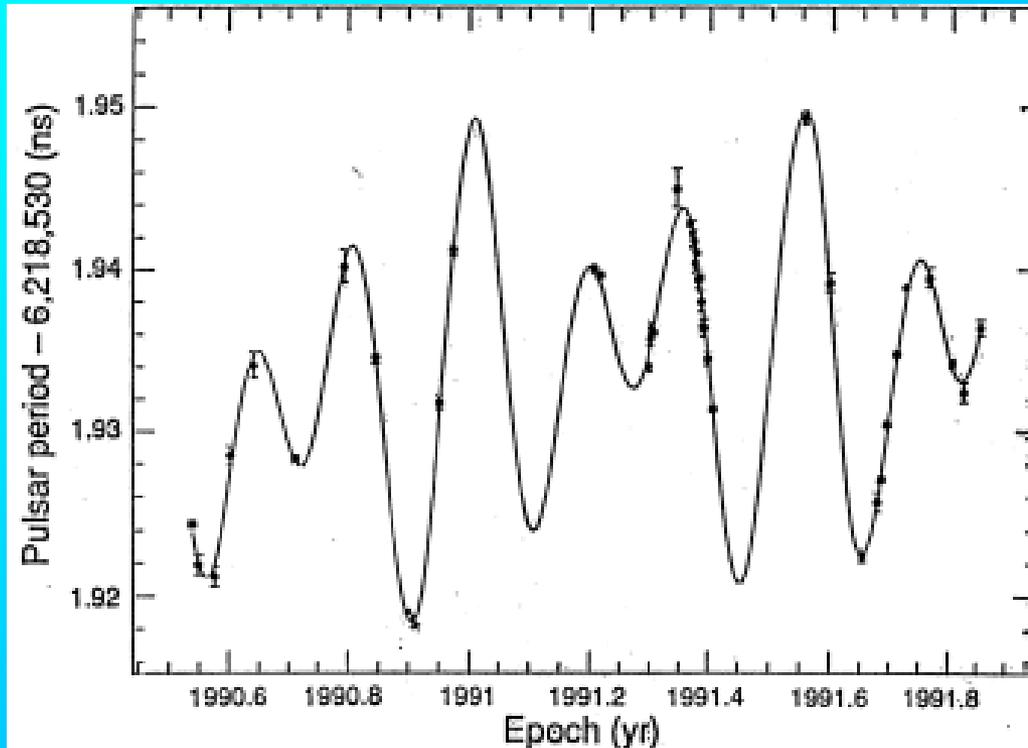
Planète autour d'un pulsar binaire

PSR B1257+12 – First detection of extra-solar planets

A: 3.4 Earth masses, 66.5-day orbit

B: 2.8 Earth masses, 98.2-day orbit

C: ~ 1 Moon mass, 25.3-day orbit

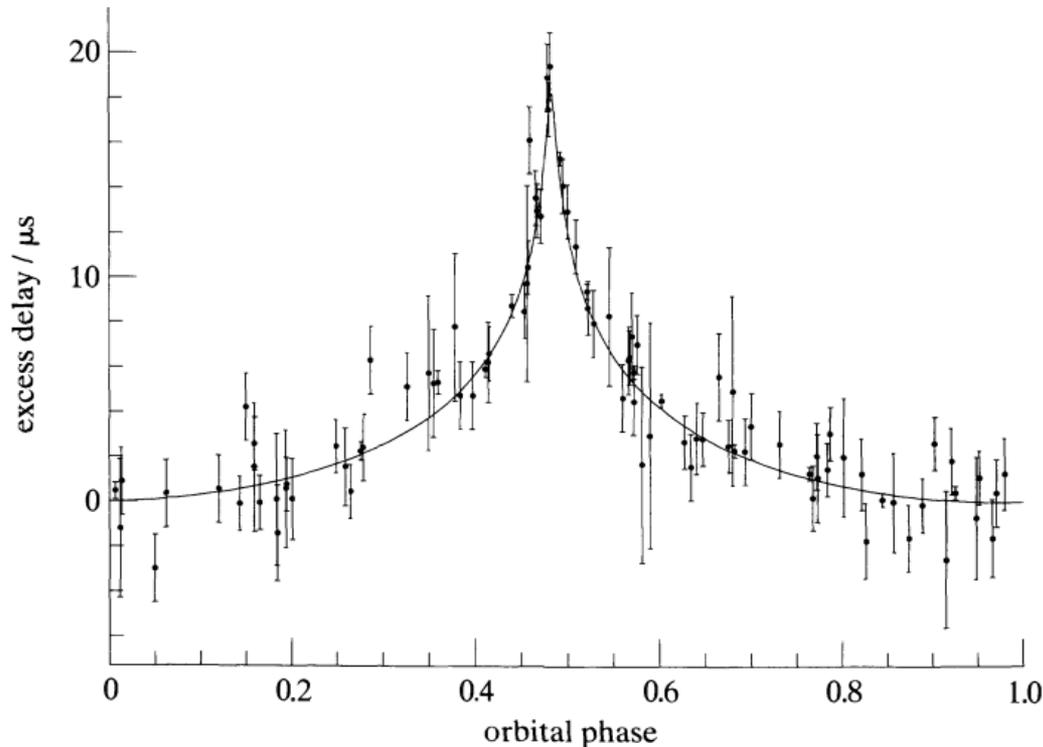


Wolszczan & Frail (1992); Wolszczan et al. (2000)

Effet Shapiro

Dans le cas d'une **métrie de Schwarzschild**, le retard Δt pour aller d'un point A à un point B dont les coordonnées radiales sont r_A et r_B s'écrit¹ :

$$\Delta t \approx \frac{2GM}{c^3} \left[\ln \left(\frac{4r_A r_B}{r_0^2} \right) - 1 \right] = \frac{2\mu}{c^3} \left[\ln \left(\frac{4r_A r_B}{r_0^2} \right) - 1 \right] = \frac{R_s}{c} \left[\ln \left(\frac{4r_A r_B}{r_0^2} \right) - 1 \right]$$



Measurement of the Shapiro delay in the PSR 1855 + 09 system. The plotted curve is the theoretical function for $A^{(r,s)}$, equation (11). The parameters r and s have been adjusted for best fit to the data. (After Ryba & Taylor 1991.)

Pulsars as Physics Laboratories (R. D. Blandford et al 1993)