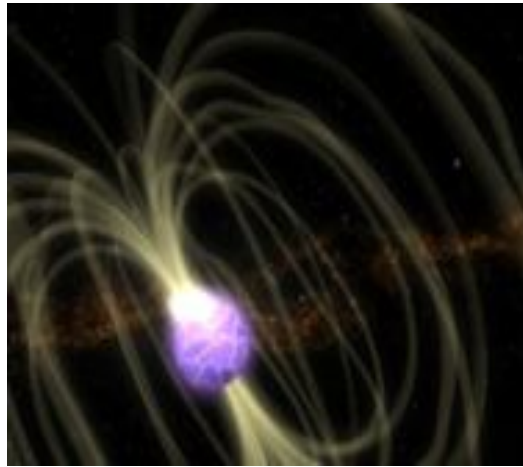


STELLA DI NEUTRONI



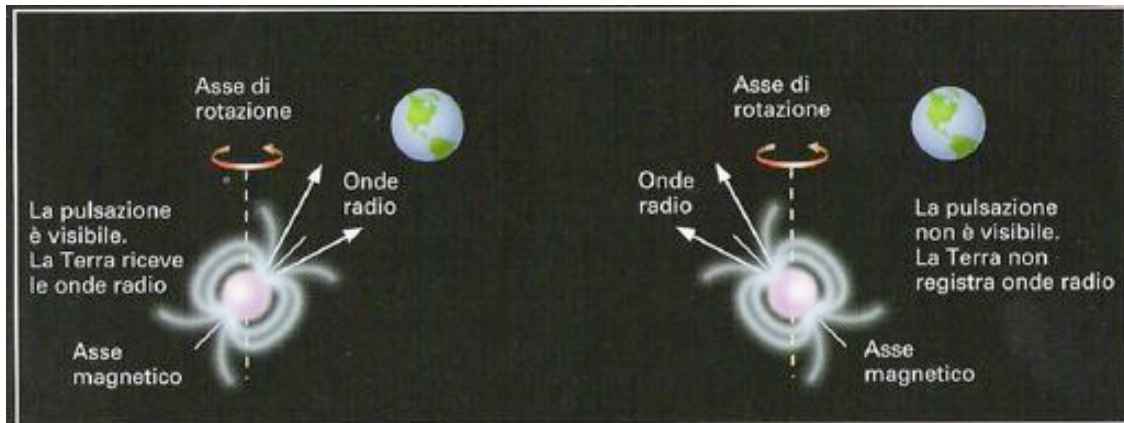
Si può pensare ad una stella di neutroni come ad un gigante nucleo atomico tenuto insieme da forze gravitazionali piuttosto che da forze nucleari.

CARATTERISTICHE PRINCIPALI

- Stadio finale dell'evoluzione stellare di una stella di $M_* > 10 M_S$: esaurito il combustibile nucleare, la conseguente esplosione (supernova) produce il collasso del nucleo in una stella di neutroni e l'espulsione degli strati esterni.
- $M_{SN} \sim 1,5 M_S$ e $R_{SN} \sim 10 \text{ km}$ $\rightarrow$ densità media 10^{14} più alta di quella solare.
- L'alta densità favorisce i processi di neutronizzazione $p + e^- \rightarrow n + \nu$ e la stella si presenta 'degenere' e supportata dall'equilibrio tra pressione gravitazionale e pressione di degenerazione dei neutroni liberi.
- A causa della legge di conservazione del momento angolare e del campo magnetico esse ruotano rapidamente ed hanno un intenso campo magnetico

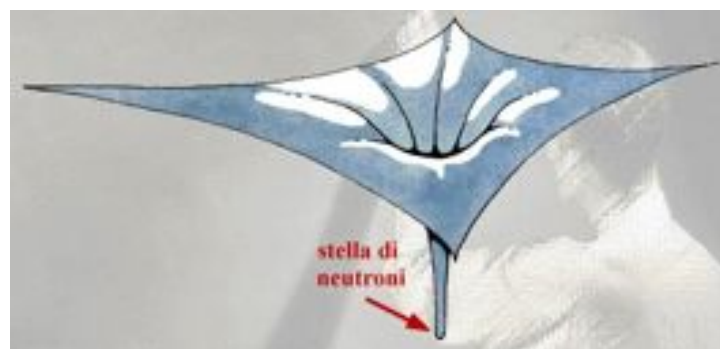
PULSAR

L'elevato campo magnetico di una stella di neutroni permea lo spazio circostante creando una regione di influenza detta magnetosfera. La materia in arrivo nella magnetosfera, elettroni e positroni, viene accelerata a velocità prossime a quelle della luce muovendosi lungo le sue linee di forza. Queste particelle emettono parte della loro energia cinetica



CENNI DI RELATIVITA'

La curvatura dello spazio-tempo dipende dalla "massa".



Lo spazio-tempo incurvato più semplice e più utile, in termini di applicazioni, è quello che rappresenta la geometria dello spazio vuoto intorno ad una sorgente di curvatura a simmetria sferica, ad esempio una stella sferica.

Questa geometria detta di Schwarzschild è descritta

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) (cdt)^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$g_{\alpha\beta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} t & r & \theta & \phi \end{matrix} \\ \begin{matrix} t \\ r \\ \theta \\ \phi \end{matrix} & \begin{pmatrix} -(1 - 2M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 - 2M/r)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix} \end{matrix}$$

PROPRIETA':

- questa metrica è indipendente dal tempo;
- questa metrica ha simmetria sferica per cambiamenti degli angoli θ e φ ;
- se $GM/c^2 r$ è piccolo allora:

$$ds^2 \approx - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) (cdt)^2 + \left(1 + \frac{2GM}{c^2 r}\right) dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

che è esattamente la forma della metrica di campo debole e statico:

$$ds^2 = - \left(1 + \frac{2\varphi(x^i)}{c^2}\right) (cdt)^2 + \left(1 - \frac{2\varphi(x^i)}{c^2}\right) (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

con potenziale gravitazionale di Newton pari a $\varphi = -GM/r$; questo conduce ad identificare la costante M della metrica di Schwarzschild con la massa totale della sorgente di curvatura;

Dalle formule riportate è possibile individuare un parametro che quantifichi la presenza degli effetti relativistici in un determinato sistema:

$$\frac{GM}{c^2 r}$$

Sulla superficie della Terra vale:

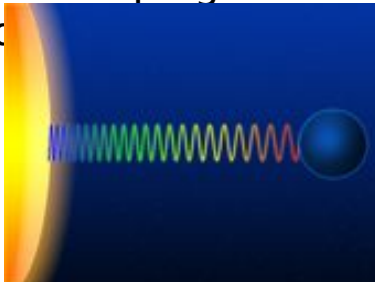
$$\frac{(6,67 \times 10^{-8}) (5,97 \times 10^{27})}{0,7 \times 10^{-9} (6,38 \times 10^8) (3 \times 10^{10})^2} \approx$$

Sulla superficie di una Stella di Neutroni vale:

$$\frac{(6,67 \times 10^{-8}) (1,5 \times 1,99 \times 10^{33})}{(10^7) (3 \times 10^{10})^2} \approx 0,2 \times 10^{-1}$$

Per i sistemi binari formati da stelle di neutroni / pulsars che verranno analizzati in seguito si riscontrano i seguenti effetti della relatività

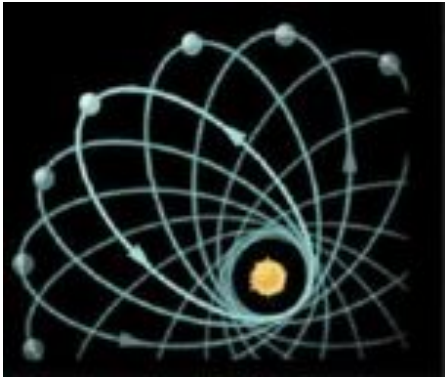
REDSHIFT GRAVITAZIONALE : attraversando un campo gravitazionale la lunghezza d'onda della luce, o di qualsiasi altra forma di radiazione elettromagnetica, subisce uno spostamento verso le regioni rosse dello spettro. Per comprendere possiamo pensare ad una palla che, lanciata in aria, rallenta durante la corsa verso l'alto; dunque quando un fotone si allontana da un campo gravitazionale, perde energia ed il suo



$$\omega_{\infty} = \omega_{*} \left(1 - \frac{2GM}{c^2 R}\right)$$

$$c^2 R$$

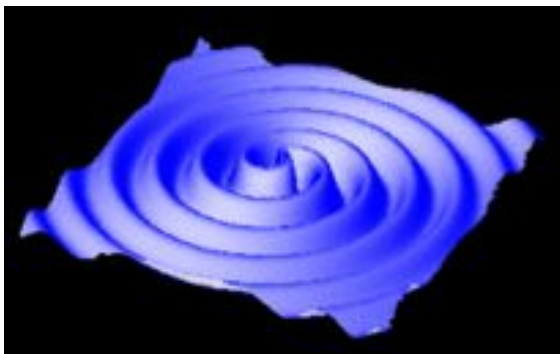
PRECESSIONE DELL' ORBITA: fenomeno per cui, per effetto delle interazioni gravitazionali, le orbite dei corpi non sono ellissi fisse e immutabili, come prevederebbero le leggi di Keplero, ma cambiano lentamente forma e orientazione ; in particolare l'asse dell'ellisse ruota lungo il piano dell'orbita così che la posizione del periastro (nel nostro caso, perielio per il



$$\frac{d\varphi_{\text{PREC}}}{dt} = \frac{6\pi G M^\circ}{c^2 a \tau (1 - \varepsilon^2)}$$

a = lunghezza del semiasse maggiore
 ε = eccentricità
 τ = periodo orbitale
 M° = massa della stella compagna

DIMINUZIONE DELL'ORBITA DOVUTA ALLA RADIAZIONE GRAVITAZIONALE: la teoria della relatività generale predice la continua perdita di energia da parte di un sistema binario di masse, che ruotano intorno ad un centro comune, nella forma di onde gravitazionali, che risultano il meccanismo con cui il campo gravitazionale si propaga nello spazio; questo flusso continuo di radiazione gravitazionale determina



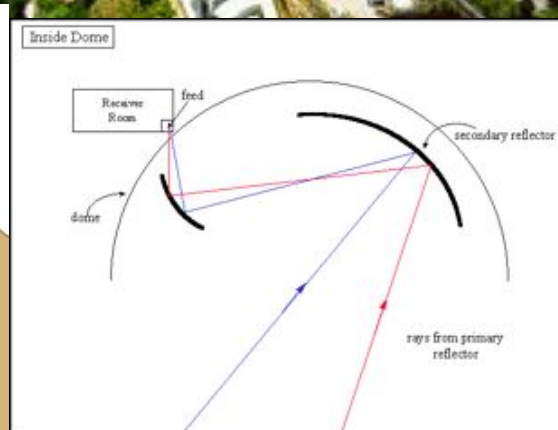
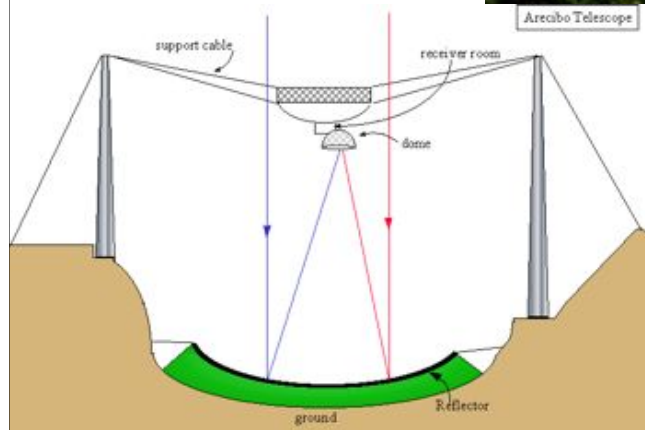
SISTEMA BINARIO : PSR 1913+16

SCOPERTA: Nel 1993 il Premio Nobel per la Fisica è stato assegnato a Russell Hulse e Joseph Taylor della Princeton University per la loro scoperta, avvenuta nel 1974, di una pulsar, PSR1913 +16, in un sistema binario con un'altra stella, in orbita intorno a un

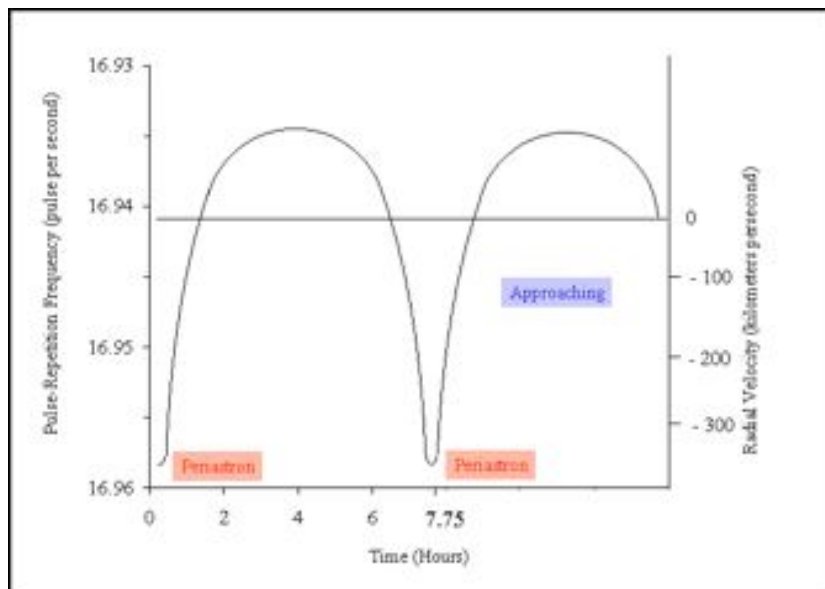
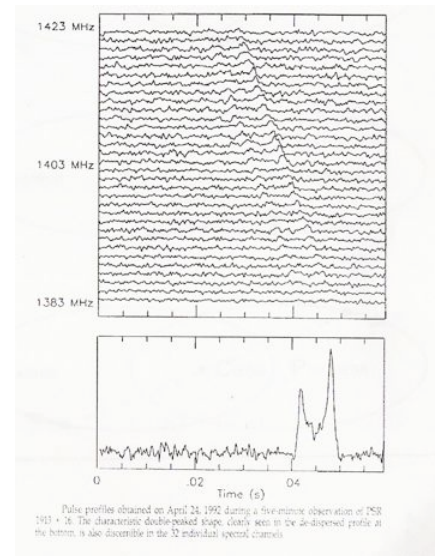
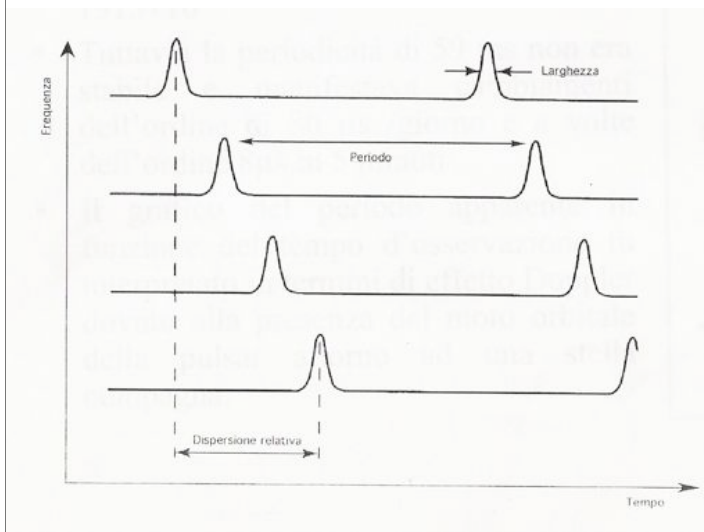


$$P = 59 \text{ ms}$$

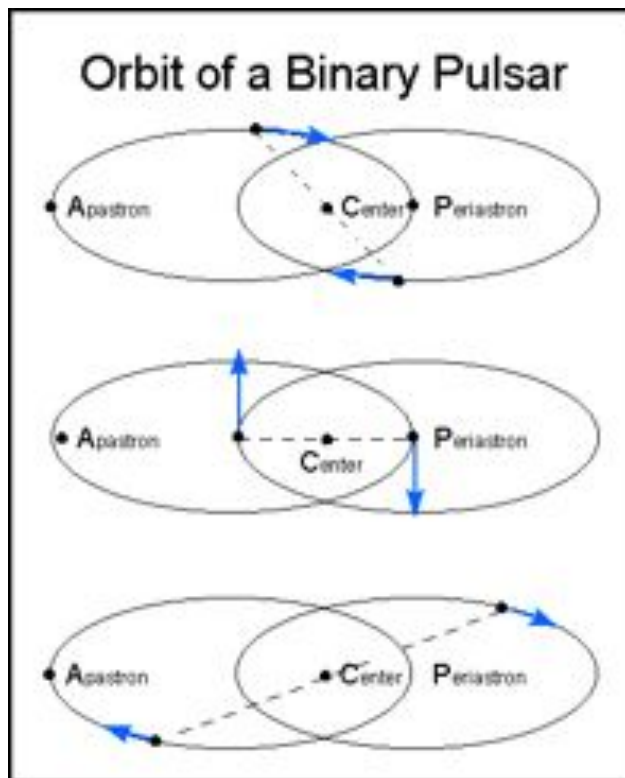
Radiotelesco
pio di
ARECIBO in
Puerto Rico



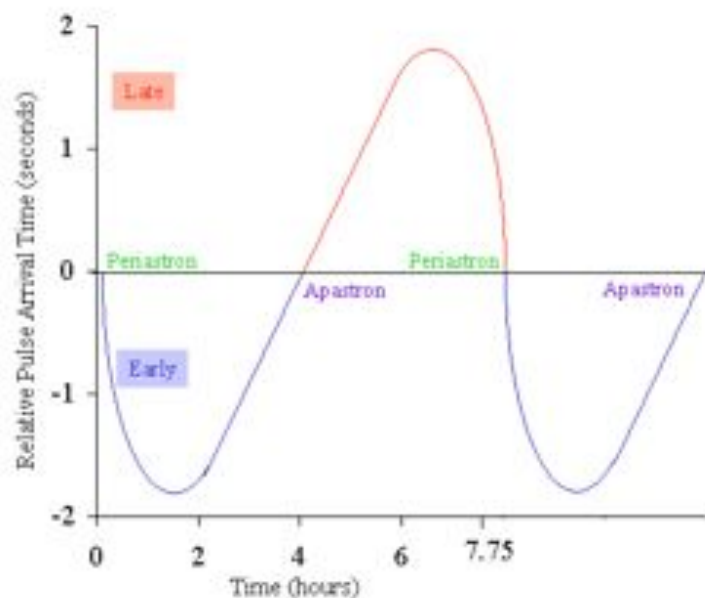
ASPETTI INTERESSANTI:



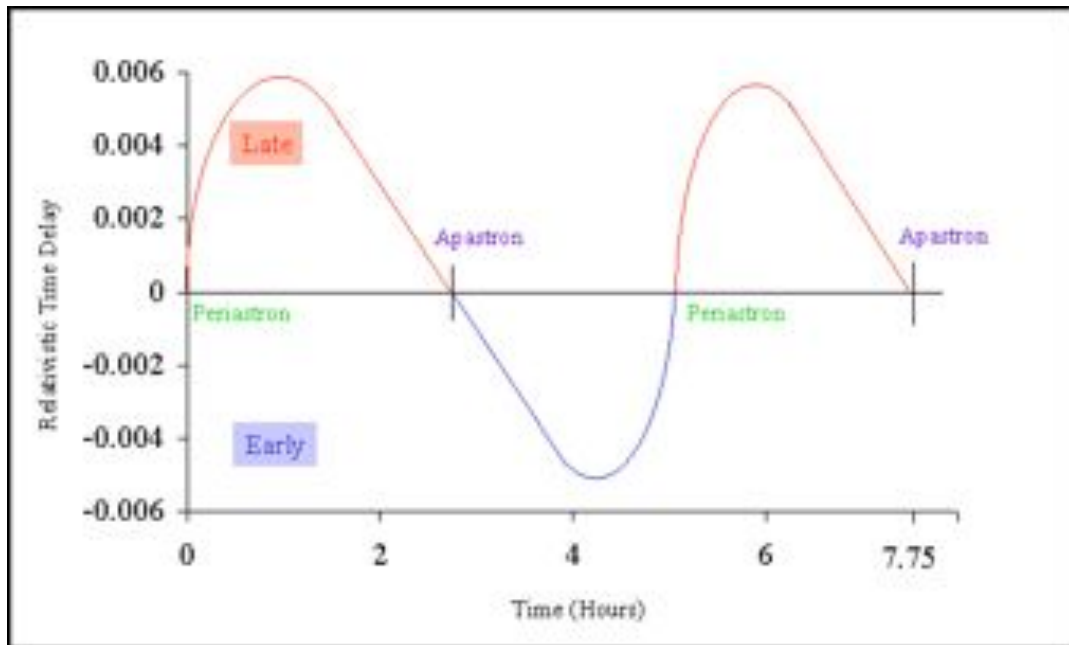
Quando la pulsar si muove verso di noi, è vicina al periastro e la frequenza di ripetizione è più alta e viceversa...



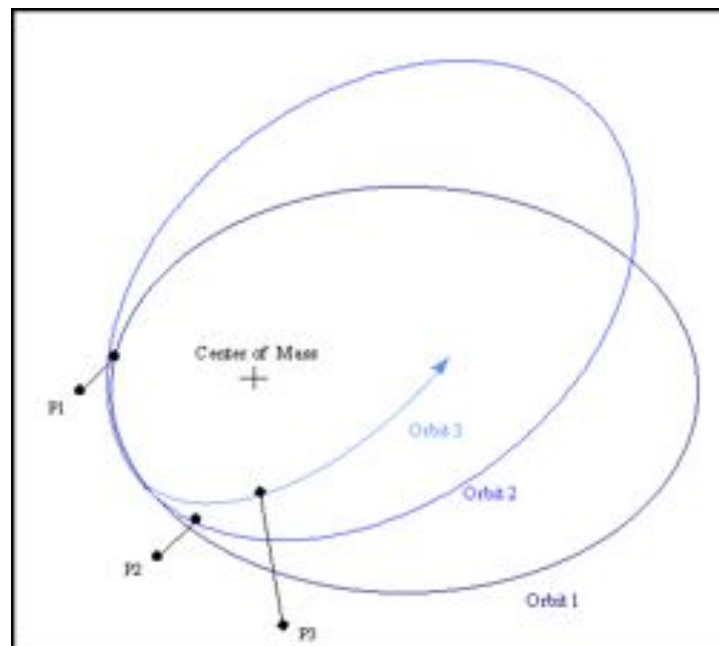
Raccolti i primi dati , Hulse e Taylor notarono che vi era una sistematica variazione nel tempo di arrivo degli impulsi. Queste variazioni erano periodiche di 7,75 ore. Capirono che tale comportamento indicava che la pulsar era in orbita binaria con un'altra stella.



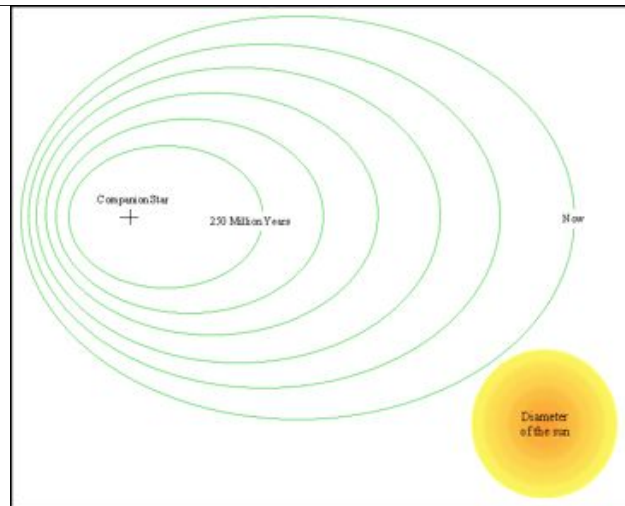
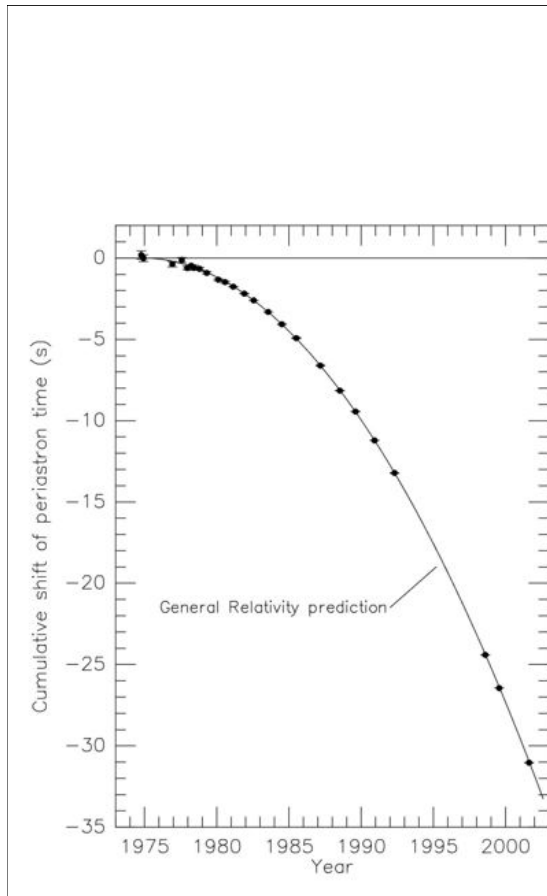
I tempi di arrivo degli impulsi variano anche a seconda di come la pulsar si muove nella sua orbita. La differenza è dovuta all'orientazione dell'orbita rispetto alla Terra. La differenza di 3 secondi luce implica che l'orbita è di circa 1 milione di chilometri.



Al periastro i campi gravitazionali sono più forti ed un ipotetico orologio batte più lentamente: il tempo fra gli impulsi ricevuti si allunga cioè redshift gravitazionale.



L'orbita della pulsar, appartenente ad un piano inclinato di $\sim 45^\circ$ rispetto alla direzione di vista, è aperta, quasi ellittica; l'asse precessa di $\sim 4,2^\circ/\text{anno}$: si osserva in un giorno ciò che accade per Mercurio in un secolo.



$$\frac{dP}{dt} = -2,40(9) \times 10^{-12} \text{ s s}^{-1}$$

(misurato)

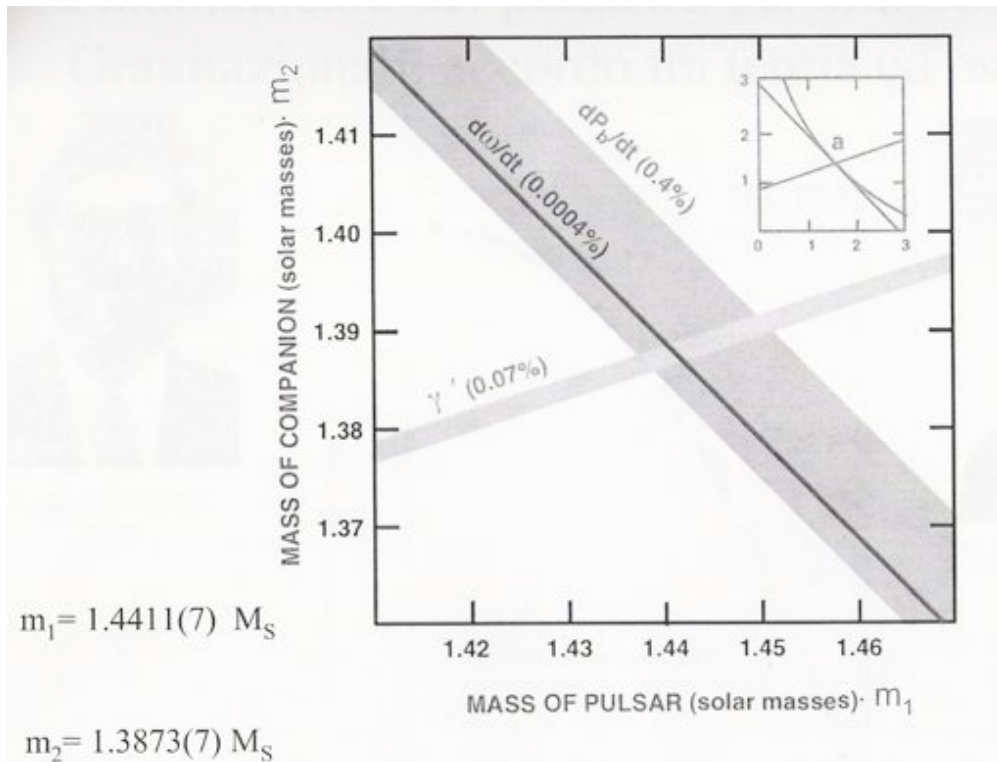
$$\frac{dP}{dt} = -2,403(2) \times 10^{-12} \text{ s s}^{-1}$$

(calcolato per la teoria)

CONCLUSIONI :

Table 14.4. *Parameters of the binary pulsar PSR 1913+16^a*

Parameter	Symbol (units)	Value
(i) 'Physical' parameters		
Right ascension	α	19 ^h 13 ^m 12. ^s 46549(15)
Declination	δ	16°01'08".189(3)
Pulsar period	P_p (ms)	59.029997929883(7)
Derivative of period	$\dot{P}_p$	$8.62629(8) \times 10^{-18}$
2nd derivative of period	$\ddot{P}_p$ (s ⁻¹)	$< 4 \times 10^{-30}$
(ii) 'Keplerian' parameters		
Projected semimajor axis	$a_p \sin i$ (light-sec)	2.341759(3)
Eccentricity	e	0.6171309(6)
Orbital period	P_b (s)	27906.9807807(9)
Longitude of periastron	ω_0 (°)	226.57531(9)
Julian ephemeris date of periastron	T_0 (MJD)	46443.99588321(5)
(iii) 'Post-Keplerian' parameters		
Mean rate of periastron advance	$\langle \dot{\omega} \rangle$ (° yr ⁻¹)	4.226628(18)
Gravitational redshift and time dilation	γ (ms)	4.294(3)
Orbital period derivative	$\dot{P}_b$ (10 ⁻¹²)	-2.425(10)



SISTEMA BINARIO : [PSR J0737-3039B](#)

SCOPERTA : Nel 2003 un team internazionale di astronomi scopre un sistema binario di due stelle di neutroni pulsanti, pulsar J0737-3039A e pulsar J0737-3039B, in orbita intorno ad un comune centro di massa.

Tra i nomi degli scienziati figurano quelli degli italiani:



e Nichi
 $P_A = 23$
 ms
 $P_B = 2,8$
 s

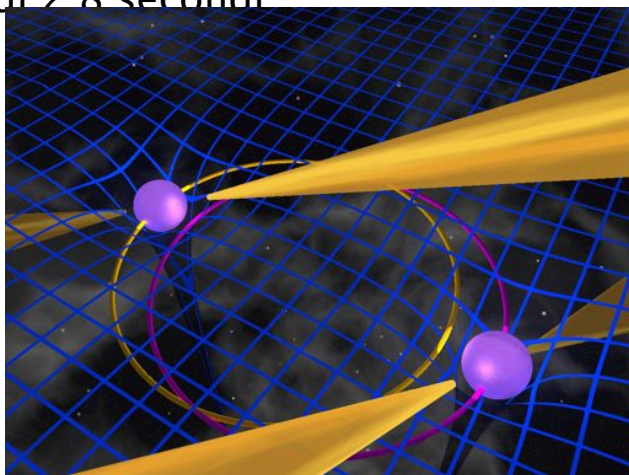
Radiotelescopio di PARKES in Australia



GREEN BANK TELESCOPE in West Virginia (USA)

ASPETTI INTERESSANTI:

➤ questo sistema binario e' l'unico nel quale entrambe le stelle producono impulsi radio osservabili da Terra. La pulsar A ruota su se stessa una volta ogni 23 millisecondi, mentre la pulsar B e' molto piu' lenta, avendo un periodo di rotazione di 2.8 secondi



➤ A causa del fatto che le due pulsar orbitino l'una attorno all'altra così rapidamente, si può predire che un certo numero di effetti di Relatività Generale (GR) siano piuttosto marcati. In effetti, è stato possibile misurare quattro di questi effetti entro pochi mesi dalla scoperta del sistema binario:

1. Avanzamento relativistico del periastro;
2. Redshift gravitazionale;
3. Diminuzione del periodo orbitale dovuto alla radiazione gravitazionale;
4. Ritardo di Shapiro: effetto relativistico di un apparente ritardo che si osserva nella propagazione di raggi luminosi vicino ad una massa sorgente di

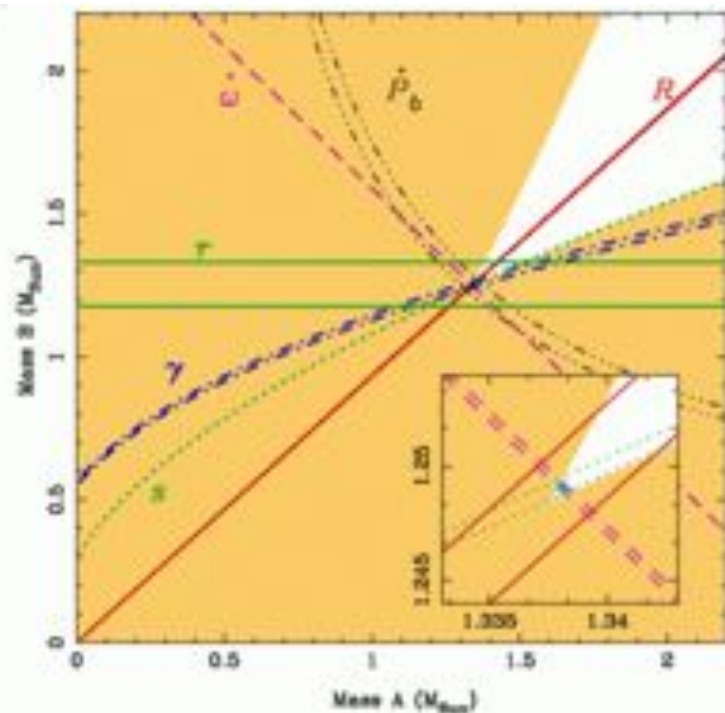
➤ A causa della curvatura dello spazio-tempo vicino ad oggetti molto massivi, l'asse di rotazione di entrambe le pulsars dovrebbe precedere intorno al vettore del momento angolare totale; detto in altri termini le due stelle dovrebbero oscillare come trottole mentre si muovono nello spazio-tempo curvo della loro orbita. Ciò dovrebbe tradursi in cambiamenti nella forma degli impulsi radio osservati, poiché i telescopi sulla Terra vedono parti leggermente

➤ Diversamente dai precedenti test di relatività generale nei quali la teoria di Einstein veniva verificata come correzione al primo ordine, per descrivere questo sistema in modo accurato è necessario utilizzare correzioni relativistiche di ordine più alto.

➤ Deviazioni del parametro $\dot{\omega}/\omega$ dai valori predetti dalla relatività generale potrebbero essere causati da contributi di accoppiamento spin-orbita. Questa possibilità potrebbe condurre alla misura per la prima volta del momento di inerzia di una stella di neutroni.

CONCLUSIONI :

	PSR J0737-3039A	PSR J0737-3039B
Pulse period P (ms)	22.69937855615 (6)	2773.4607474 (4)
Period derivative $\dot{P}$	1.74×10^{-18} (0.05×10^{-18})	0.88×10^{-15} (0.13×10^{-15})
Epoch of period (MJD)	52870.0	52870.0
Right ascension (J2000)	07 ^h 37 ^m 51 ^s .247 (2)	—
Declination (J2000)	-30°39'40''.74 (3)	—
Dispersion measure DM (cm^{-3} pc)	48.9 (2)	48.7 (2)
Orbital period P_b (day)	0.102251563 (1)	—
Eccentricity e	0.087779 (5)	—
Epoch of periastron T_0 (MJD)	52870.0120589 (6)	—
Longitude of periastron ω (deg)	73.805 (3)	$73.805 + 180.0$
Projected semimajor axis $x = a (\sin i)/c$ (s)	1.41504 (2)	1.513 (4)
Advance of periastron $\dot{\omega}$ (degree/year)	16.90 (1)	—
Gravitational redshift parameter γ (ms)	0.38 (5)	—
Shapiro delay parameter s	0.9995 (-32, +4)	—
Shapiro delay parameter r (μs)	5.6 (-12, +18)	—
Root mean square timing residual (μs)	27	2660
Flux density at 1390 MHz (mJy)	1.6 (3)	0-1.3 (3)
Characteristic age τ (My)	210	50
Surface magnetic field strength B (Gauss)	6.3×10^9	1.2×10^{12}
Spin-down luminosity $\dot{E}$ (erg/s)	6000×10^{30}	2×10^{30}
Mass function ($M_\odot$)	0.29097 (1)	0.356 (3)
Distance (kpc)	—	~ 0.6
Total system mass $m_A + m_B$ ($M_\odot$)	—	2.588 (3)
Mass ratio $R = m_A/m_B$	—	1.069 (6)
Orbital inclination from Shapiro s (degree)	—	87 (3)
Orbital inclination from $(R, \dot{\omega})$ (degree)	—	$87.7 (-29, +17)$
Stellar mass from $(R, \dot{\omega})$ ($M_\odot$)	1.337 (5)	1.250 (5)



$$m_A = 1,337(5)$$

$$M_S$$

$$m_B = 1,250(5)$$

$$M_S$$