

Experimentelle Hinweise auf Gravitationswellen Binärpulsare

Stephanie Häfner

4. Februar 2008

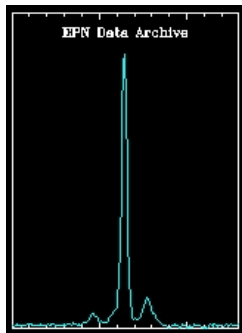


Abbildung: Crab-Pulsar, [http:](http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050326.html)

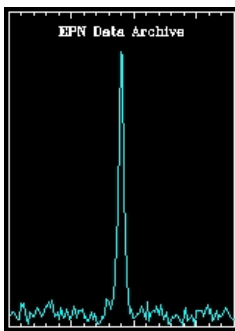
[//antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050326.html](http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050326.html)

Pulsar

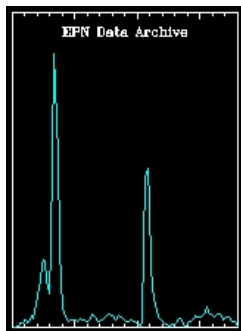
- Entdeckung 1967 durch Jocelyn Bell und ihren Doktorvater Antony Hewish (1974 Nobelpreis für Hewish)
- Neutronenstern bleibt nach Supernova Explosion eines massereichen Sterns zurück



Pulsar B0329+54
Periode: 0.7145 s



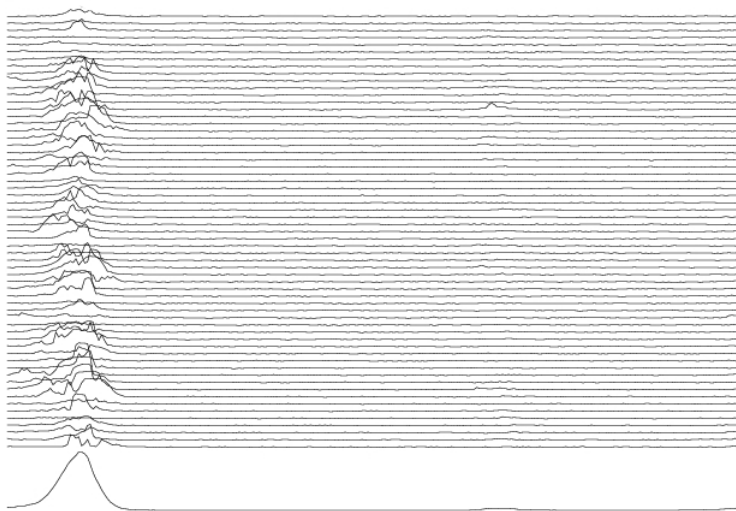
Vela-Pulsar
Periode: 89 ms



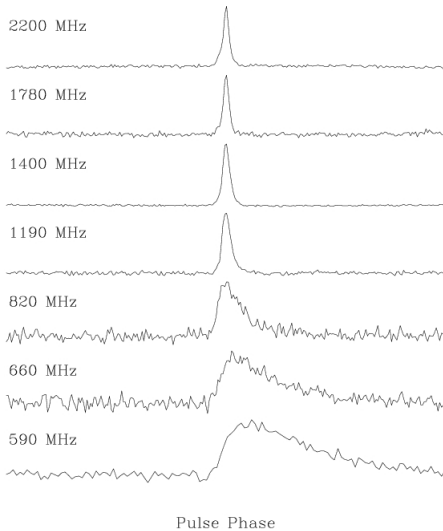
Crab-Pulsar
Periode: 33ms

sounds: <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html>

images: <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Resources/epn/browser.html>

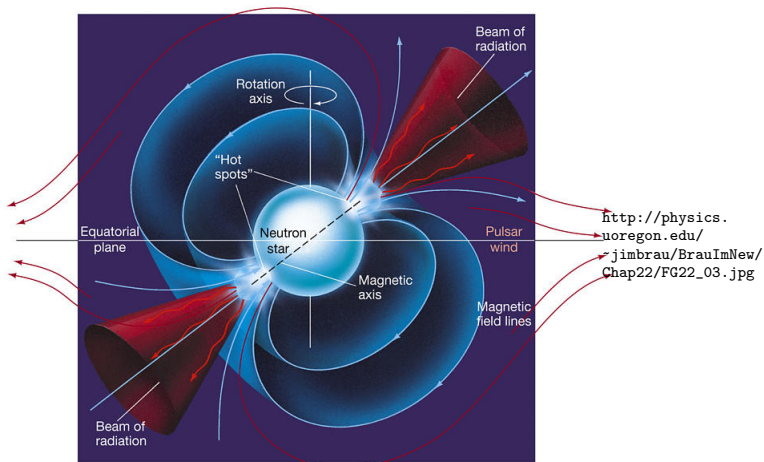


<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-5/index.html>



<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-5/index.html>

Leuchtturm-Modell



http://physics.uoregon.edu/~jimbrau/BrauImNew/Chap22/FG22_03.jpg

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

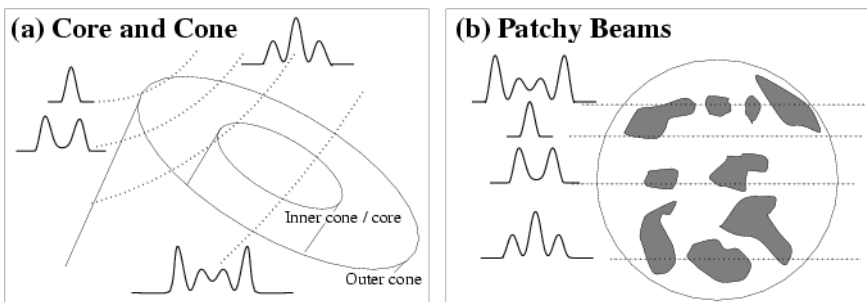


Abbildung: <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/>

Aufenthaltssorte

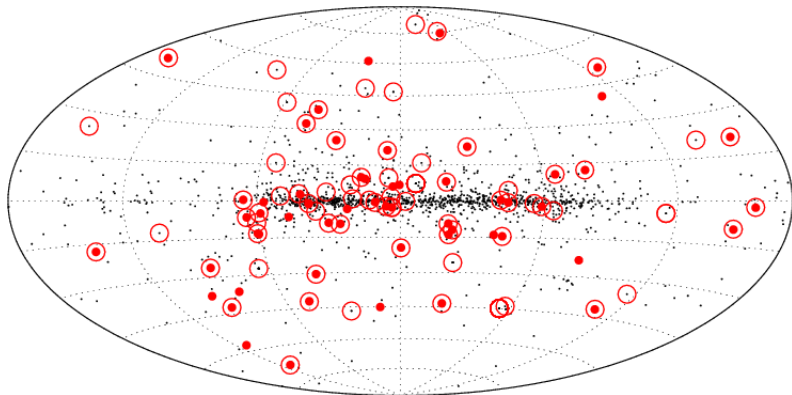
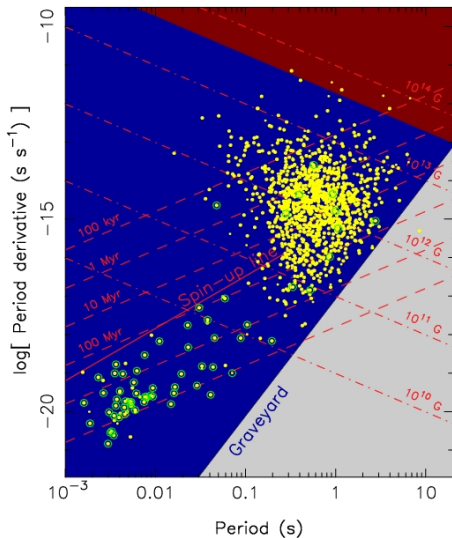


Abbildung: rot: Millisekunden-Pulsare, \bigcirc : Pulsar in Binärsystem

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.h>



Dipol-Näherung

Oberflächenmagnetfeldstärke

$$B \propto \sqrt{P\dot{P}}$$

charakteristisches Alter

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.html>

normale und MillisekundenPulsare

normale Pulsare

- Pulsperiode: $P \sim 0.5\text{s}$
- char. Alter: $\sim 10^7$ Jahre
- Magnetfeld: $\sim 10^{12}$ G

MillisekundenPulsare

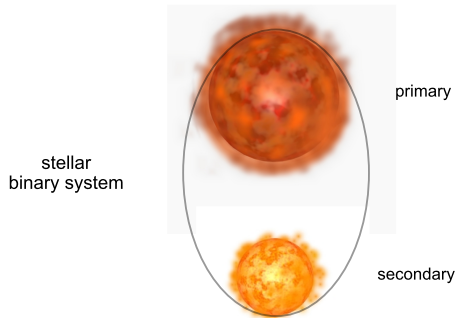
- Pulsperiode: $1.5\text{ms} \lesssim P \lesssim 30\text{ms}$
- char. Alter: $\sim 10^9$ Jahre
- Magnetfeld: $\sim 10^8$ G

momentan schnellster Pulsar

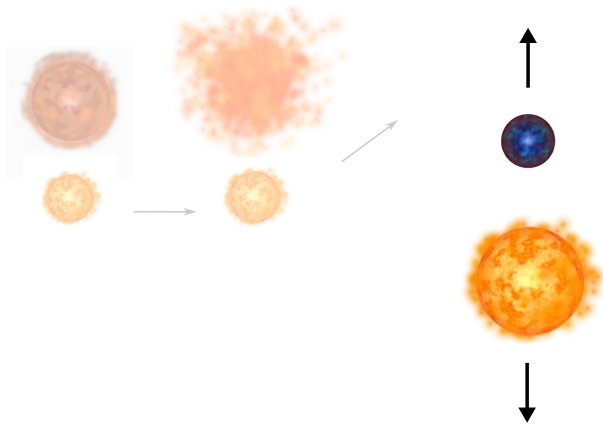
PSR J1748-2446ad in Terzan 5 mit 716 Hz

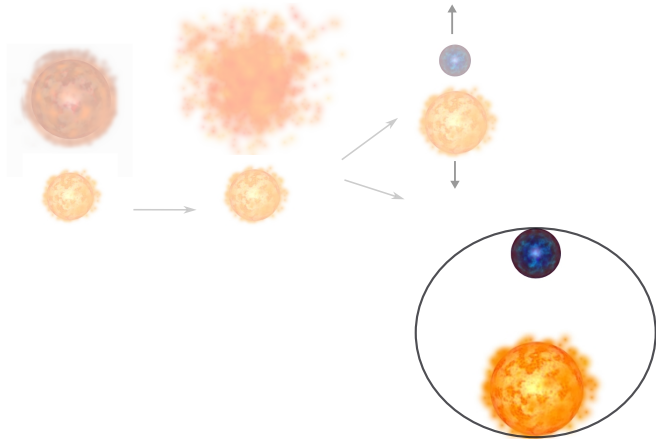
Pulsperiode: $0.00139595482(6)\text{ s} \approx 1.4\text{ ms}$

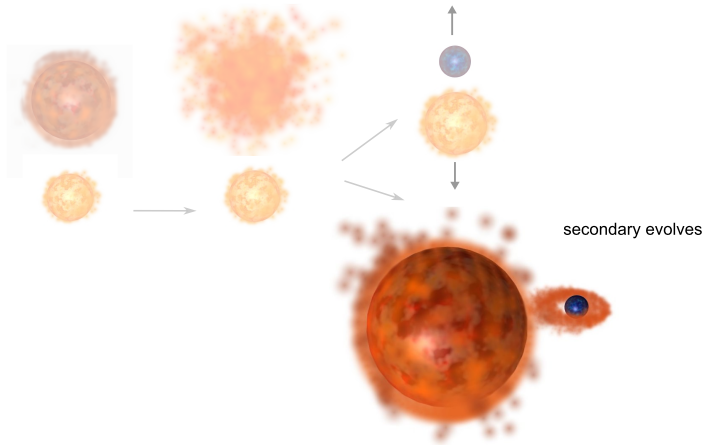
Hessels, Ransom, Stairs, Freire, Kaspi and Camilo, "A Radio Pulsar Spinning at 716 Hz", Science, arXiv:astro-ph/0601337, 2006, 311, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006Sci...311.1901H>

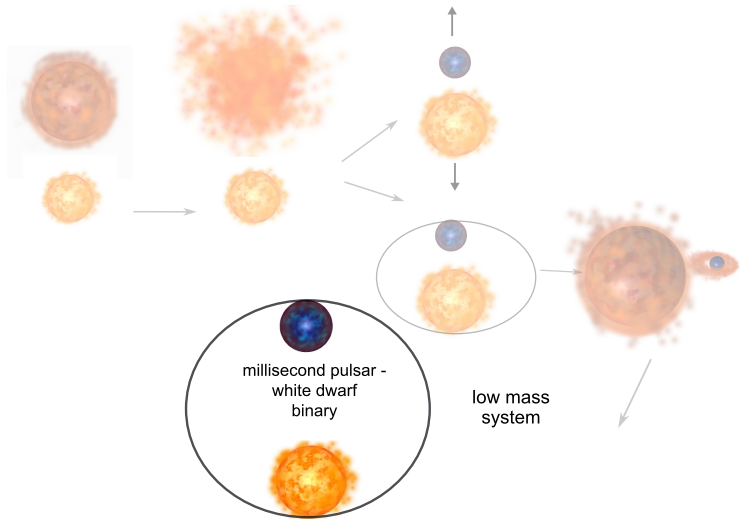


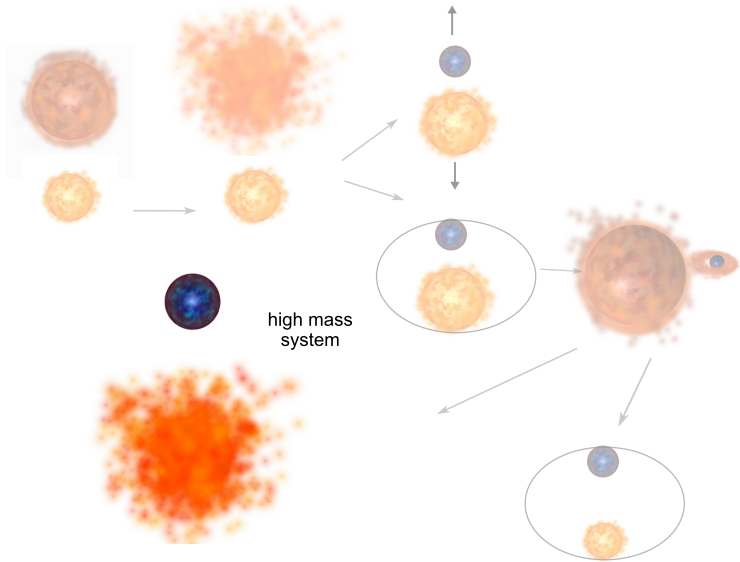


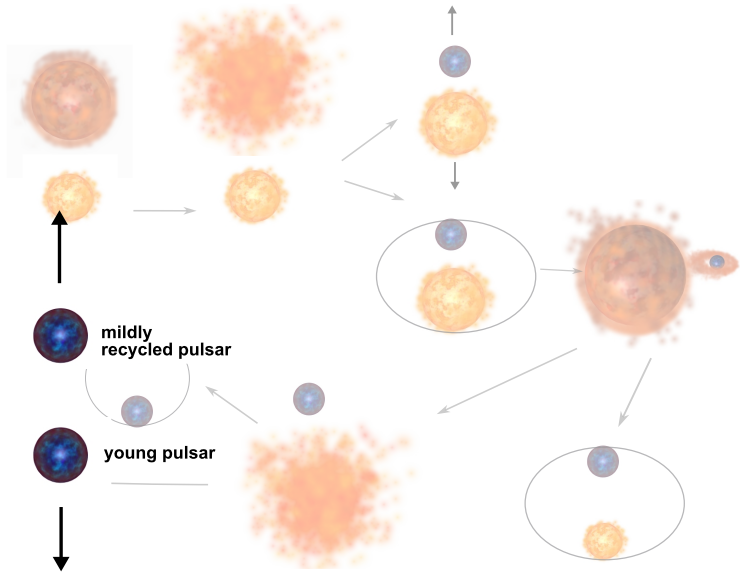


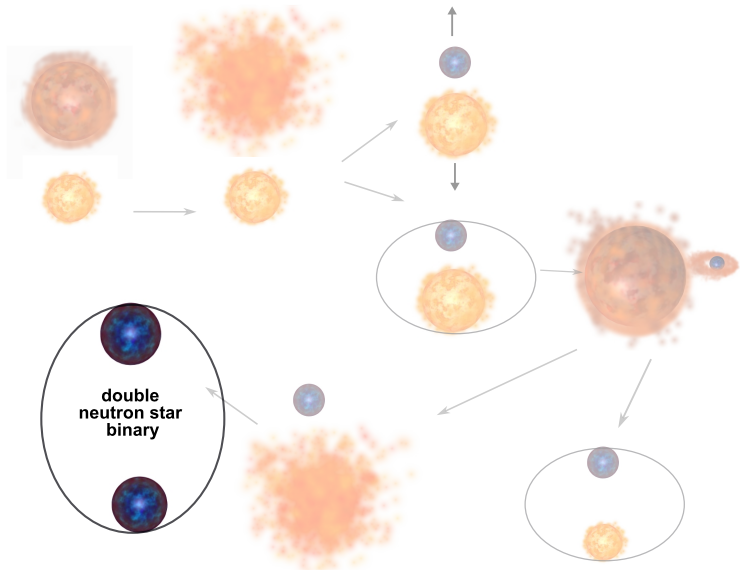












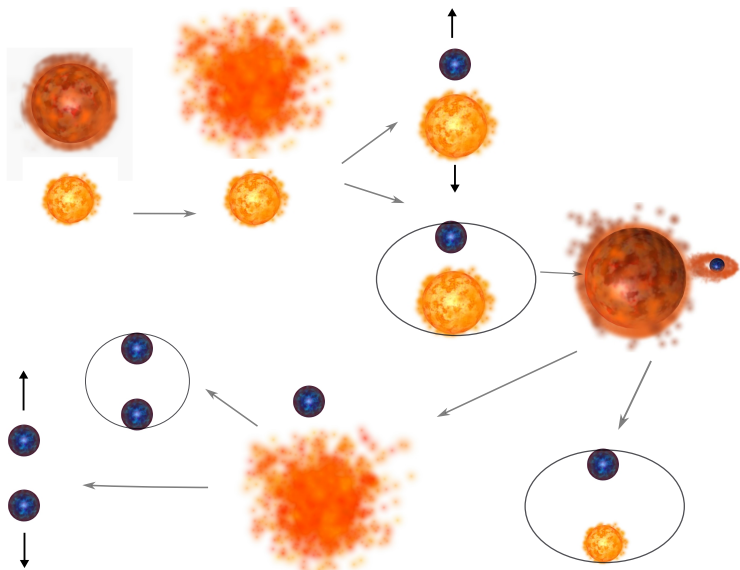


Abbildung: Abbildung nach

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.html>

Radioteleskope



Arecibo

- Inbetriebnahme: 1963
- Durchmesser: 305 m
- Reflektorfläche: 80 000 m^2
- Empfangsbereich: 50 MHz - 10 000 MHz

Abbildung: Arecibo Radioteleskop,

<http://www.nsf.gov/news/mmg/media/images/arecibo3.jpg>

Binärpulsare

Entdeckung

- 1974 durch Russell Hulse und Joseph H. Taylor Jr.,
Nobelpreis 1993
- erstes entdecktes System : PSR B1913+16
- Testgebiet für Gravitationstheorien

Begleiter

- weiße Zwerge
- Hauptreihensterne
- Neutronensterne

Timing-Modell

Zeit der Emission t

$$t = \tau + \Delta_c - D/f^2 + \Delta_{R\odot} + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot} - \Delta_R - \Delta_E - \Delta_S$$

τ : Ankunftszeit am Teleskop

Δ_c : Zeitunterschied zwischen Observatoriumszeit und terrestrischer Referenzzeit

D/f^2 : Dispersionsverzögerung

$\Delta_{R\odot}$, $\Delta_{E\odot}$, $\Delta_{S\odot}$: Propagationsverzögerungen und relativistische Zeitkorrekturen im Sonnensystem

Δ_R , Δ_E , Δ_S : Effekte im Pulsarorbit

$$P_{1913}(\text{s}) = 0.059029995272 \pm 5$$

Entfernungsbestimmung

Interstellare Dispersion

Ankunftszeitunterschied des Pulssignals bei zwei verschiedenen Frequenzen

$$\Delta t = 4.15 \text{ms} \cdot \left[\left(\frac{\nu_{\text{low}}}{\text{GHz}} \right)^{-2} - \left(\frac{\nu_{\text{high}}}{\text{GHz}} \right)^{-2} \right] \cdot \left(\frac{\text{DM}}{\text{cm}^{-3} \text{pc}} \right)$$

mit

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

DM : integrierte Elektronensäule

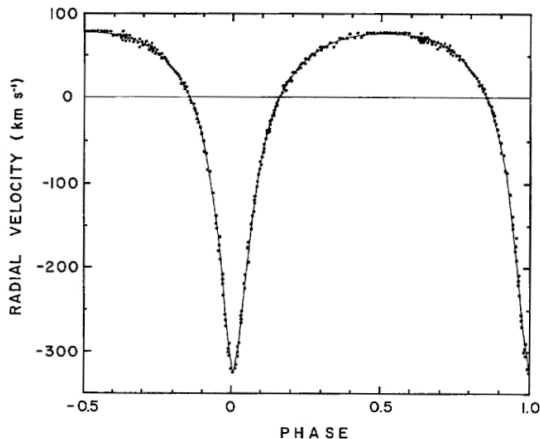
Ankunftszeitmessung für unterschiedliche Frequenzen + Modell für freie Elektronenverteilung → Entfernungsbestimmung

Doppelsternsysteme

Klassische Beschreibung mit Kepler-Parametern

- Bahnperiode P_b
- Longitude des Periastron ω
- Exzentrizität e
- Projizierte Halbachse $x = a \cdot \sin(i)$
- Periastron-Epoche T_0

Geschwindigkeitskurve für PSR B1913+16



$$P_b = 7.75 \text{ h}$$

$$x = 2.341774(1) \text{ s}$$
$$\approx 7 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$e = 0.6171338(4)$$

Abbildung: Hulse & Taylor 1975, figure 1

Massenbestimmung

Massenfunktion

bei Binärsystem mit nur einer sichtbaren Komponente

$$\frac{4\pi^2 x^3}{G P_b^2} = \frac{(m_c \sin(i))^3}{(m_p + m_c)^2}$$

unbekannte Variable : $\sin(i)$, m_p und m_c

aus Messungen bekannt : P_b , x

durch Messungen von PK-Parametern können $\sin(i)$, m_p und m_c bestimmt werden

“post-Keplerian” Parameter

Vorrücken des Periastron

$$\dot{\omega} = 3 \cdot \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \cdot (T_{\odot} M)^{2/3} \cdot (1 - e^2)^{-1}$$

Einstein-Parameter

$$\gamma = e \cdot \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{1/3} \cdot T_{\odot}^{2/3} \cdot M^{-4/3} \cdot m_c \cdot (m_p + 2m_c)$$

Veränderung der Bahnperiode

$$\dot{P}_b = -\frac{192\pi}{5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) (1 - e^2)^{-7/2} T_{\odot}^{5/3} m_p m_c M^{-1/3}$$

“post-Keplerian” Parameter für PSR 1913+16

$$\dot{\omega} = 3 \cdot \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \cdot (T_{\odot} M)^{2/3} \cdot (1 - e^2)^{-1}$$

$$\dot{\omega}(\text{deg yr}^{-1}) = 4.226607(7)$$

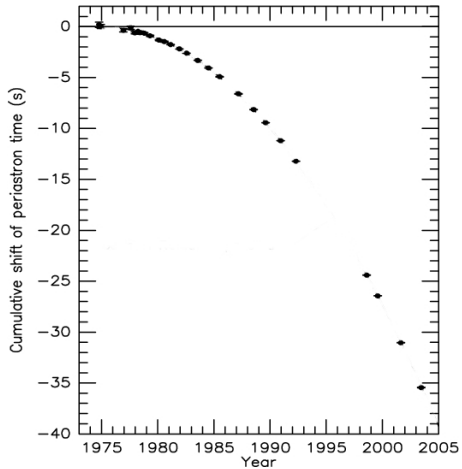
$$\gamma = e \cdot \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{1/3} \cdot T_{\odot}^{2/3} \cdot M^{-4/3} \cdot m_c \cdot (m_p + 2m_c)$$

$$\gamma(\text{ms}) = 4.294(1)$$

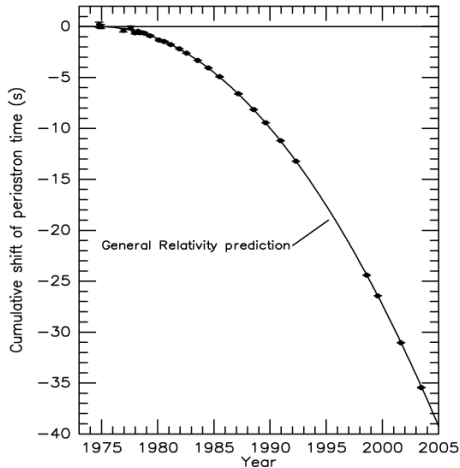
$$\dot{P}_b = -\frac{192\pi}{5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) (1 - e^2)^{-7/2} T_{\odot}^{5/3} m_p m_c M^{-1/3}$$

$$\dot{P}_b(10^{-12}) = -2.4211(14)$$

PSR1916+13



PSR1916+13



sehr gute
Übereinstimmung mit den
theoretischen Vorhersagen
(0.2%)

[http://relativity.livingreviews.org/
Articles/lrr-2005-7/index.html](http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.html)

Gravitationswellenspektrum

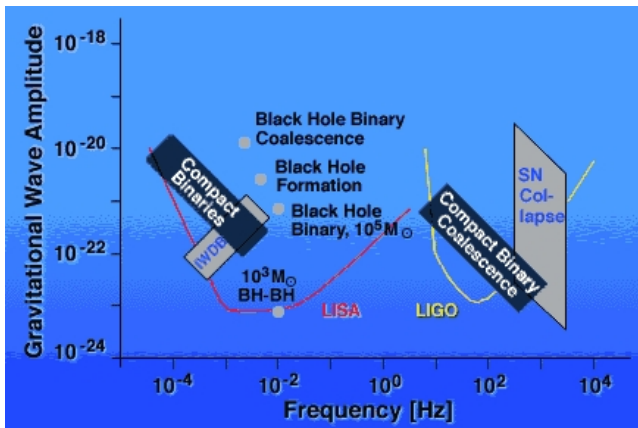


Abbildung: <http://www.geo600.uni-hannover.de/physikjahr/gwspektrum.html>

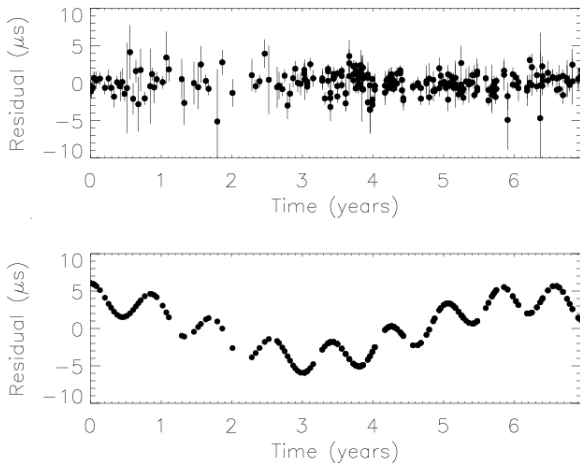


Abbildung: oberes Bild : beobachtete timing residuals für PSR B1855+09
unteres Bild : simulierte timing residuals verursacht durch ein vermutetes Schwarzes Loch in 3C66B

<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.html>

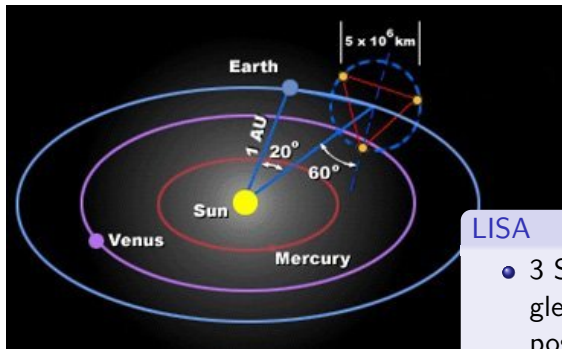
direkter Nachweis von Gravitationswellen



Abbildung: rot = Interferenzdetektoren, grün = Resonanzdetektoren

<http://www.einstein-online.info/de/vertiefung/detektoruebersicht/index.html>

direkter Nachweis von Gravitationswellen



LISA

- 3 Satelliten in annähernd gleichseitigem Dreieck positioniert, Armlänge $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ m}$
- time delay interferometry
- LISA-Pathfinder (2009)

Abbildung: http://www.esa.int/esaSC/120376_index_1_m.html

Literatur

- Hulse, R. A.; Taylor, J. H.; Discovery of a pulsar in a binary system; *Astrophysical Journal*, vol. 195, Jan. 15, 1975, pt. 2, p. L51-L53
- Michele Maggiore, "Gravitational Waves, Volume 1: Theory and Experiments", Oxford University Press Inc., New York, 2008, ISBN: 978-0-19-857074-5
- Duncan R. Lorimer, "Binary and Millisecond Pulsars", *Living Rev. Relativity* 8,(2005),(cited on 25.1.2008): <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-7/index.html>
- Ingrid H. Stairs, "Testing General Relativity with Pulsar Timing", *Living Rev. Relativity* 6, (2003),(cited on 25.1.2008): <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-5/index.html>
- European Pulsar Network, <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Resources/epn/browser.html>
- Arecibo Radioteleskop: http://www.naic.edu/public/the_telescope.htm
- Einstein Online (Web-Angebot des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik) <http://www.einstein-online.info/de/vertiefung/index.html>
- GEO600: <http://www.geo600.uni-hannover.de>
- LISA: <http://lisa.nasa.gov/>

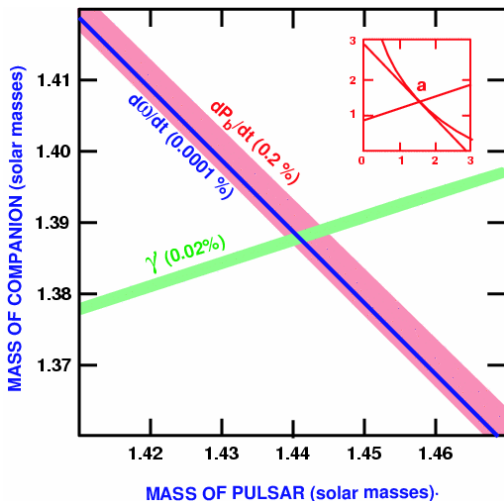


Abbildung: <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/index.html>