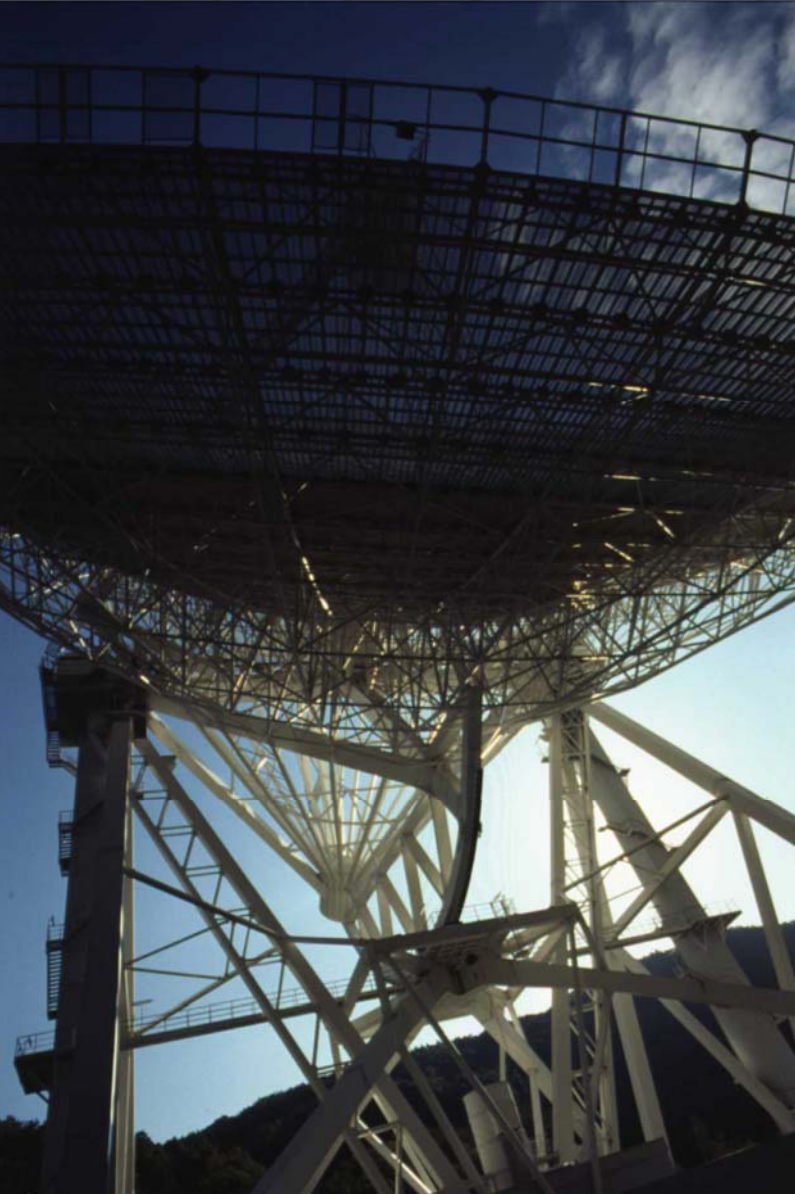


Sommersemester 2006



Pulsar-Astronomie,
heute & in Zukunft



heute ...



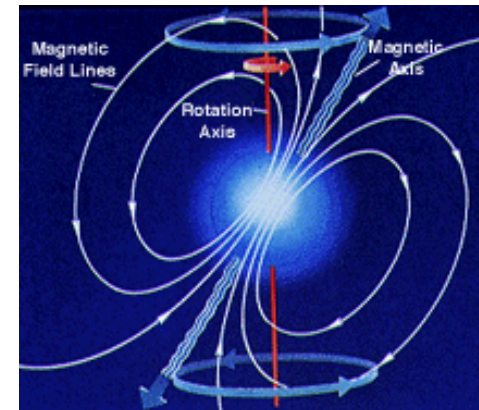
- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- 09.06. Maser, das Interstellare Medium & Merger
- 23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)
- **07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)**
- 21.07. Quanten der Raumzeit

Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)



In Kürze

- **Entdeckung der Pulsare**
- **Ein Pulsar-Leben (Hauptreihensterne, Supernovae, ...)**
- **Pulsar-Beobachtungen und ihre spezifischen Probleme**
- **Verschiedene Arten von Pulsaren**
 - Millisekunden-Pulsare
- **Pulsar-Mechanismus**
 - Altersbestimmung
 - Strahlungsentstehung (gap/cap)
- **Pulsare & Binäre Schwarze Löcher**
- **Doppel-Pulsare & die Relativitätstheorie**
- **Pulsare & Planeten**
- **Kurze Zusammenfassung**





Entdeckung der Pulsare

Zur Entdeckung



- 1931: Chandrasekhar berechnet, daß Weiße Zwerge kollabieren, sollte ihre Masse einen Grenzwert von 1.44 Sonnenmassen übersteigen
- 1932: Chadwick findet das Neutron
- 1934: Baade und Zwicky: „Sterne“ die vorwiegend aus Neutronen bestehen, können in Supernovae Explosionen erzeugt werden; vermutet neuen Typus eines Sterns hinter dem schwachen Zentralstern des Krebsnebels
- 1939: Oppenheimer und Volkof bestimmen „Zustandsgleichung“. Sagen „Neutronenstern“ mit Masse von ~ 1.4 Sonnenmassen und einem Radius von ~ 10 km voraus

Zur Entdeckung



- 1967: Fertigstellung eines Radioteleskops zur Untersuchung der Szintillation von Sternen, Quasaren im Sonnenwind

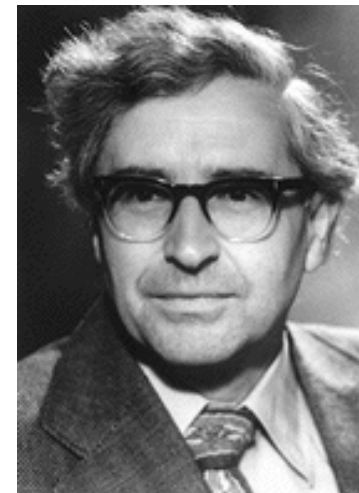
- scharfe, regelmäßige Radiopulse

1967 zufällig entdeckt von Jocelyn Bell und Antony Hewish (PSR 1919+21 $T = 1.33$ s) bei einer Wellenlänge von 3.7 m

- erste Annahme:

Radiosignale von intelligenten Wesen (LGM1, LGM2 mit 1.2s)

Wem kann man das erzählen?



Entdeckung der Pulsare



Entdeckung
durch
Jocelyn Bell
und ihrem
Doktorvater
Antony
Hewish
1967 in
Cambridge

PSR 1919+21
 $T = 1.33 \text{ s}$

Zur Entdeckung



- *Geschichte aus Jodrell Bank ...*
- Veröffentlichung der Resultate, ohne Erklärung der Natur der Strahlung
- 1968: Neutronensterne, geht auf eine Theorie von Robert Oppenheimer und Fritz Zwicky in den 30iger Jahren zurück
- Pulsar: LGM -> CP (Cambridge pulsar)
- 1968: PhD für Bell (Pulsare im 4 Seiten Anhang der Dissertation) -> 1968 Bell Burnell
- 1974: Nobelpreis für Hewish
- *Frauenbewegung und J. Bell*





Ein Pulsar-Leben

Radius: $6.96 \cdot 10^5$ km

Masse: $1.99 \cdot 10^{30}$ kg

Kernreaktion : $400 \cdot 10^6$ Tonnen/s
 $H \rightarrow He$

1% Wirkungsgrad

Energieabstrahlung: $3.85 \cdot 10^{23}$ kW



Sonne wird pro Sekunde $4 \cdot 10^6$ Tonnen
leichter



Gegenüber der Ursonne
ist:

R etwa um 5%

L etwa um 40%

$$\text{Entwicklungszeit : } \tau_E = 6 \cdot 10^9 a \frac{M / M_{\text{sonne}}}{L / L_{\text{Sonne}}} = 6 \cdot 10^9 a (M / M_{\text{sonne}})^{-2}$$

P etwa um 70%

ϵ_{pp} etwa um 15%

angestiegen

Lebenserwartung der Hauptreihensterne

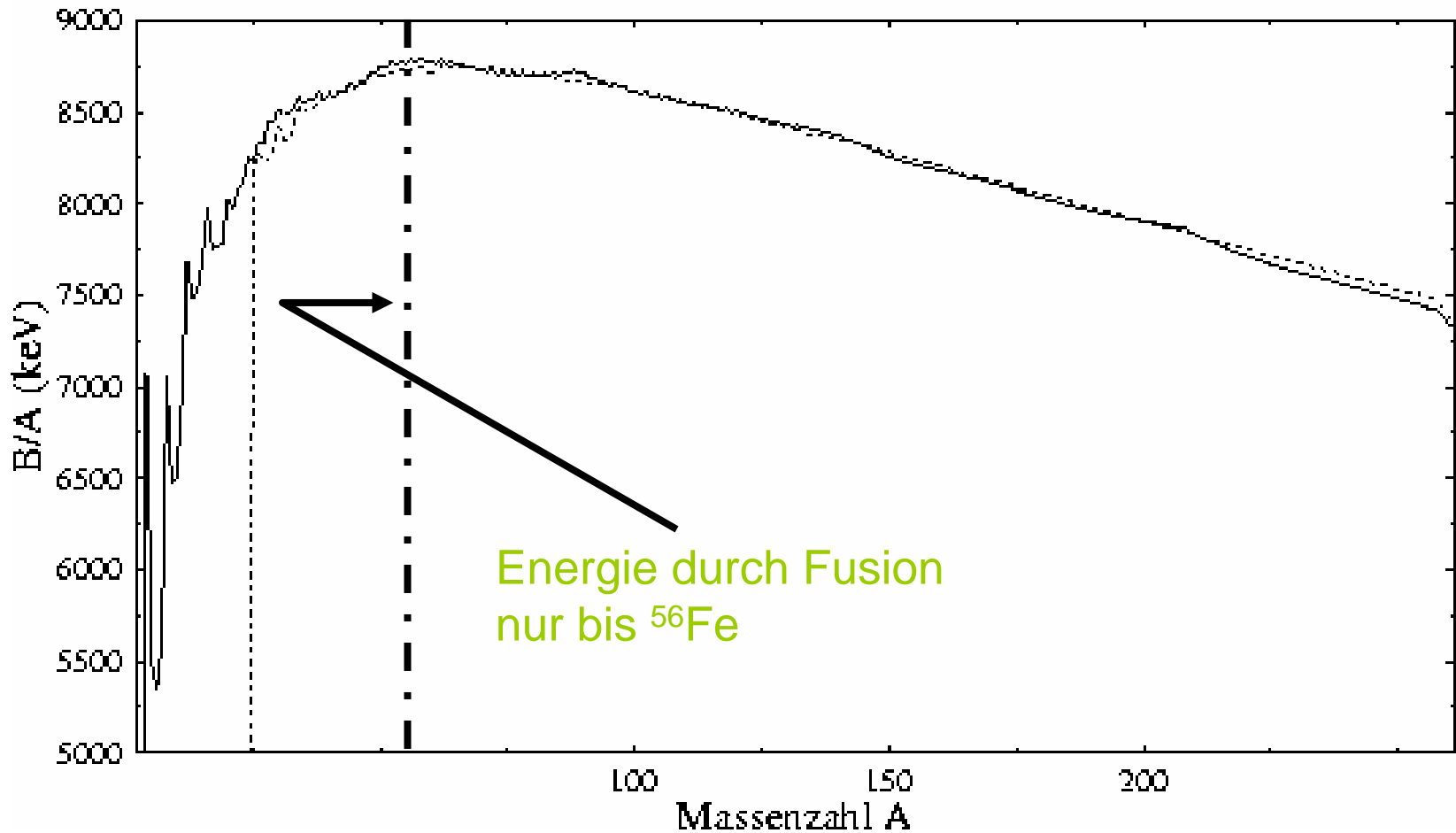


Spektraltyp	Masse (Sonne=1)	Lebenserwartung auf der HR
O5	40	1 Millionen Jahre
B0	16	10 Millionen Jahre
A0	3.3	500 Millionen Jahre
F0	1.7	2.7 Milliarden Jahre
G0	1.1	9 Milliarden Jahre
K0	0.8	14 Milliarden Jahre
M0	0.4	200 Milliarden Jahre

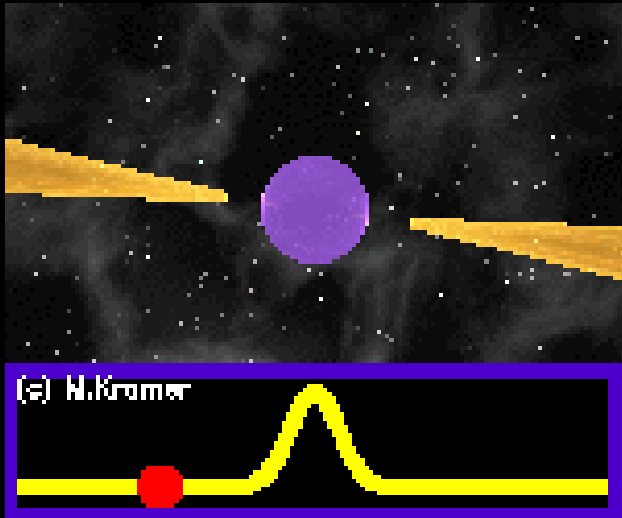
Bindungsenergie der Elemente



Bindungsenergie pro Nukleon



Fusion schwererer Elemente energetisch deutlich ineffizienter als Wasserstoffbrennen \Rightarrow kürzere Lebensphasen
Fusion von Eisen zu Cobalt setzt keine Energie mehr frei



1) Kollaps



- Sterne, in denen Eisen durch Fusion synthetisiert wird, erzeugen immer einen Eisenkern, dessen Masse die Chandrasekhar-Grenze überschreitet -> Kollaps
- Kollaps wird unterstützt und beschleunigt:
 - Durch Photonen hochenergetischer Gammastrahlung werden Eisenatomkerne mittels Photodesintegration zerstört (α -Teilchen + Neutronen)
 - α -Teilchen können durch diese Photonen in Protonen und Neutronen zerlegt werden
 - Inverser β -Zerfall: freie Elektronen werden durch Protonen eingefangen, Neutronen entstehen und Neutrinos werden freigesetzt
 - Energieverlust durch die Photodesintegration und Verlust freier Elektronen bewirken starke Reduktion des Drucks im Kern

11) Kollaps



- Kollaps geschieht innerhalb von Millisekunden, Einfallgeschwindigkeit übersteigt in 20 bis 50 km Abstand zum Zentrum die Schallgeschwindigkeit: die inneren Schichten können aufgrund ihrer großen Dichte die Druckinformation schnell genug transportieren, die äußeren Schichten fallen als Stoßwelle in das Zentrum
- Sobald der innere Teil des Kerns Dichten auf nuklearem Niveau erreicht, besteht er bereits fast vollständig aus Neutronen
- Entartungsdruck inkompressibel, Kollaps wird fast schlagartig gestoppt -> gigantische Druck- und Dichteerhöhung im Zentrum, Neutrinos können nicht mehr ungehindert entweichen; diese Druckinformation wird am Neutronenkern reflektiert und läuft nach außen, mehrerer Stoßfronten entstehen; Dichten so hoch, daß WW der Neutrinos mit der Materie nicht mehr vernachlässigt werden können

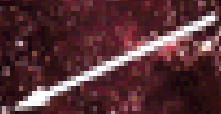
III) Kollaps



- von gesamter Energie der Supernova geht der allergrößte Teil in die Neutrinos
- 99% der beim Kollaps freigesetzten Energie wird in Form von Neutrinos abgegeben (können von irdischen Detektoren einige Stunden vor der optischen Supernova gemessen werden, Bsp. Supernova 1987 A)
- Extrem erhitzte Gasschichten erzeugen im r-Prozess (rapid) schwere Element jenseits des Eisens: Kupfer, Germanium, Silber, Gold oder Uran
- Einige Stunden nach dem Kollaps des Zentralbereichs wird die Oberfläche des Sterns erreicht, und die Gasmassen werden in der nun sichtbaren Supernovaexplosion abgesprengt
- Hülle der Supernova erreicht dabei Geschwindigkeiten von Mio km/h

Typ II Supernova

before supernova



NOVA

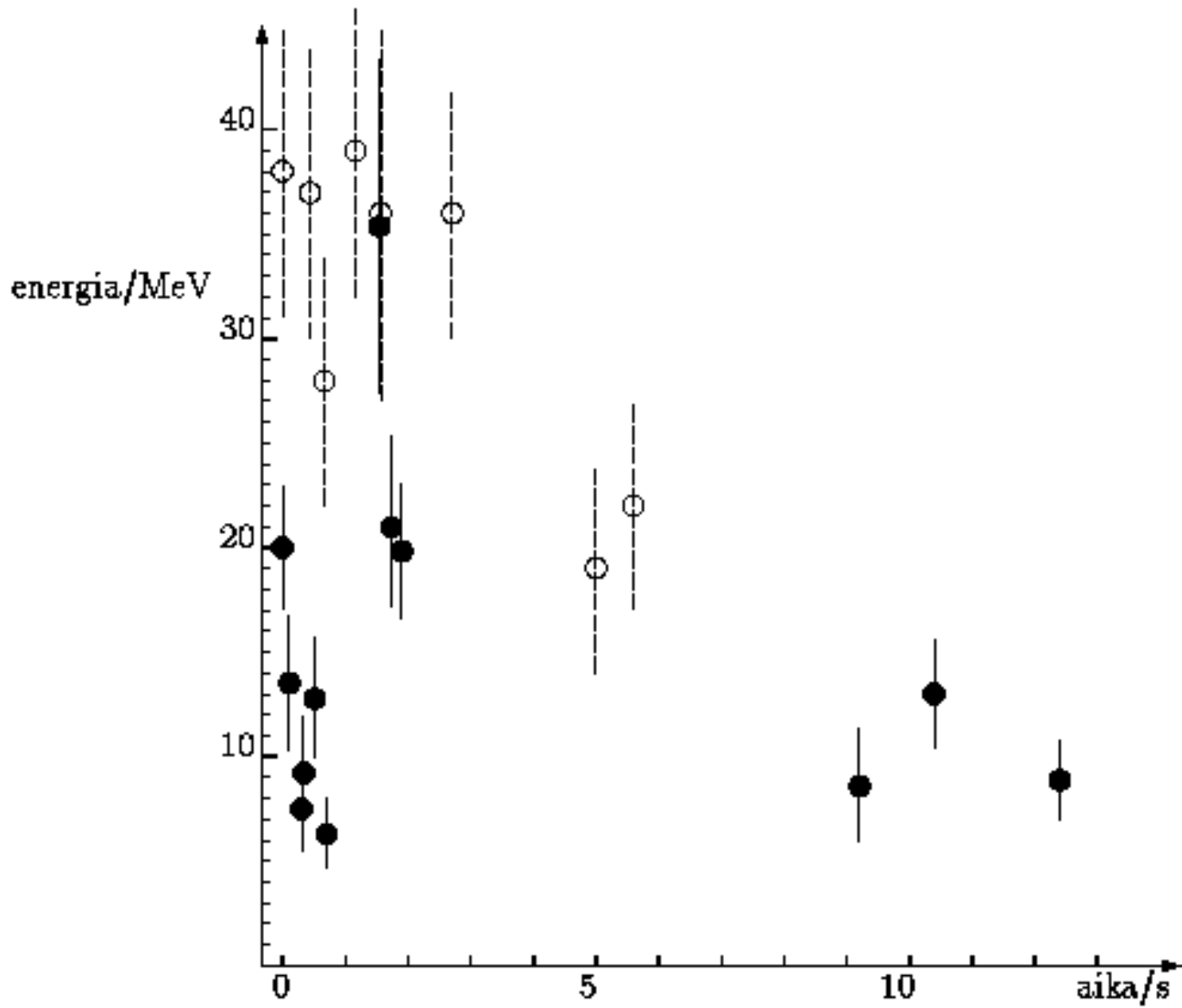


Die Supernova SN1987A



- In der großen Magellanschen Wolke
 - Erste „nahe“ Supernova in 3 Jahrhunderten
- Vorläuferstern identifiziert
 - Sandulaek -89⁰ 202
 - 15-18 M_☉
 - Blauer (!) Riesenstern
 - Beobachtet optisch am 24.2.1987
 - Neutrinosignal detektiert am 23.2.1987 um 7h35 UTC

20 Neutrinos von der SN1987A



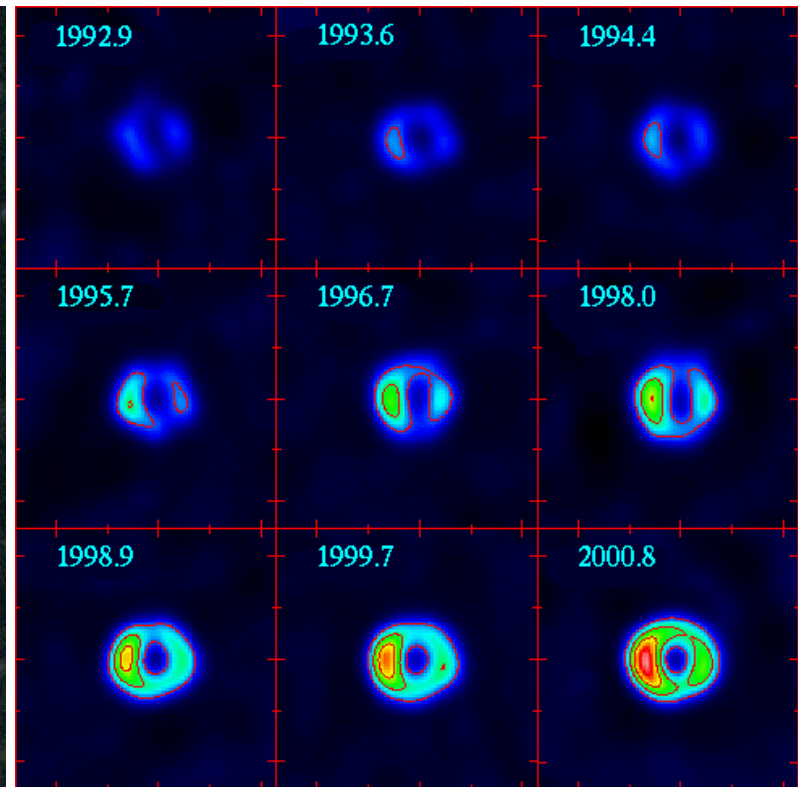
Supernovaüberreste



- Explosionwolke vom Neutronenstern/
Pulsar zum Leuchten angeregt (für Typ II)
($v_{\text{exp}} \approx 1000 \text{ km/s}$)



M1 (crab nebula)



SN1987A

Historische Supernovae



- Name: SN + Entdeckungsjahr + alphabetischer Zusatz (aa bis zz)
- Milchstraße: 20 ± 8 Supernovae pro Jahrtausend geschätzt
- Sonnen mit Massen von 8-30 Sonnenmassen: Typ II Explosion
- Massereichere Sonnen: Typ Ib/c

Historische Supernovae

Historische Supernovae



Jahr	Beobachtet in	Maximalhelligkeit	
<u>185</u>	Sternbild <u>Zentaur</u>	-6 <u>mag</u>	<p>– beobachtet von Europäern, Chinesen, Japanern und Arabern</p> <p>– von Chinesen, Japanern, Arabern und Indianern (?), aber nicht von Europäern(?)</p> <p>– SN1572: Brahe</p> <p>– SN1604: Kepler</p> <p>– SN1680/SN1667: Datierung durch Rückrechnung der Ausdehnung des SN-Überrests.</p> <p>Beobachtet von Flamsted (?)</p>
<u>386</u>	Sternbild <u>Schütze</u>	?	
<u>393</u>	Sternbild <u>Skorpion</u>	-3 mag	
<u>1006</u>	Sternbild <u>Wolf</u>	-7.5 +/- 0.4 mag*	
<u>1054</u>	Sternbild <u>Stier</u>	-6 mag	
<u>1181</u>	Sternbild <u>Kassiopeia</u>	-2 mag	
<u>1572</u>	Sternbild Kassiopeia	-4 mag	
<u>1604</u>	Sternbild <u>Schlangenträger</u>	-2 mag	
<u>1680</u>	Sternbild Kassiopeia	6 mag	
<u>1885</u>	<u>Andromedanebel</u>	+7 mag	
<u>1979</u>	<u>Messier 100</u>	+11.6 mag	

*Winkler, Gupta 2002

Überrest der Supernova von 386



- Von chinesischen Astronomen 386 beobachtet
- CHANDRA-Beobachtungen: Pulsar direkt in der Mitte des Supernova-Überrestes, Alter von 1615 Jahren (bislang Alter aus Rotationsgeschwindigkeit abgeleitet: 24 000 Jahre)
- Damit 2. Pulsar, der mit Supernova in Verbindung gebracht werden kann

Supernovae im Netz



SN Posn. Ref.	Host Galaxy Type	Date SN	R.A. Discoverer(s)	Decl.	Offset	Mag.	Disc. Ref.	SN Position
2006dm 47.84 -03 40 08.4	MCG -01-60-21 CBET 0568	2006 07 03	23 41.8 -03 40 2006dm LOSS			8E 6S 17.3	CBET 568	23 41
2006dl 16.73 +25 57 27.8	MCG +04-31-5 IAUC 8727	2006 06 29	13 05.3 +25 57 II 2006dl LOSS			10E 0N 18.0	IAUC 8727	13 05
2006dk +57 44 26.3	NGC 4161 IAUC 8727	2006 06 25	12 11.6 +57 44 Ib 2006dk Migliardi			6E 11N 16.3	CBET 561	12 11 34.35
2006dj +53 44 09.8	UGC 12287 IAUC 8727	2006 06 05	22 59.4 +53 44 IIb 2006dj LOSS			0E 15S 18.9	CBET 560	22 59 22.89
2006di 31 44 30.2	NGC 439 IAUC 8726	2006 06 24	01 13.8 -31 45 ? 2006di Monard			6W 19N 16.1	IAUC 8726	01 13 46.85 -
2006dh +40 52 36.8	UGC 8670 IAUC 8725	2006 06 21	13 41.7 +40 53 Ia 2006dh LOSS			10E 8N 18.4	IAUC 8725	13 41 43.08
2006dg +12 03 59.0	IC 1508 IAUC 8725	2006 06 17	23 45.9 +12 04 Ic 2006dg LOSS			11W 17N 18.3	IAUC 8725	23 45 54.38
2006df	Anon.	2006 06 16	21 50.0 +32 02			19.5	CBET 556	21 49 57.67 +32 01

Supernovae im Netz



Internet unter

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/RecentSupernovae.html>

IAU: Central Bureau for Astronomical Telegrams

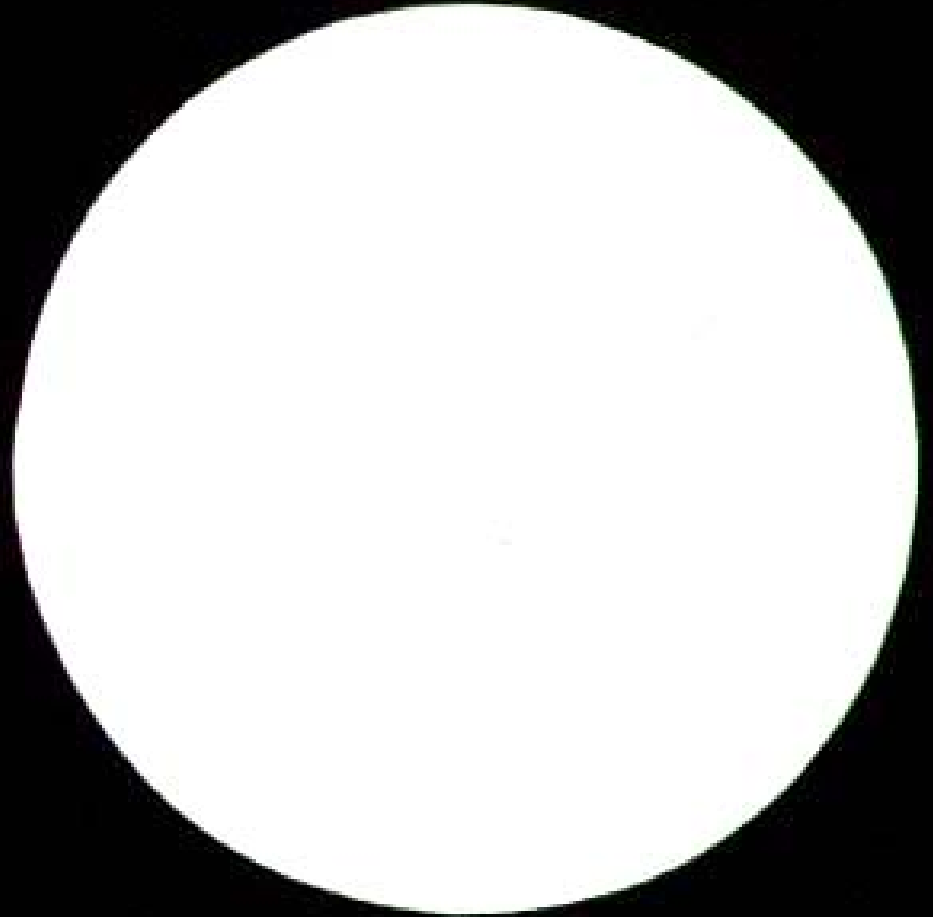
- Beispiel:
- Die Himmelsregion vor dem von Swift beobachteten Gamma Ray Burst (oben) und eine Aufnahme des Ereignisses (unten). Der Burst ist durch zwei Striche markiert. **Fotos:** SDSS (oben), NASA / Swift / UVOT (unten)



EARTH



WHITE DWARF



NEUTRON STAR



Ein Pulsar-Leben

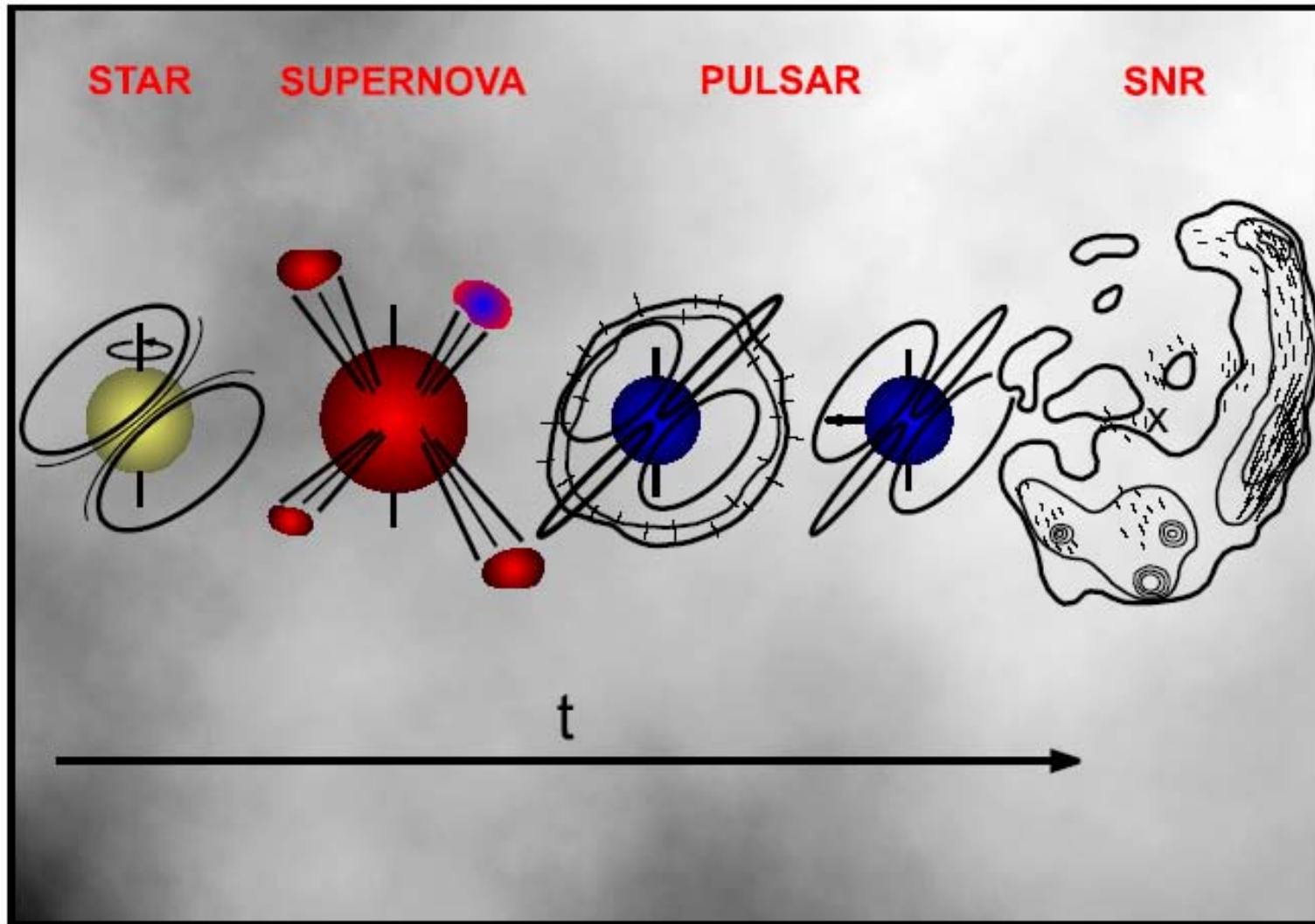


Fig. 1 Scenario of the birth and evolution of pulsars Seiradakis & Wielebinski, 2004



Pulsar- Beobachtungen

Observing Pulsars is a Technical Challenge!

Why ?

Pulsars are weak radio sources

Radiation is received only for a fraction of the pulse period

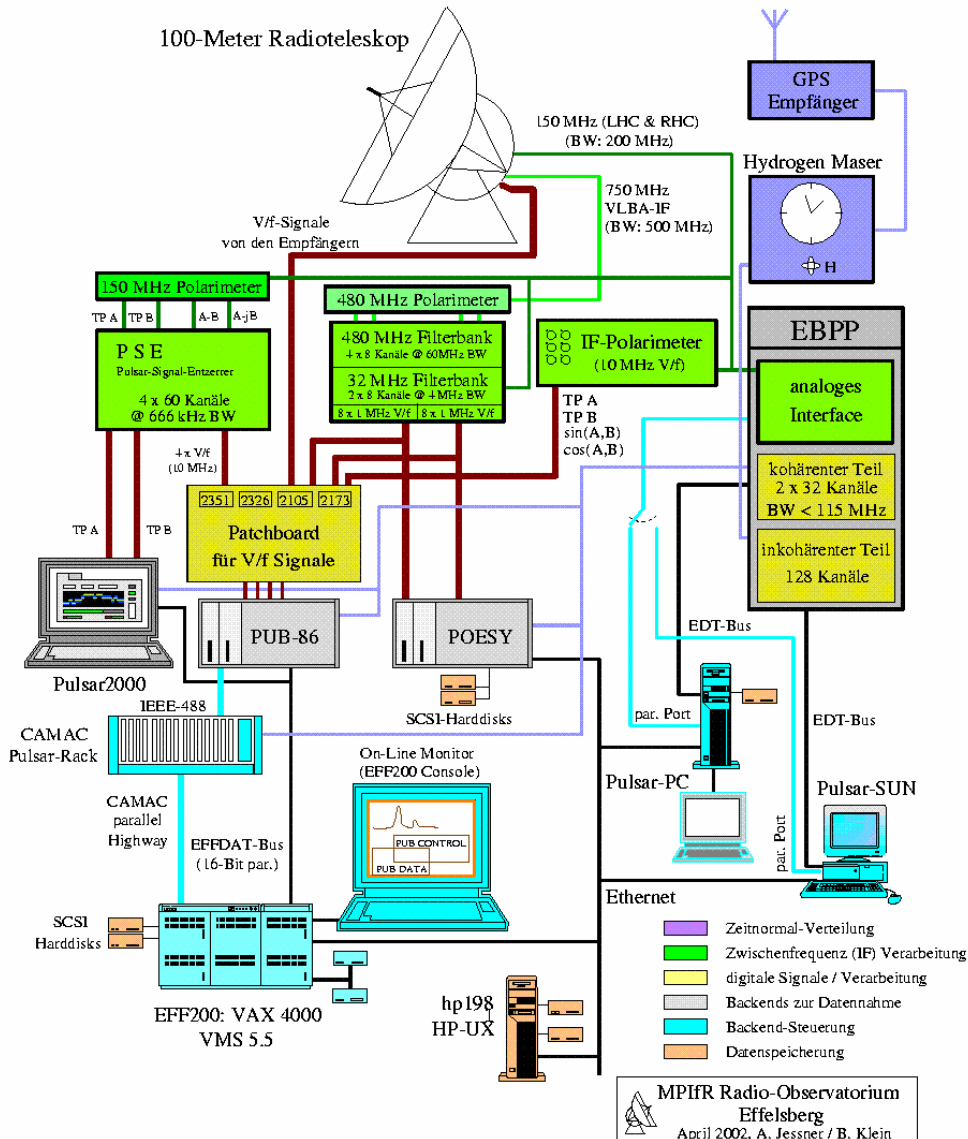
Precise timing of pulse arrivals is important

Pulse profiles are broadened by interstellar dispersion and scattering

Pulses are strongly polarised

Much of the information is contained in

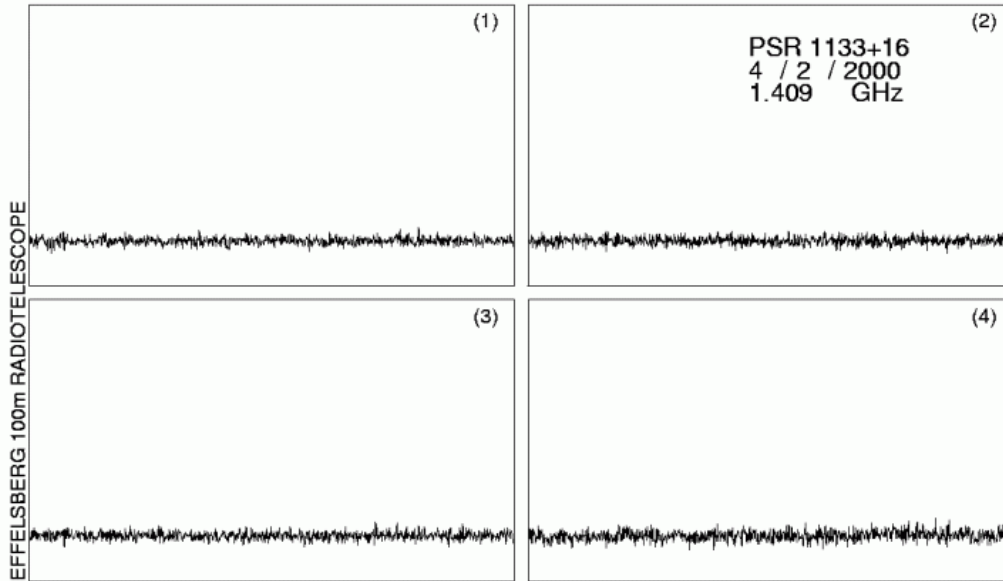
- The detailed shape of the pulse profile
- The variation of its polarisation characteristics
- The precise arrival times of pulses



Reception of a strong Pulsar in Effelsberg

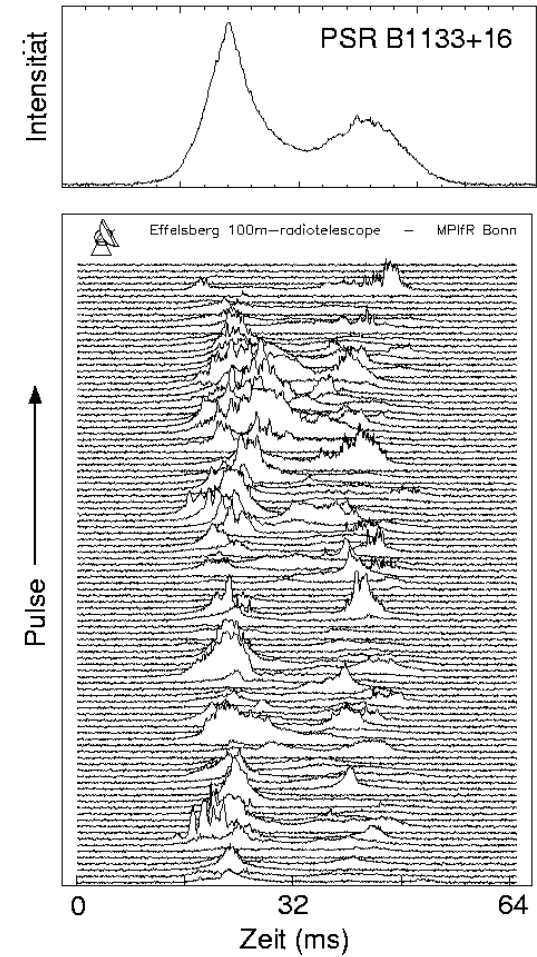


Scan: 8748 Channel: 1 Pulses: 1 Resolution: 400
INT: 1 Window:(1 - 1024)
Baseline: 150 250 900 1000 FFT Filter: 1.000 Running Mean:
Plotscale: .02000
RMS1:6.838 RMS2:7.490 RMS3:8.215 RMS4:10.133
1 Blocks: (1 - 1)



Individual pulses vary in strength and shape

Average profile stays the same



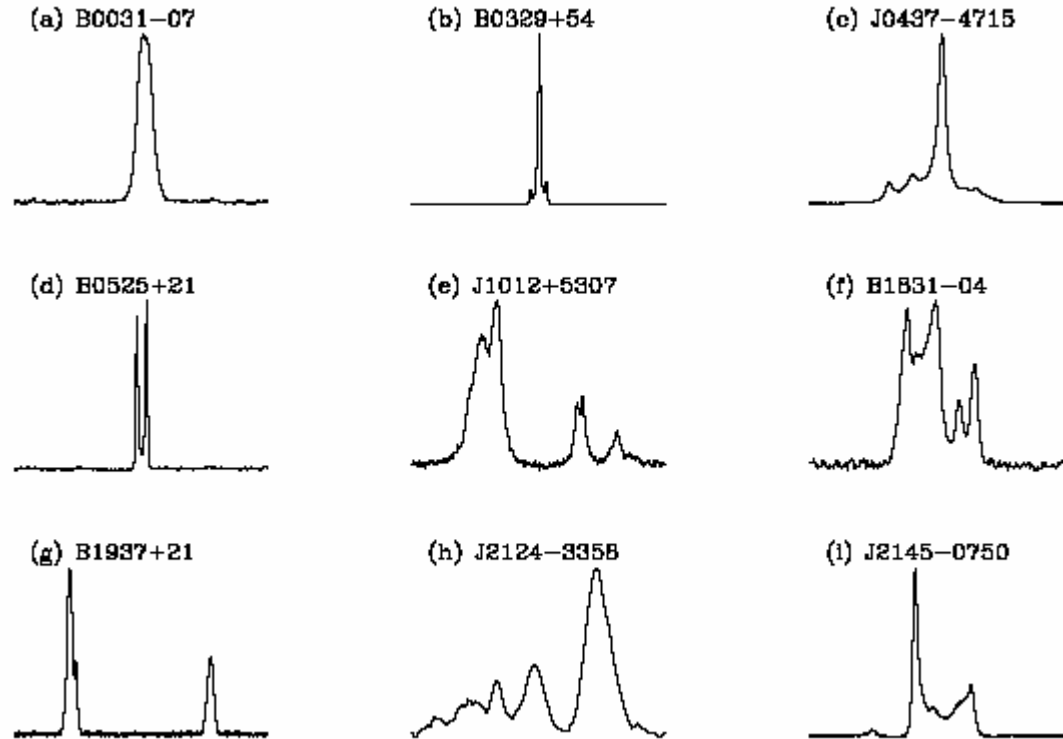
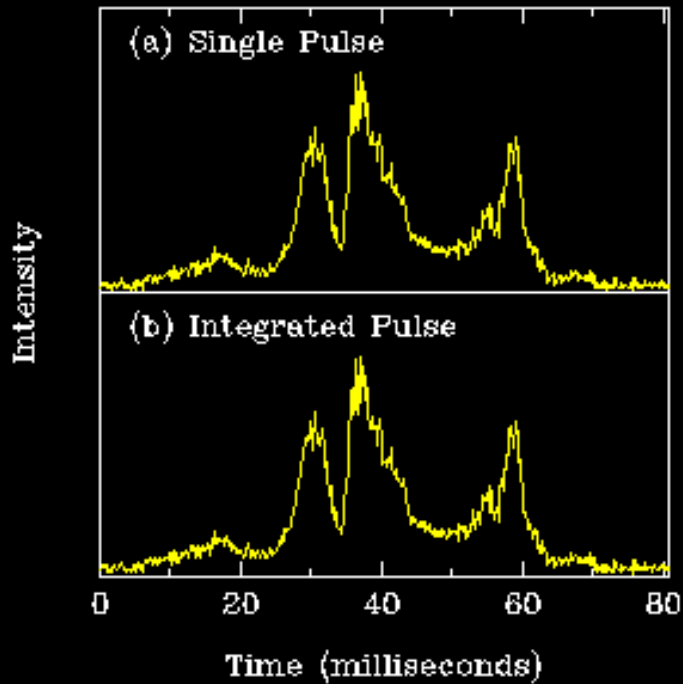
Periods are constant

08.07.200 **Sometimes pulses are missing**

Breites Spektrum an Pulsformen ...

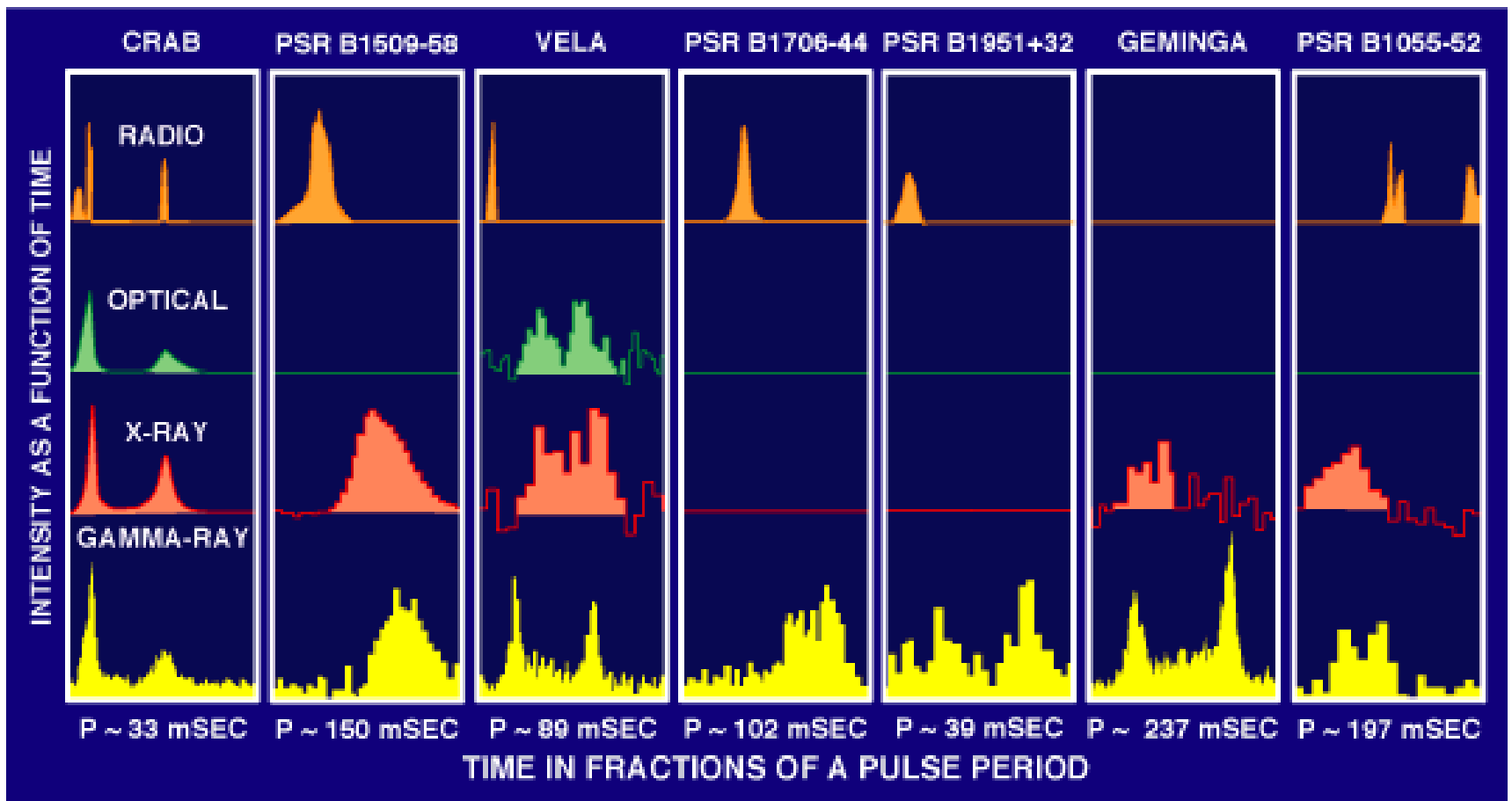


Pulse number: 1



Pulse von *PSR B0329+54*

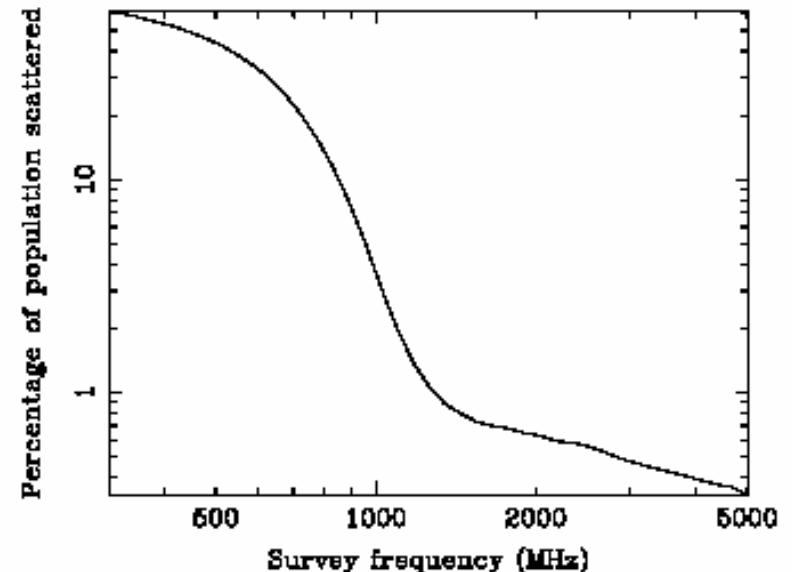
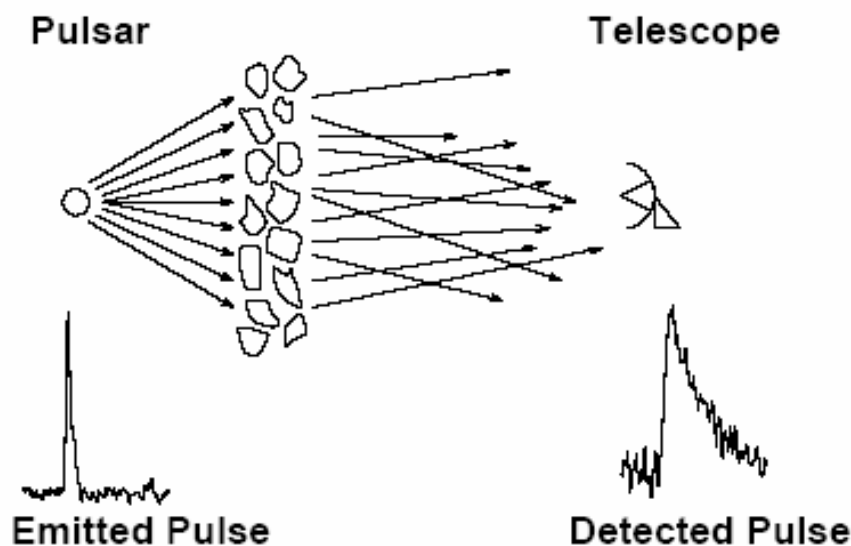
Pulsmuster einiger Pulsare

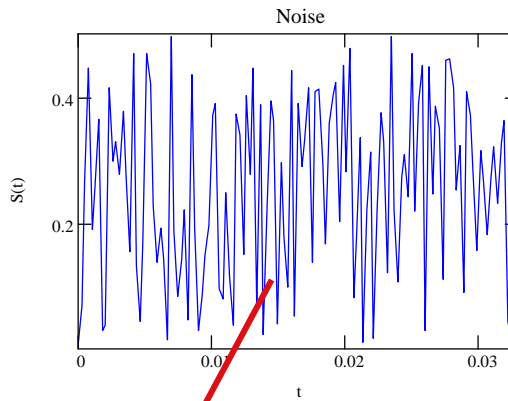
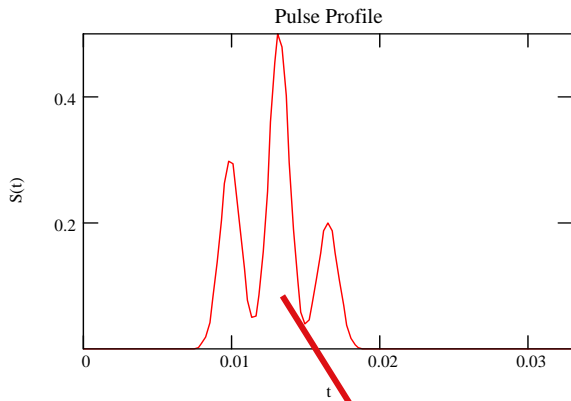


Effekte in der Ausbreitung

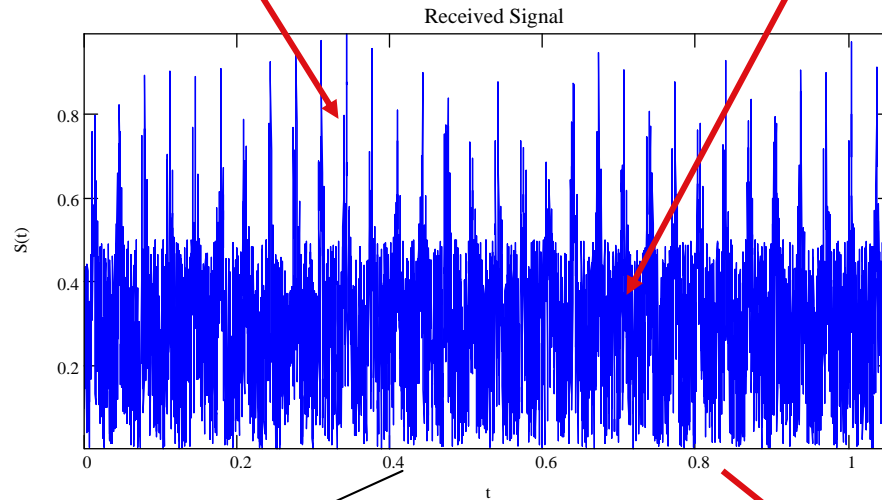


- Radiowellen eines typischen Pulsars bewegen sich durch einige 100 km an Magnetosphäre, einige 100 Lichtjahre interstellaren Raum, einige 10 km durch die terrestrische Ionosphäre
- Resultat: Winkelabweichung, Verzögerung in der Ausbreitung, Änderung der Polarisation
- Ionosphäre hat geringsten Effekt, am bedeutendsten: Interstellares Medium

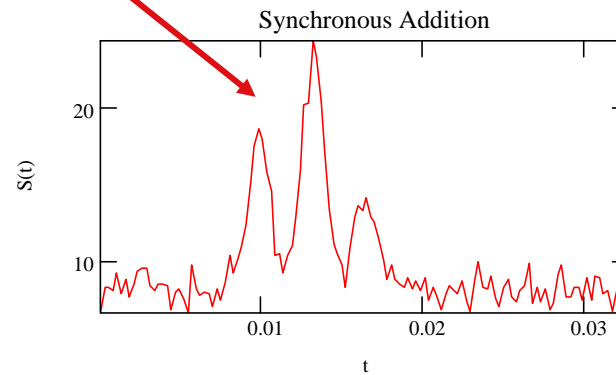
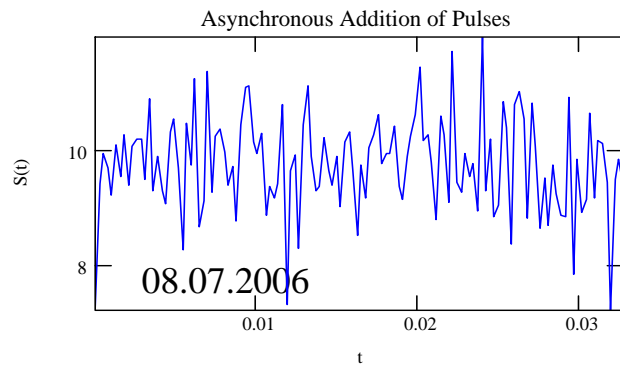




The received Signal consists of pulses and noise!



Accurate calculation of the pulse period is crucial!



Interstellar dispersion broadens pulse profiles

Plasma frequency $\omega_{pe} := \sqrt{\frac{n_e \cdot q_e^2}{m_e \cdot \epsilon_0}}$

Group velocity $v_g = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega}\right)^2} = c \cdot \sqrt{1 - \frac{n_e \cdot q_e^2}{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot \epsilon_0 \cdot \omega^2}}$

Light travel time for a distance d: $\Delta t(f) = \int_0^d \frac{1}{c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{pe}(s)}{\omega}\right)^2}} ds \approx \frac{d}{c} + \frac{1}{2} \cdot DM \cdot \frac{q_e^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0 \cdot m_e \cdot c \cdot \omega^2}$

$$\Delta t_{DM} \approx 4.1494 \cdot 10^{15} \cdot DM \cdot \left(\frac{1}{\nu_1^2} - \frac{1}{\nu_2^2} \right) \text{ s}$$

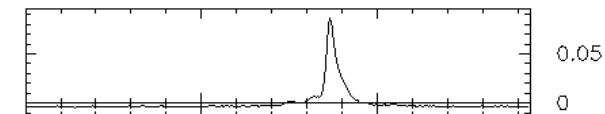
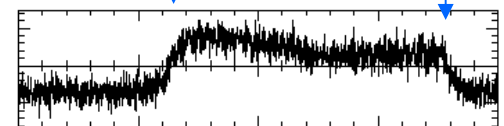
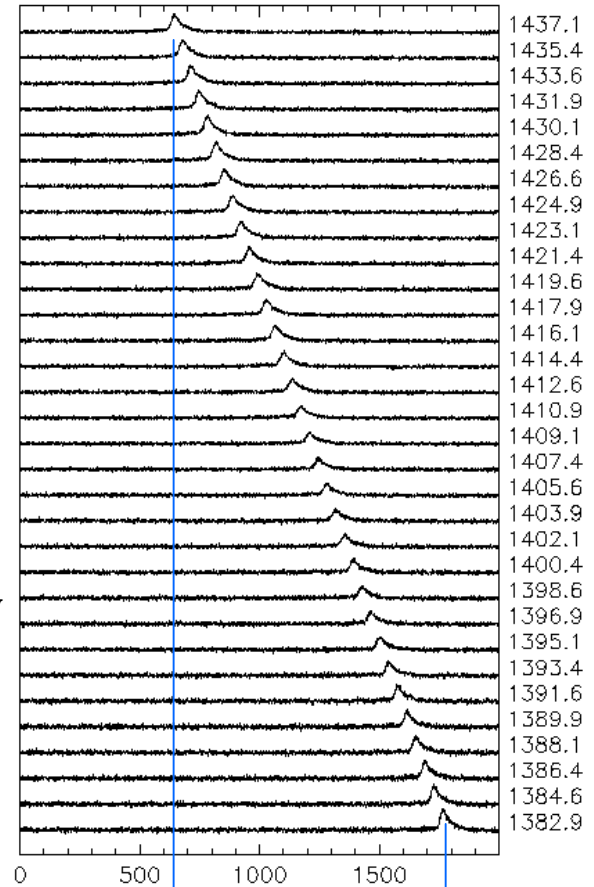
With column density

$$DM = \int_0^d n_e(s) ds$$

in pc cm⁻³

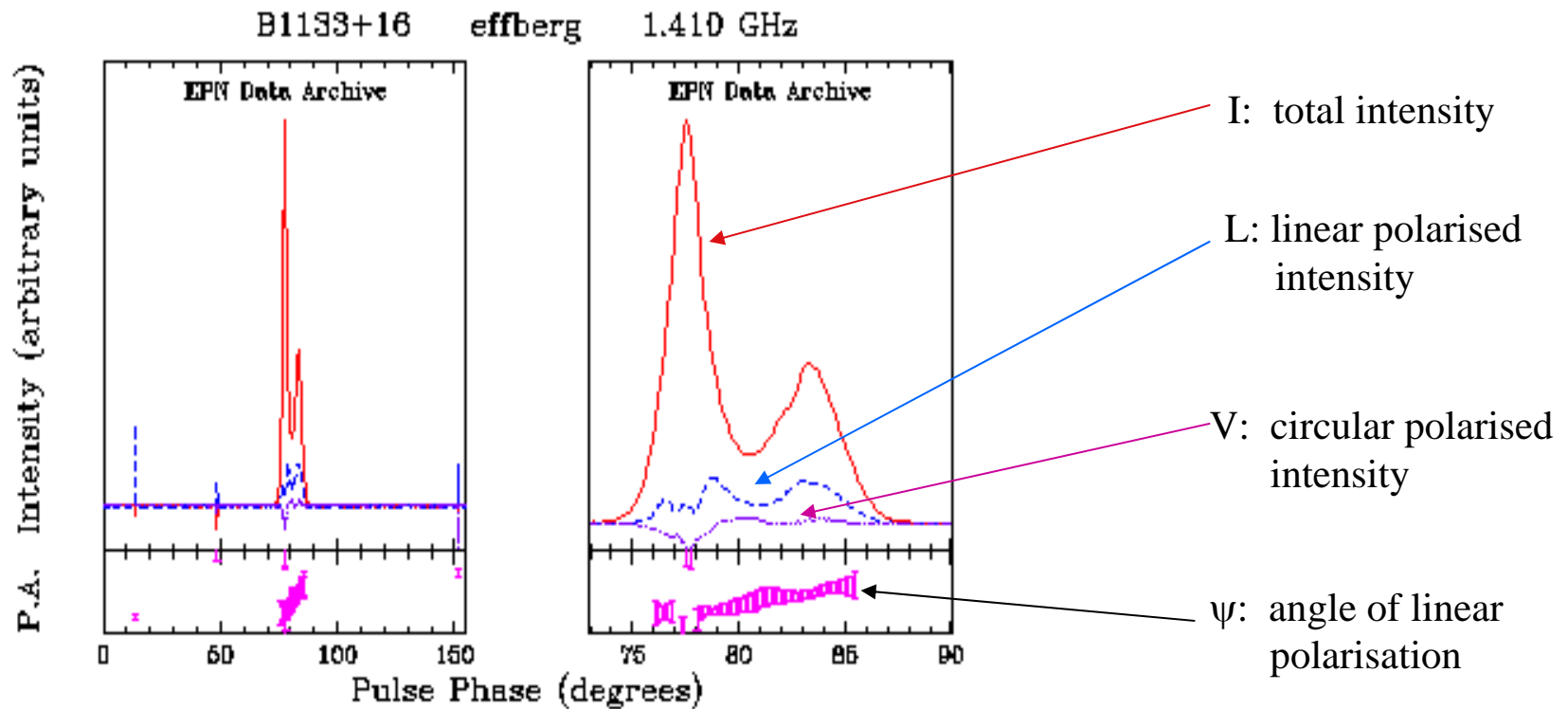
Dispersion broadens the profile by 2.5 ms = 0.55 P

PSR J1713+0747
P = 4.57 ms, DM = 16



De-dispersed profile at full resolution

Example: Polarisation of a Pulse Profile



Multifrequency Single Pulse Polarisation Observations

A. Karastergiou, A.v.Hoensbroech, M. Kramer, D.R. Lorimer, A.G. Lyne, O.Doroshenko,
A. Jessner, C. Jordan and R. Wielebinski, **A&A**, **379**, **270** (2001)

First attempts by Bartel & Sieber (0.3+2.7 GHz) in 1978 (A&A 70,260)

1995: Launch of the European Pulsar Network (EPN).

→ **A common data format was developed for the exchange and archiving of pulsar observations.**

Lorimer, Jessner, Seiradakis et. al. A&A Suppl. Series. Vol. 128, 541-544 (1998)

Supported by

Effelsberg, Jodrell Bank, Bologna, Westerbork, Pushchino, Torun, Ooty and GMRT

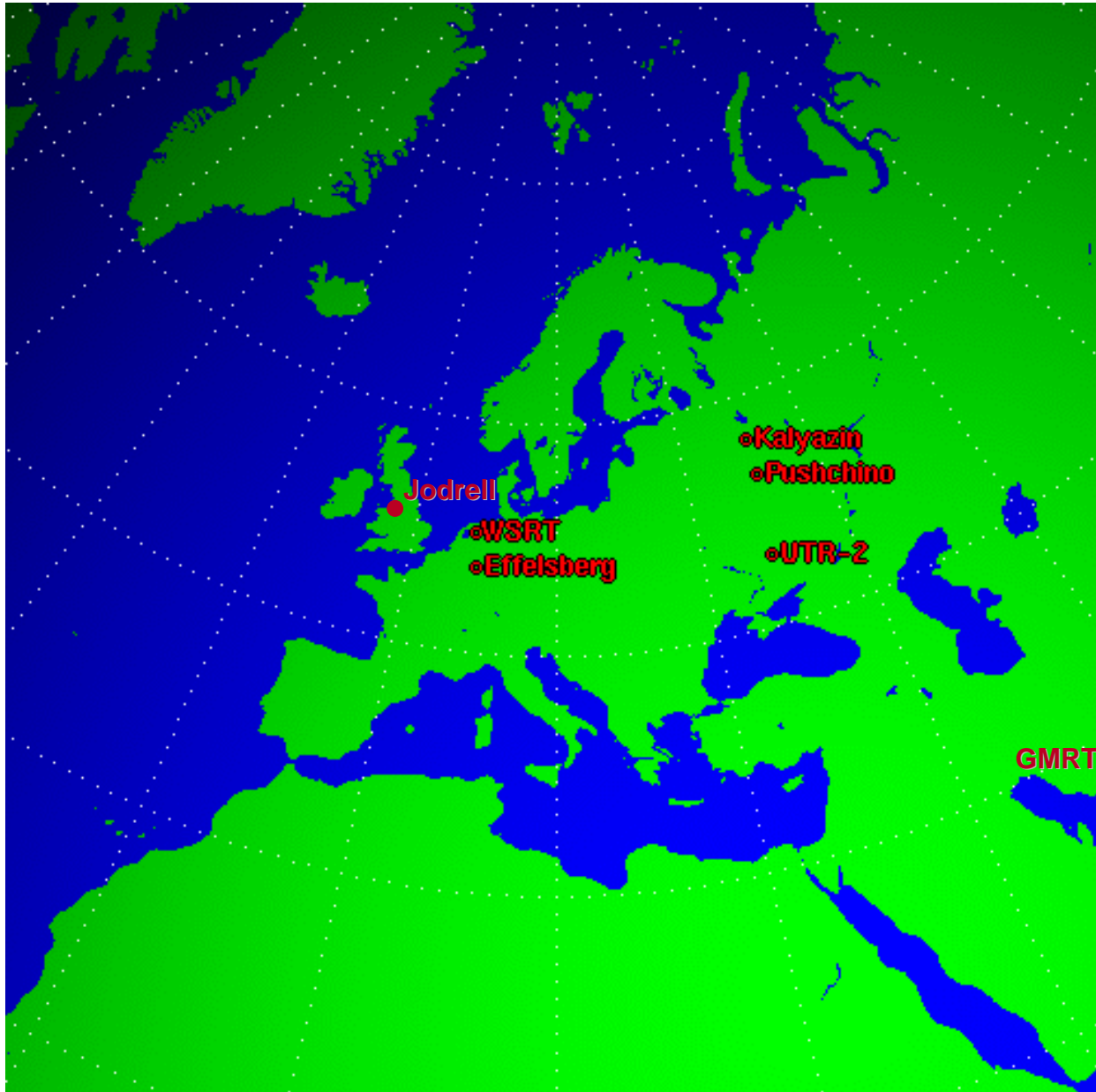
→ **A Public Database of Profiles and Spectra**

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/pulsar/data>

→ **Multi-telescope and multi-frequency observations now take place regularly with very little organisational overhead!**

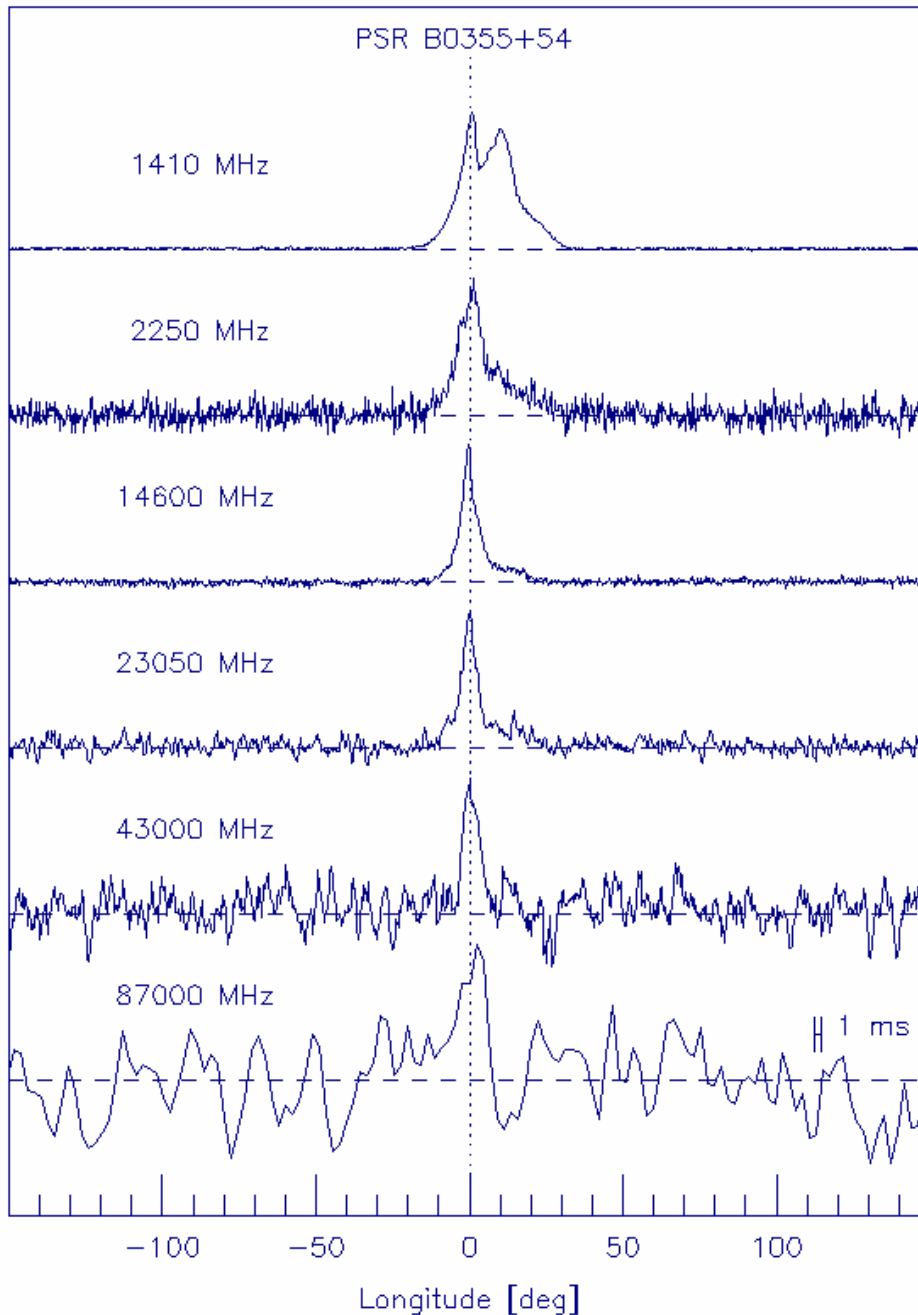
08.07.20

The European Pulsar Network



08.07.2006

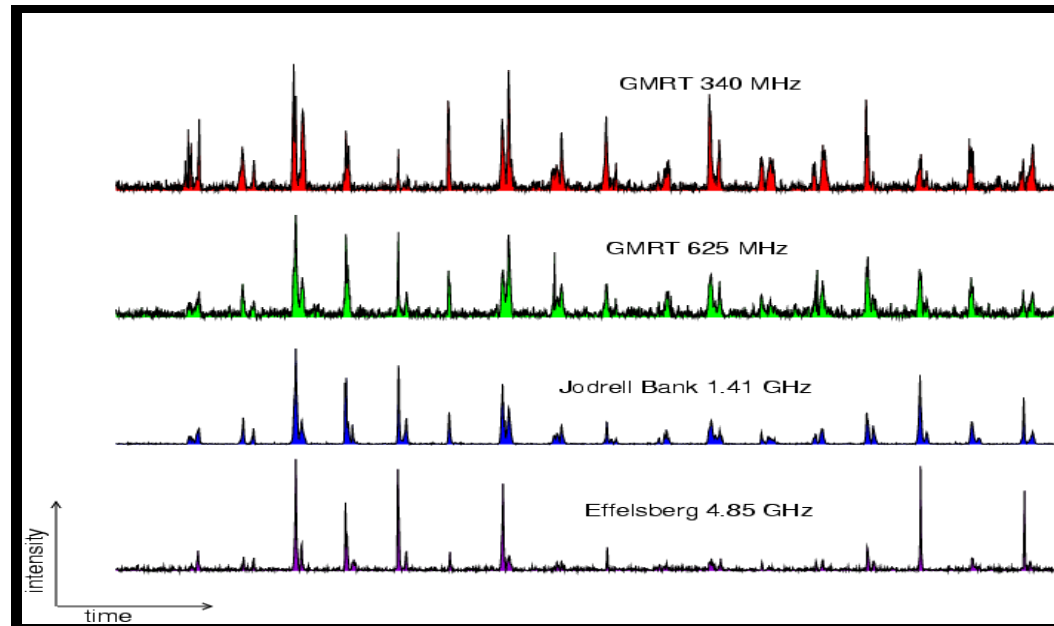
Jessner



- Effelsberg-Beobachtungen
- Höchste Radiofrequenzen zu denen jemals Pulsare beobachtet wurden
- Entspricht einer Emissionshöhe von 50-100 km über der Pulsaroberfläche

Simultaneous multifrequency observations

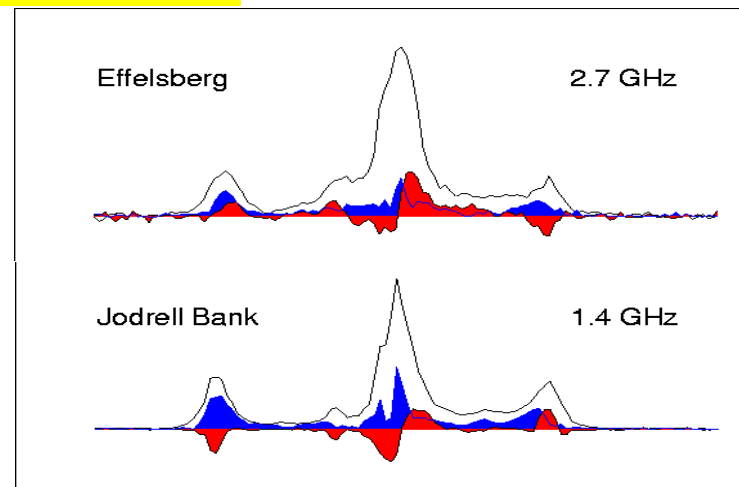
Single pulses of
PSR B1133+16:



Karastergiou, MPIfR

Broad-band radio emission of pulsars confirmed !

- Single pulse of B0329+54
in full polarization:



O. Löhmer, MPIfR

08.07.2006

Jessner

Radius To Frequency Mapping: RFM

PHILLIPS & WOLSZCZAN

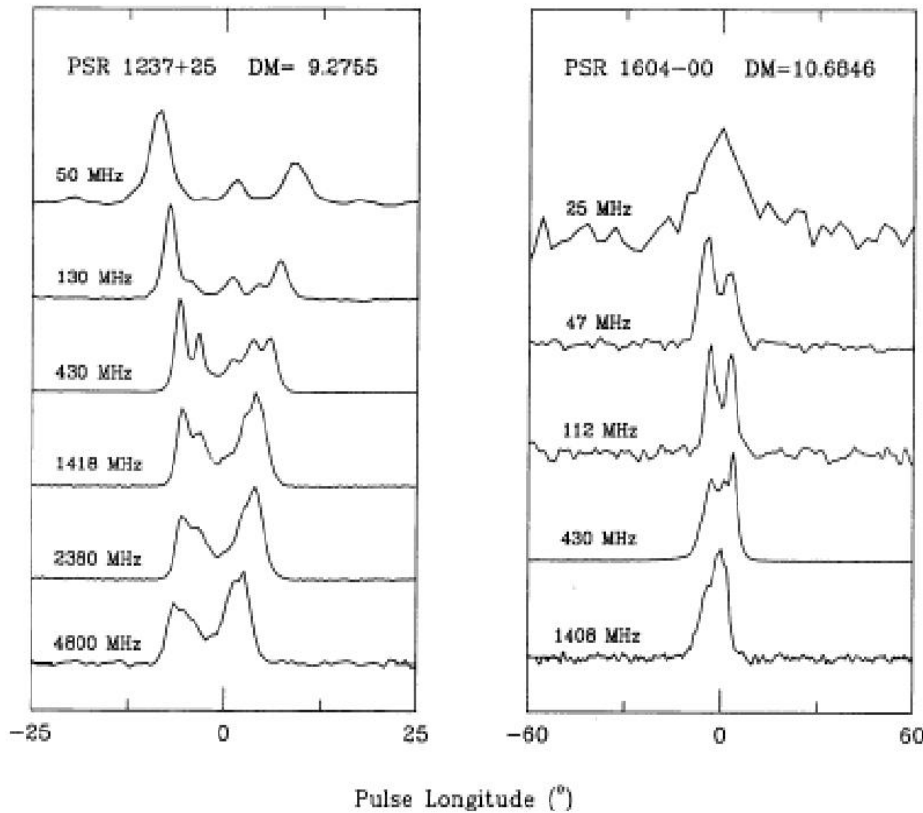
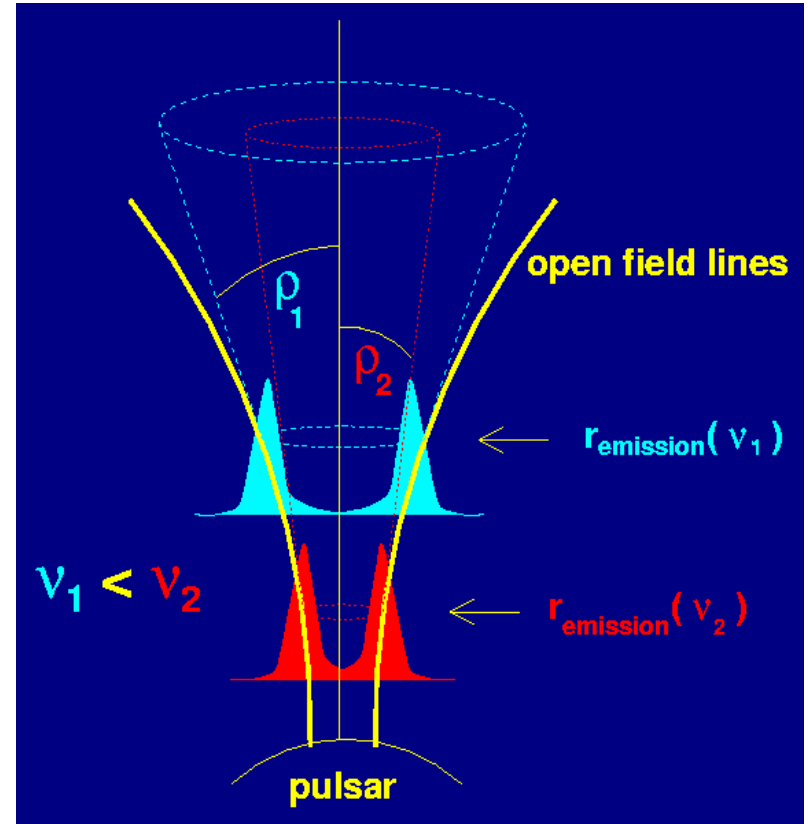


FIG. 4.—Time-aligned multifrequency profiles of PSR 1237+25 and PSR 1604-00

Low frequency emissions have wider profiles

compared to

profiles at higher frequencies



08.07.2006



Verschiedene Arten von Pulsaren

Pulsar-Arten



Statistik zeigt zwei Gruppen von Pulsaren:
Rotationsdauern

-ab 20ms

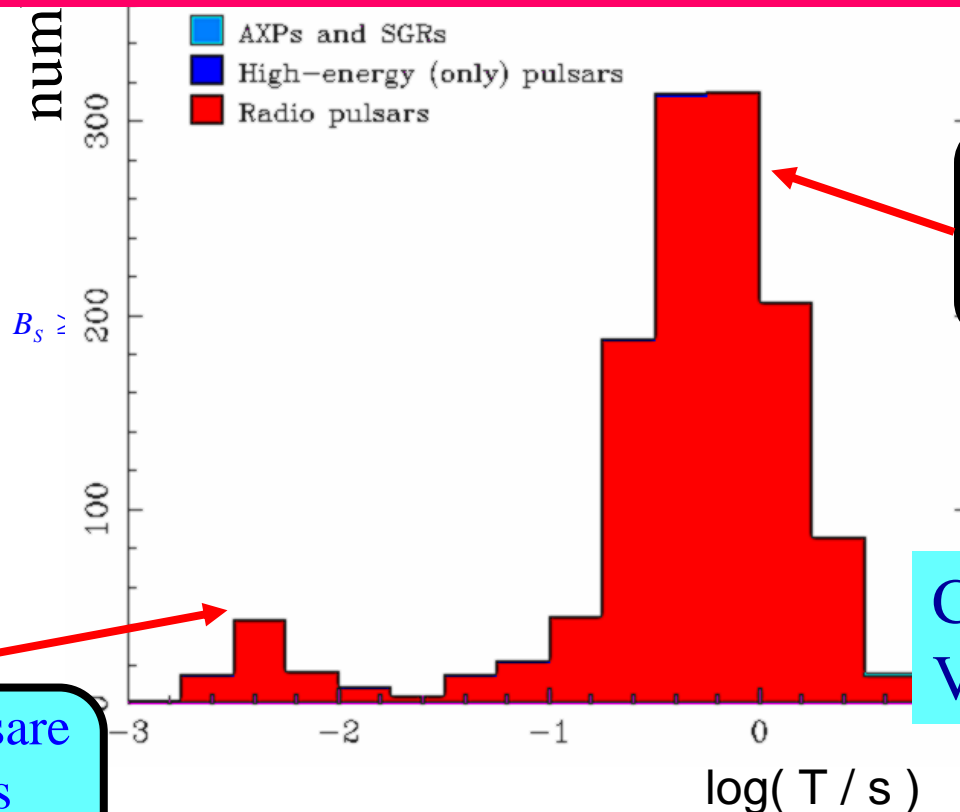
-1ms bis 20ms

Magnetfeld: B um 10^8 T

Magnetfeld: B um 10^5 T

Bsp.: Pulsar im Krebsnebel $T=33$ ms

Bsp.: 1987 in M82 entdeckt $T=3,054$ ms

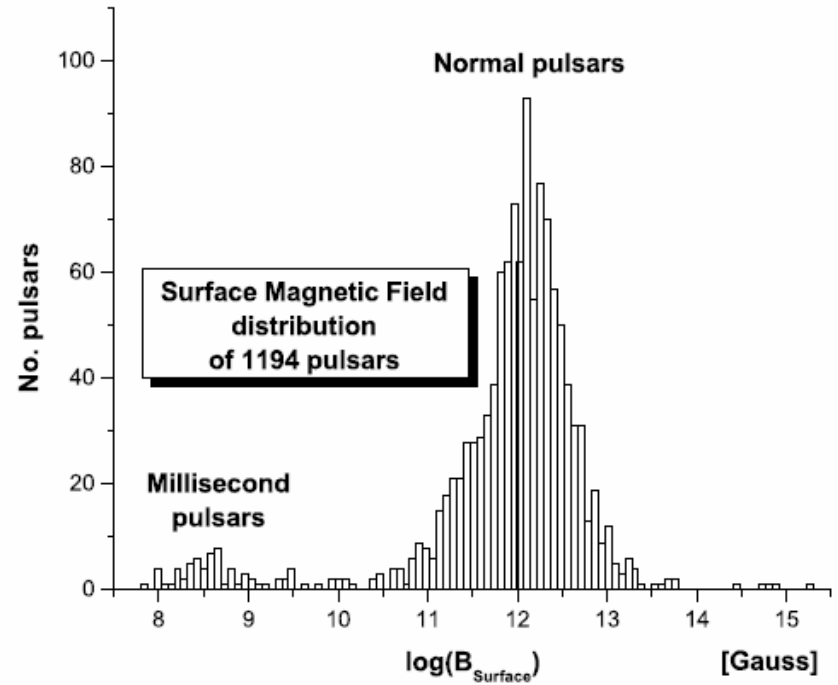
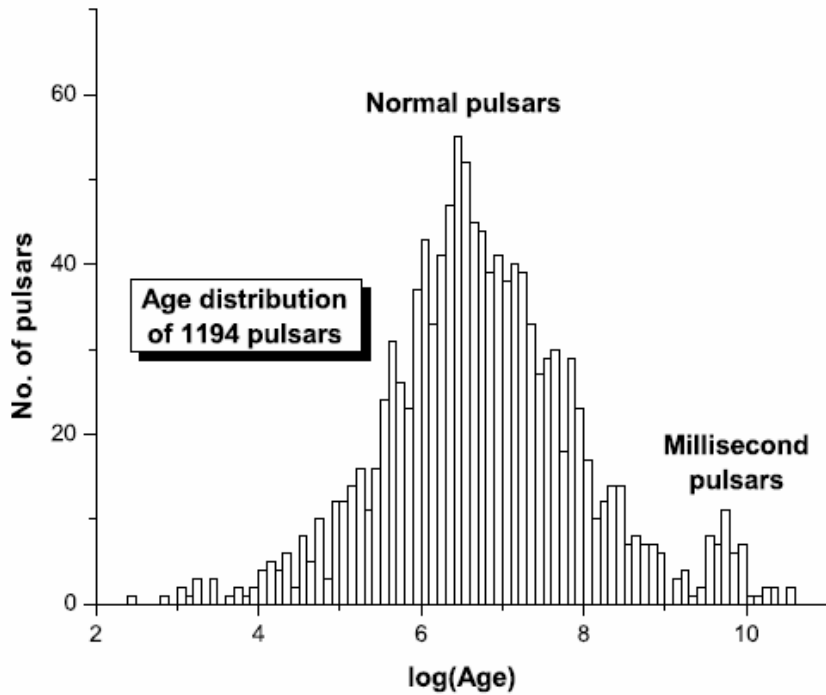


„Normale“ Pulsare
 $T > 20$ ms
 $B_S \geq 10^8$ T

Crab: $T = 33$ ms
Vela: $T = 89$ ms

Millisekunden Pulsare
 $1 \text{ ms} < T < 20 \text{ ms}$
 $B_S \leq O(10^5) \text{ T}$

Statistik





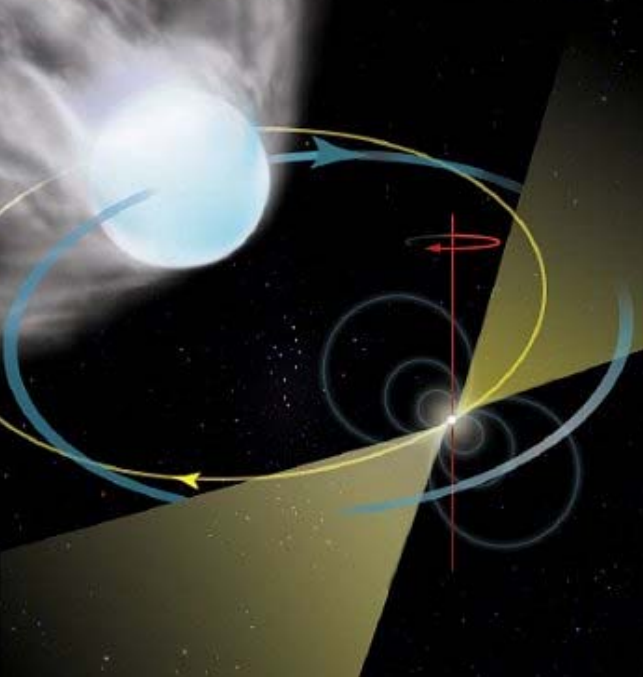
Millisekunden- Pulsare

Millisekunden- Pulsare



Terzan 5 RA: 17h 48m 4.9s
Dec: -24 48' 45

By Mike Morton & Tracy Knauss
North is down, West is to the left



- Ter5ad: schnellster Pulsar:
716 Rotationen pro Sekunde,
15% c
- Im Kugelsternhaufen Terzan
5, 28000 Lichtjahre Entfernung
zur Erde, Alter: 10 Milliarden
Jahre
- Bislang: 33 Millisekunden-
Pulsare in dem Sternhaufen
gefunden

Der Mini-Pulsar und sein stellarer Begleiter (Bild: Bill Saxton,
NRAO/AUI/NSF)

Binäre Pulsare



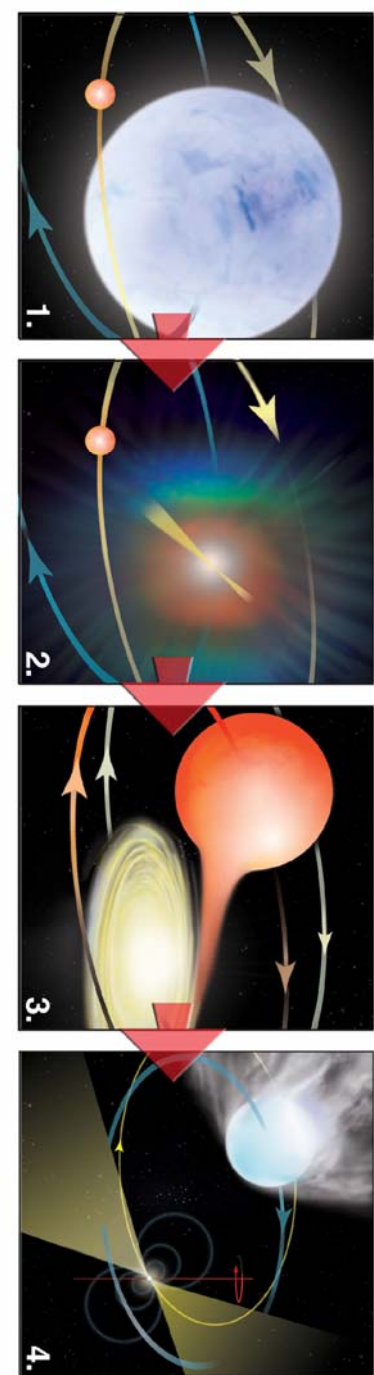
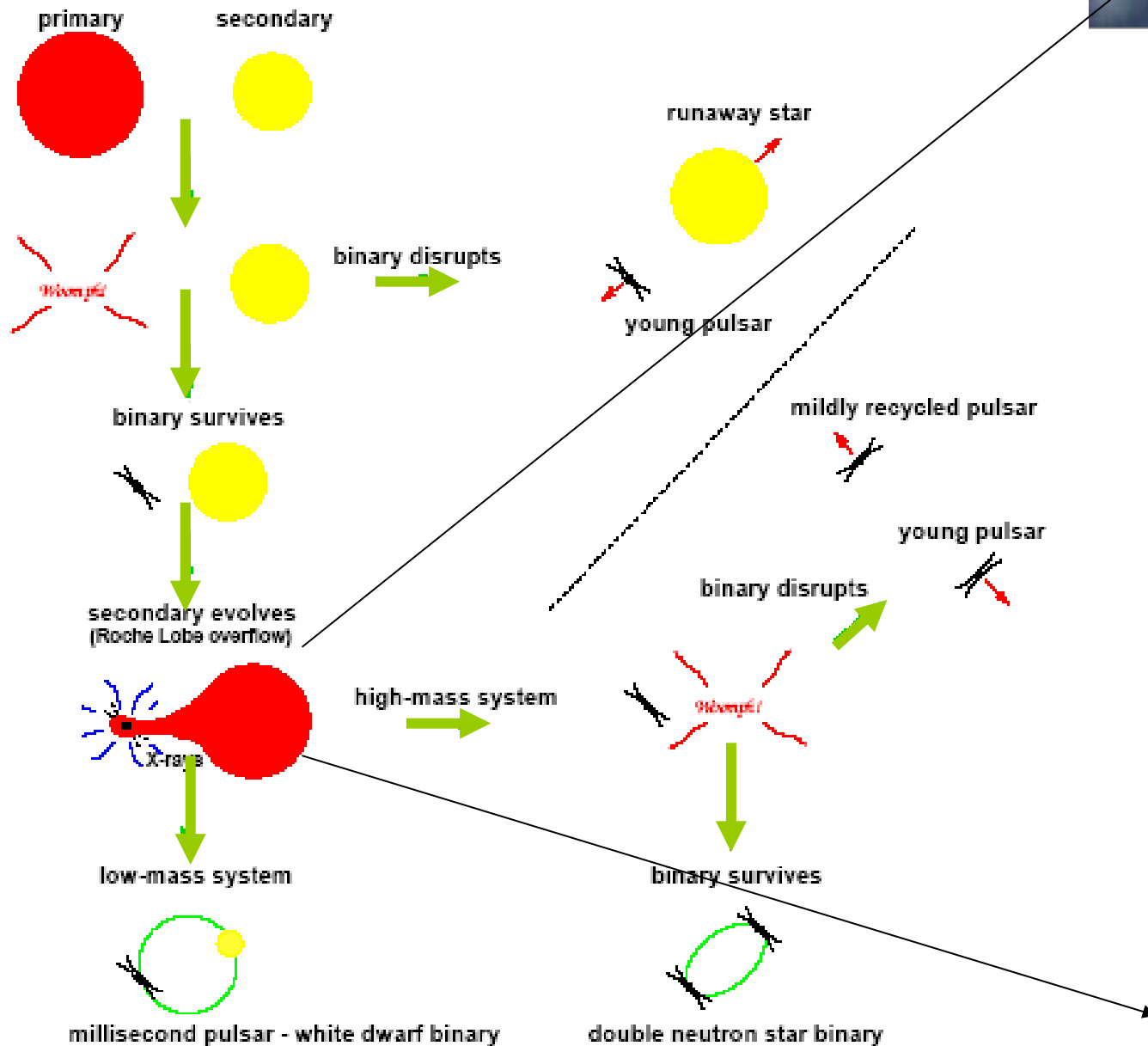
- 4% der bekannten galaktischen Pulsare gehören zu binären Systemen: mit weißen Zwergen, Hauptreihensternen oder Neutronensternen
- Favorisiert: 45 Jahre Orbit geringer Exzentrizität (Halbachse: 25 AU)
- In 80% der Millisekunden-Pulsare
- $<1\%$ der normalen Pulsare

Zahlen

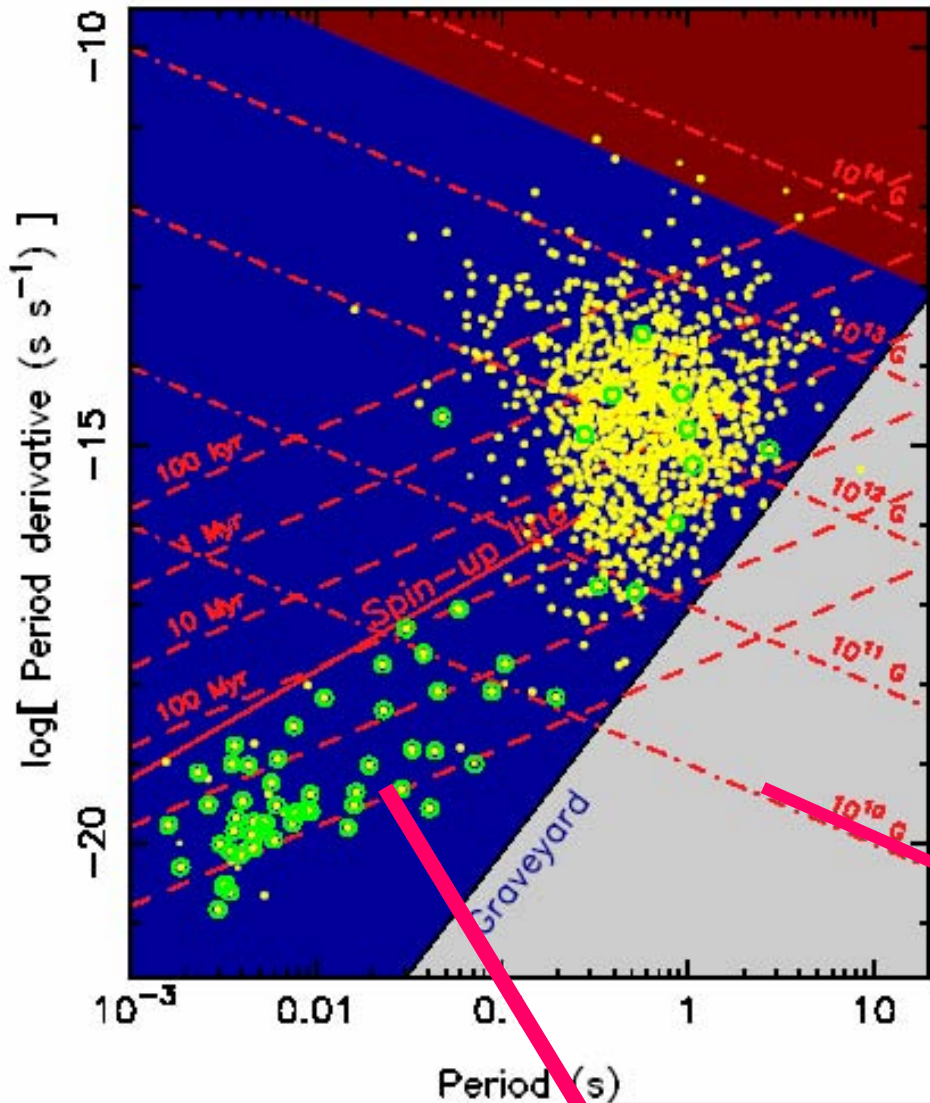


- Mehr als 1700 Pulsare zur Zeit bekannt
- 80 binäre und Millisekunden Pulsare in der Scheibe unserer Galaxis
- Weitere 103 Pulsare in 24 der galaktischen Kugelsternhaufen
- Ein Doppel-Pulsar System

Wie Millisekunden-Pulsare entstehen



Normale und Millisekunden Pulsare



- Binäre Pulsare in offenen Kreisen
- Unterschiedliche Populationen
- Unterschiedliche Magnetfeldstärken und Alter
- Keine Radiostrahlung außerhalb der blauen Region erwartet/erlaubt

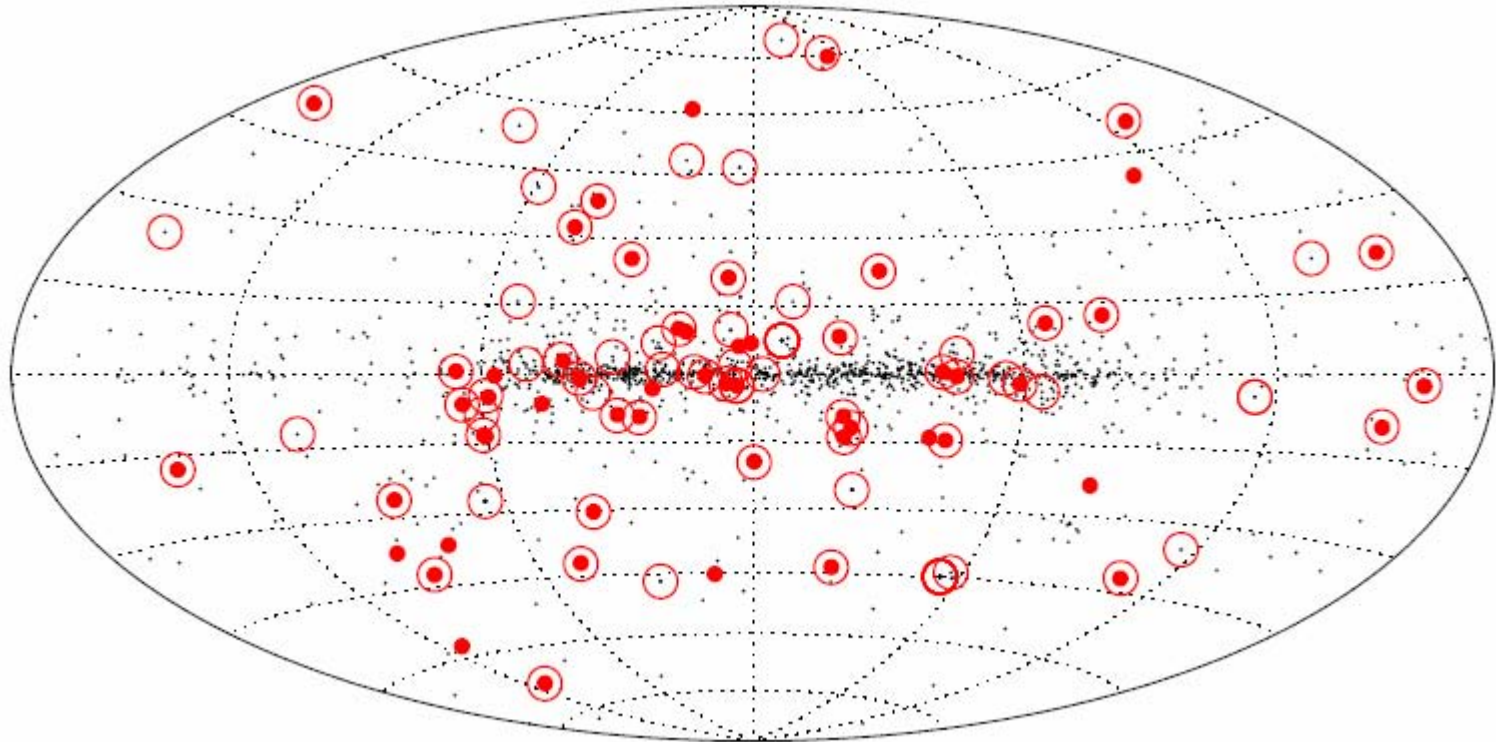
Linien gleicher
Magnetfeldstärke

Linien gleichen Alters

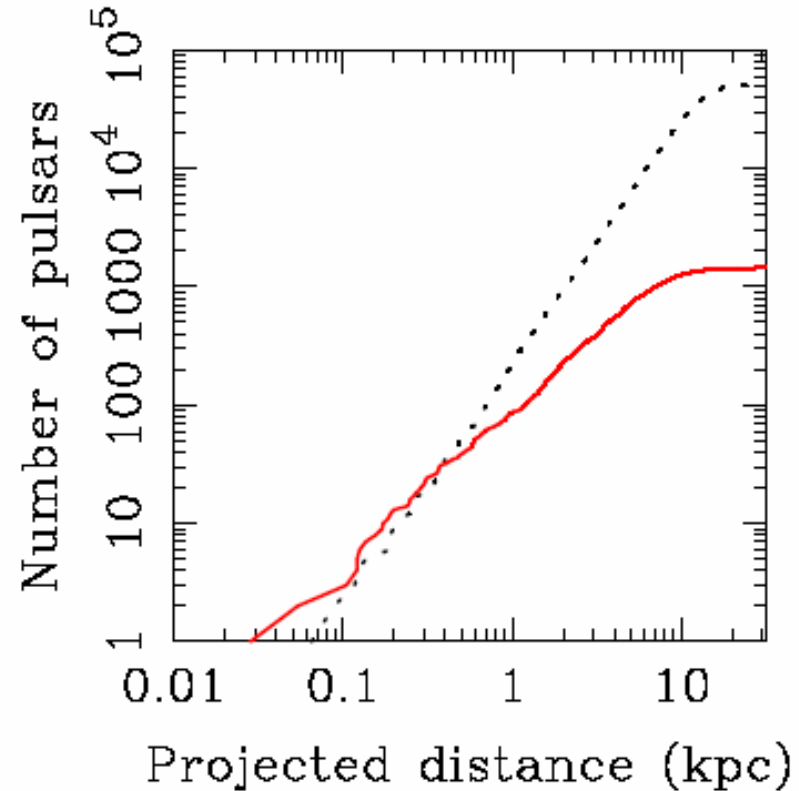
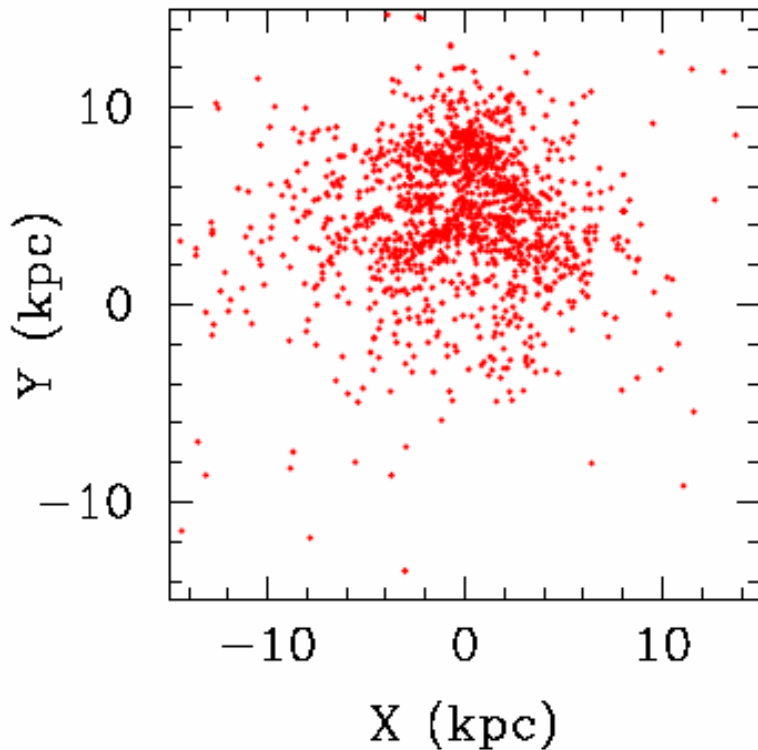


Verteilung der Pulsare

Verteilung der Pulsare

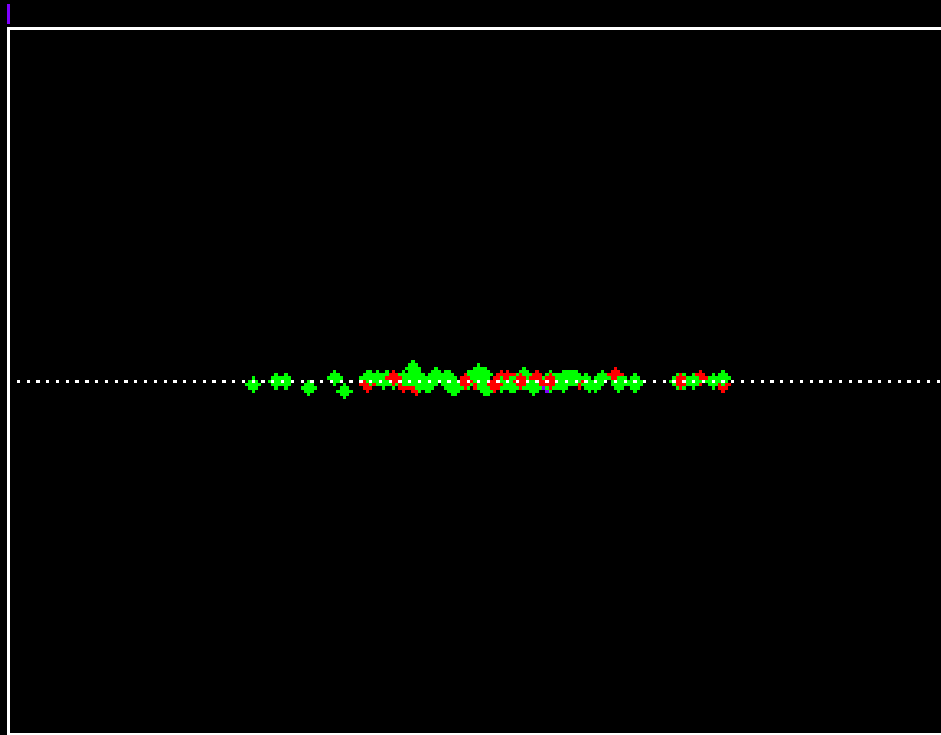


Pulsar Statistik



- Links: Verteilung Pulsare projiziert auf die galaktische Ebene, galaktisches Zentrum in der Mitte, Spiralarmstruktur in der Verteilung zu erkennen
- Rechts: Anzahl der Pulsare als Funktion der projizierten Distanz von der Sonne, durchgezogene Linie zeigt beobachtete Anzahl, gepunkte: Population ohne Auswahleffekte

Pulsarbewegungen



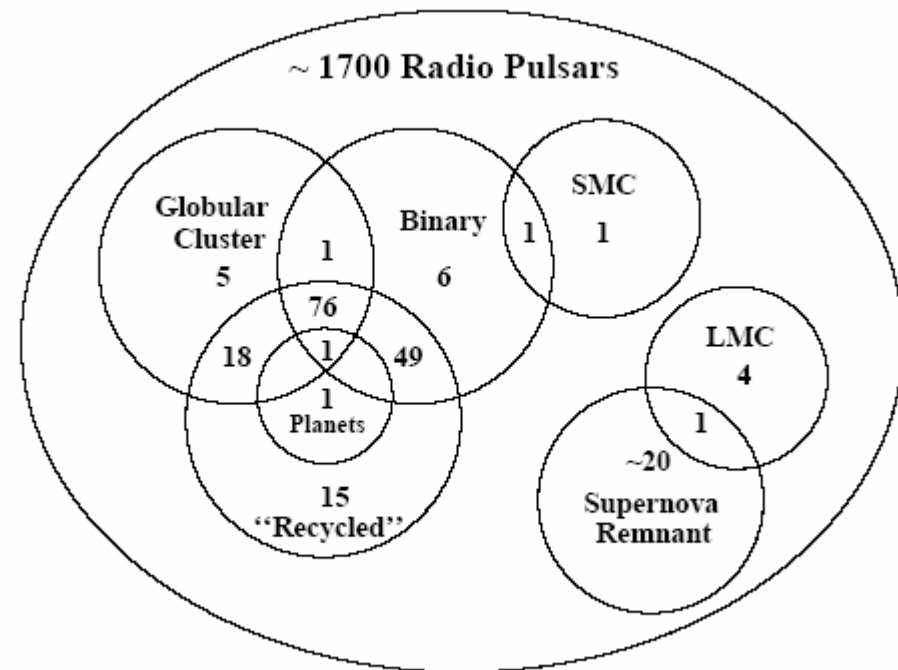
- Simulation: Bewegung der 100 Pulsare in einem Modell eines Gravitationspotentials unserer Galaxie für 200 Myr
- Pulsare sind schneller als ihre Hauptreihen-Vorgänger, Krebs-Pulsar schneller als 100 km/s, Eigenbewegungen von 233 Pulsaren bislang gemessen (0 -1000 km/s)

Lorimer

Pulsar-Zoologie



- Isolierte Pulsare
- Pulsare in Supernova-Resten
- Röntgen-Pulsare (binäre Systeme)
- Soft Gamma-ray repeaters (SGR)/Magnetars
- Millisekunden Pulsare
- Binäre Pulsar Systeme (PSR 1913+16)
- Pulsare mit Planeten
- Anomale Röntgen-Pulsare (AXP)
- Teilzeit Pulsare ...
- ...

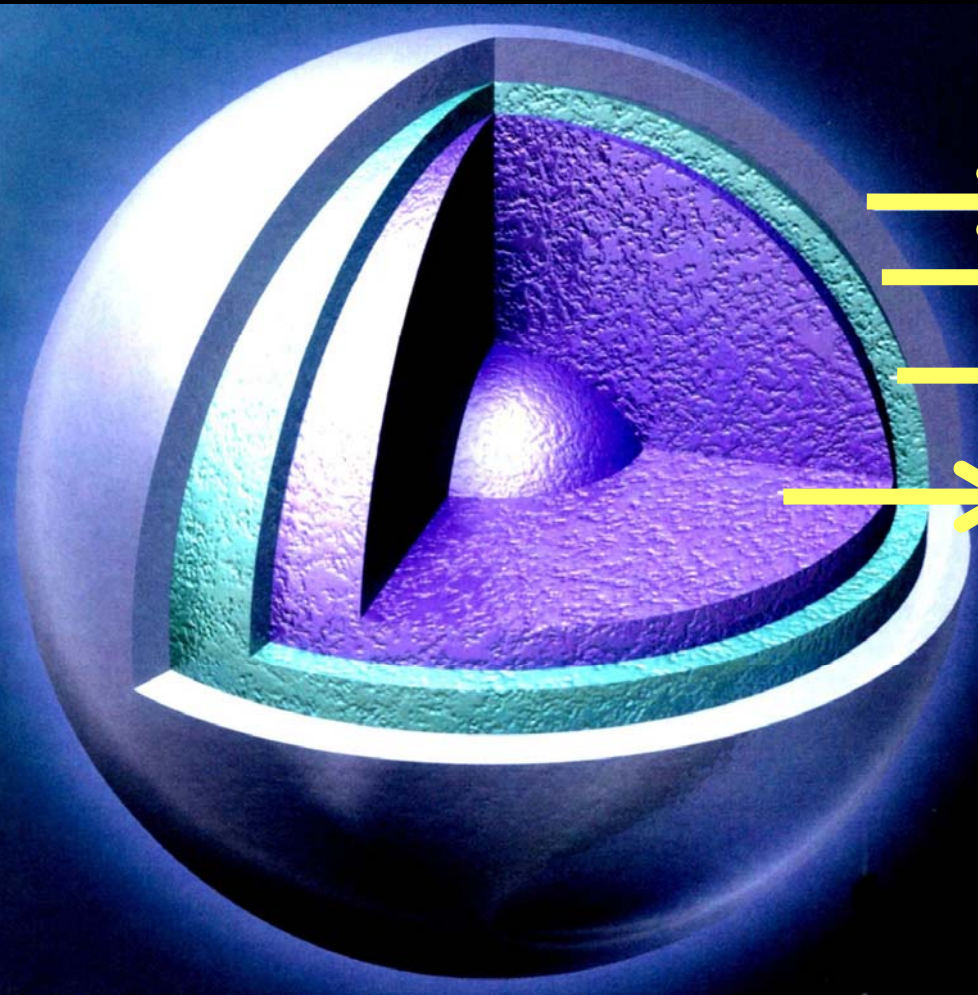




Pulsar- Mechanismus



Aufbau eines Neutronensterns



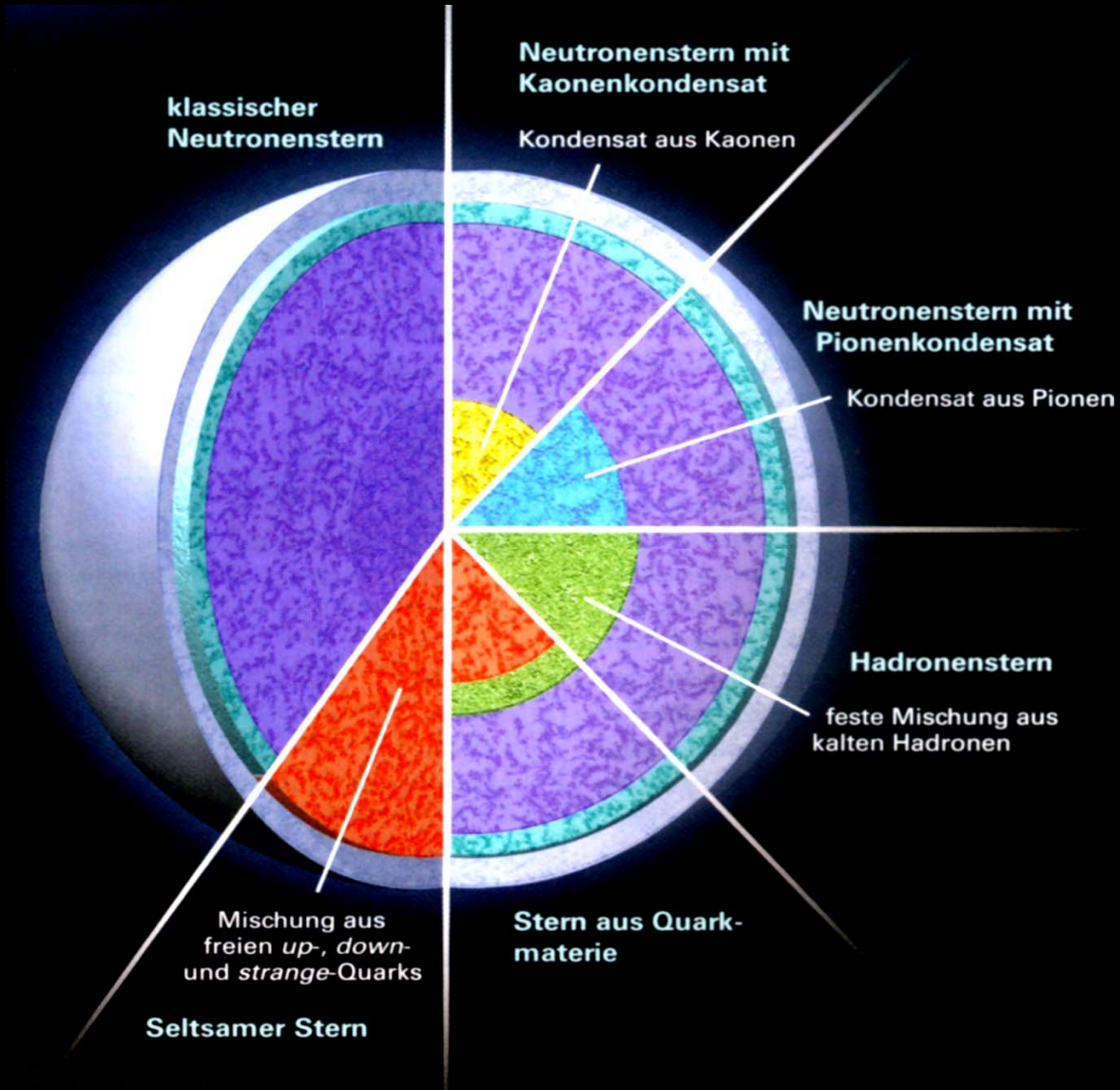
Oberfläche aus metallischen Eisen;
 $\rho=10^6 \text{ g cm}^{-3}$
(Eisenkerne in einem Elektronensee)

äußere Kruste; $\rho=4.3 \cdot 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$
(neutronenreiche Atomkerne und
Elektronen)

innere Kruste; $\rho=2 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$
(neutronenreiche Atomkerne, Elektronen
und Atomkerne)

Neutronenflüssigkeit; $\rho=10^{15} \text{ g cm}^{-3}$
(hauptsächlich Neutronen sowie einige
Elektronen und supraleitende Protonen)

Andere Modellvorstellungen



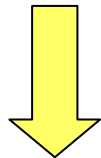
Sterngleichgewicht



Gravitationsdruck einer Massenverteilung:

Oppenheimer-Volkoff-Gleichung

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2} \left[1 + \frac{P}{\rho c^2}\right] \left[1 + \frac{4\pi r^3 P}{Mc^2}\right] \left[1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right]^{-1}$$



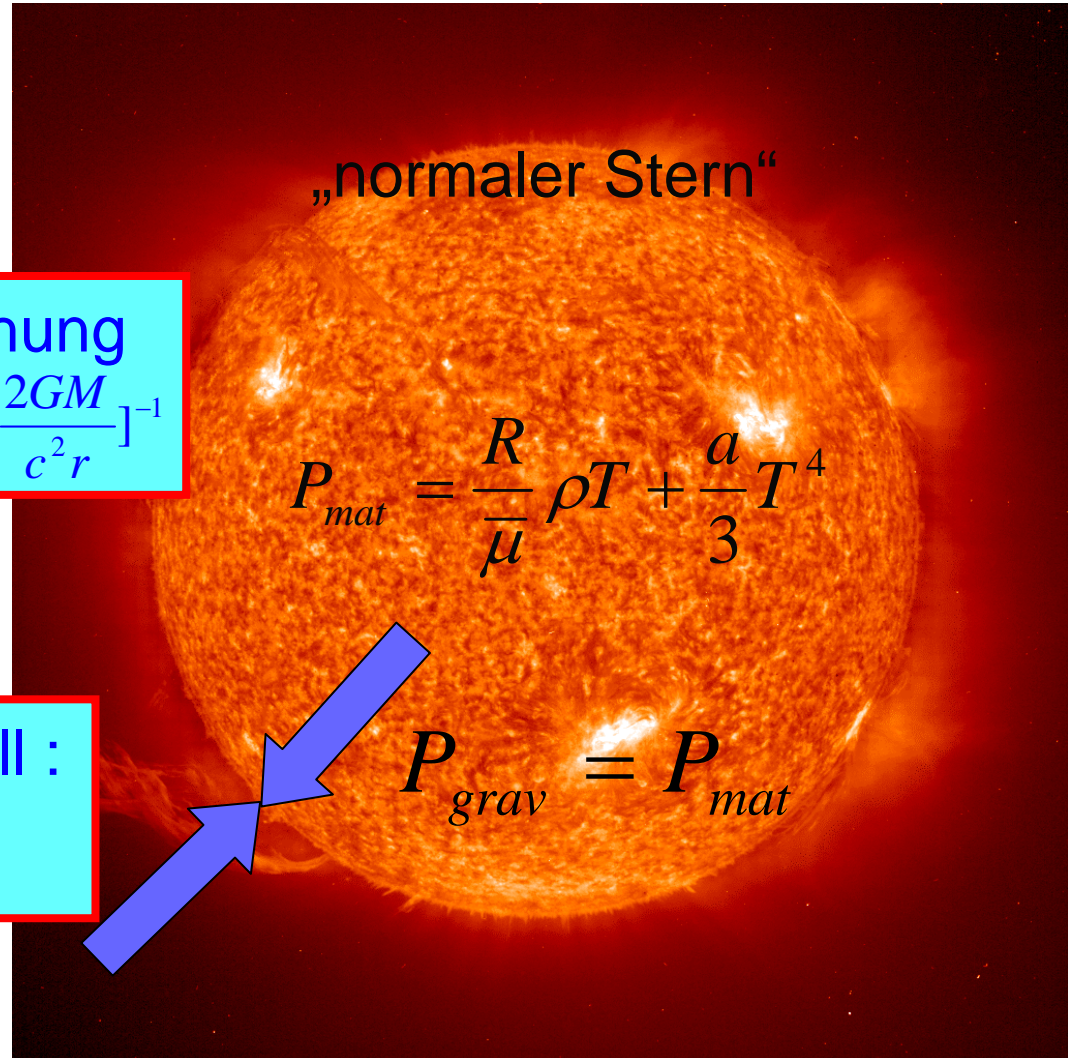
nichtrelativistischer Grenzfall :

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho(r)$$

„normaler Stern“

$$P_{mat} = \frac{R}{\bar{\mu}} \rho T + \frac{a}{3} T^4$$

$$P_{grav} = P_{mat}$$



Neutronenstern



$$E_{\text{kin}} > 1.5 m_e c^2$$

Inverser β^- -Zerfall: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

$$M = 2.7 \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^{1/2} M_{\text{Sonne}} \quad (\rho \leq \rho_c)$$

$$R = 11 \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{1/6} \text{ km} \quad (\rho \leq \rho_c)$$

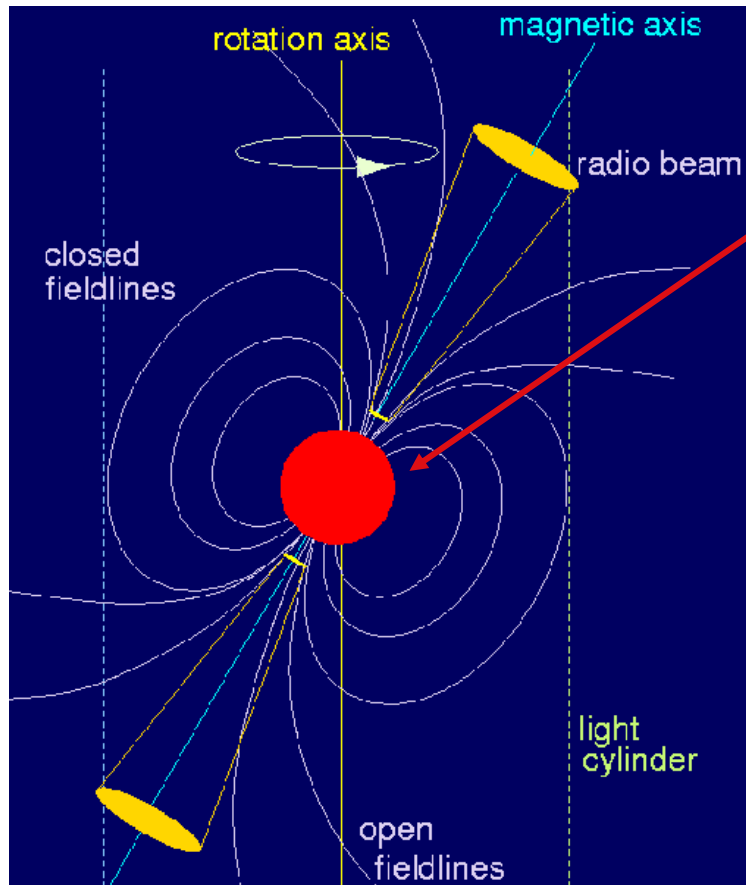
Massendichte

$$\rho_c = \frac{m_n^4 c^3}{3 \pi^2 \hbar^3} \approx 6 \cdot 10^{18} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1.5 M_{\text{sonne}} \leq M_C \leq 3 M_{\text{sonne}}$$

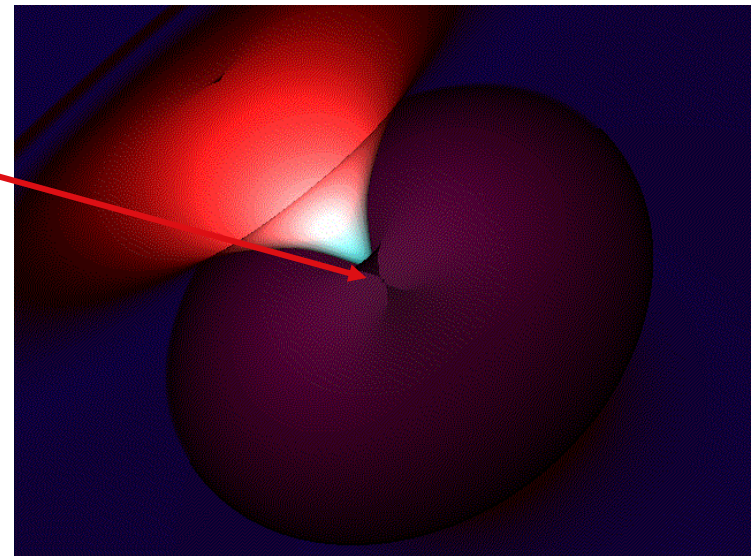
Pulsars are rotating and highly magnetised neutron stars

Schematic Pulsar Magnetosphere



O. Löhmer, MPIfR

Simulation on a proper scale



$r_{ns}=10\text{ km}$

We receive a radio pulse whenever the radio beam points towards the telescope

Phänomenologie

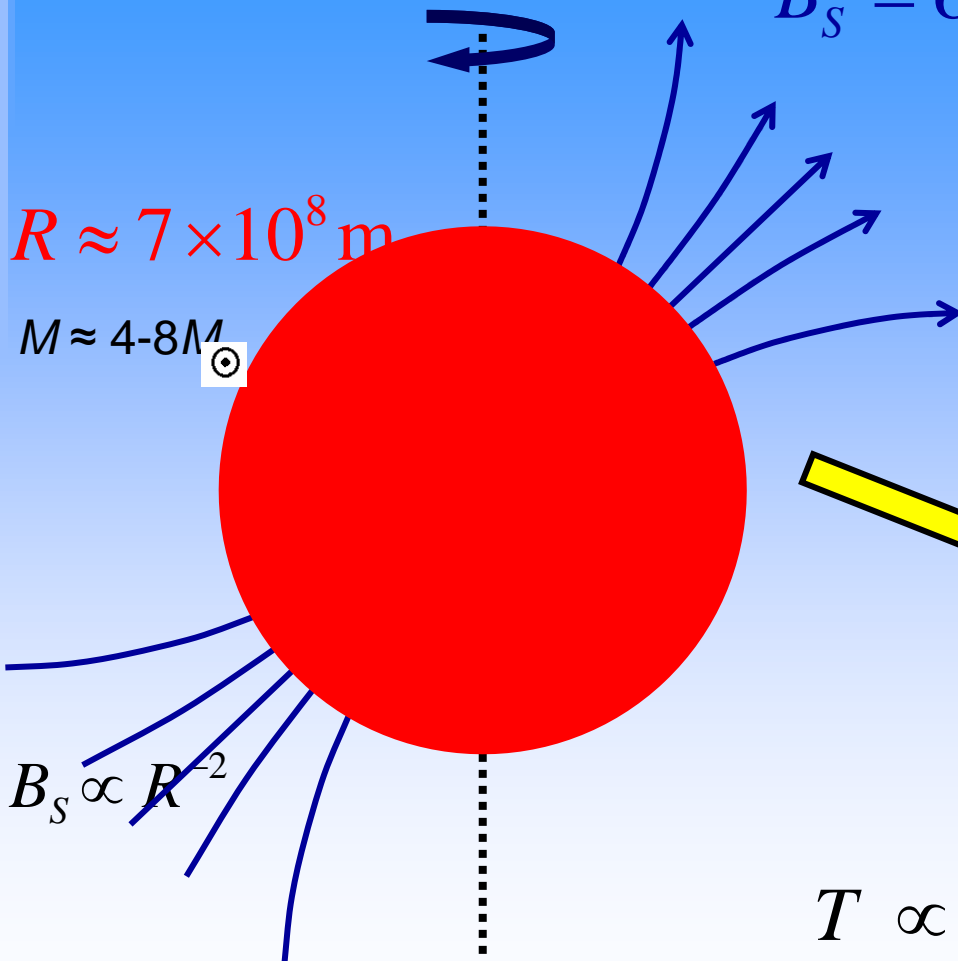


$T \approx 26$ Tage

$B_S = O(10^{-2} T)$ an der Oberfläche

$R \approx 7 \times 10^8$ m

$M \approx 4-8 M_{\odot}$



Supernova- Explosion

- Großteil der äußeren Hülle wird abgestoßen
- Rest: Gravitationskraft führt zum Kollaps

$T > 0.4$ ms

$R \approx 10$ km

$B_S = O(10^8 T)$

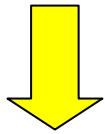
$T \propto R^2$

$M \approx 1,4 - 1.8 M_{\odot}$

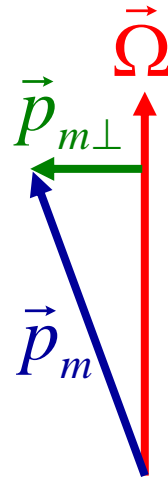
Pulsare als magnetische Dipol-Antenne



Rotator Modell

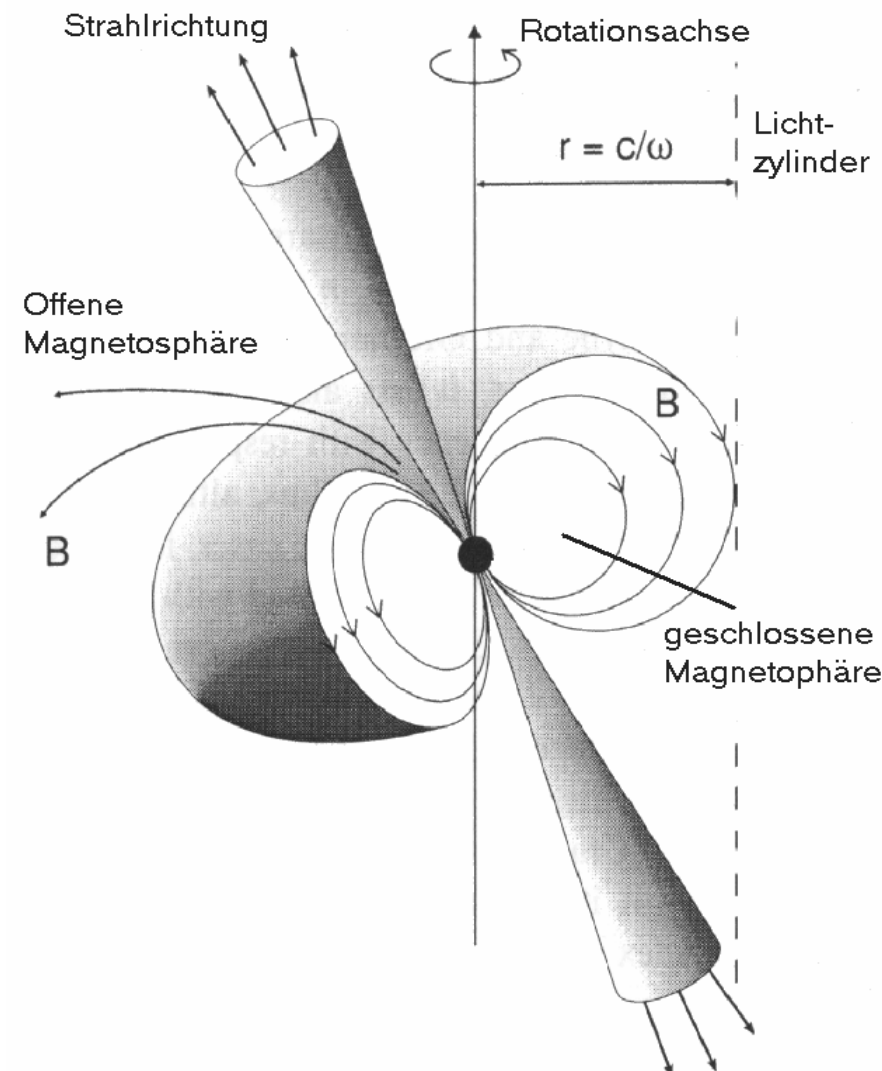


Magnetische Abbremsung
durch Abstrahlung von
polarisierter Dipolstrahlung



$$-\frac{dE}{dt} = \frac{\mu_0 \Omega^4}{6\pi c^3} P_{m\perp}^2 = -\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \Omega^2 \right)$$

$$\Rightarrow \dot{\Omega} = -\frac{\mu_0 P_{m\perp}^2}{6\pi c^3 I} \Omega^3 = -K \Omega^3$$



Der Bremsparameter



Magnetischer Bremsparameter vorhergesagt: $\dot{\Omega} = -K\Omega^n$ $n = 3$

Bremsparameter n messbar durch : $n = \frac{\Omega\ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2} = 2 - \frac{T\ddot{T}}{\dot{T}^2}$

- Crab: $n = 2.515 \pm 0.005$
- PSR 1509-58: $n = 2.8 \pm 0.2$
- PSR 0540-69: $n = 2.01 \pm 0.02$

Der Bremsparameter



Gravitationswellen?

sind möglich, lösen das Problem aber nicht, denn wenn nur Bremsung durch magn. Dipolstrahlung und Grav. Wellen, müsste eher $n > 3$ sein

Idee: $n < 3$, wenn angenommen, dass Trägheitsmoment J des Sterns sich ändert, veränderte Zentrifugalkräfte rufen durch Formänderung des Sterns Veränderung der Rotationsperiode hervor



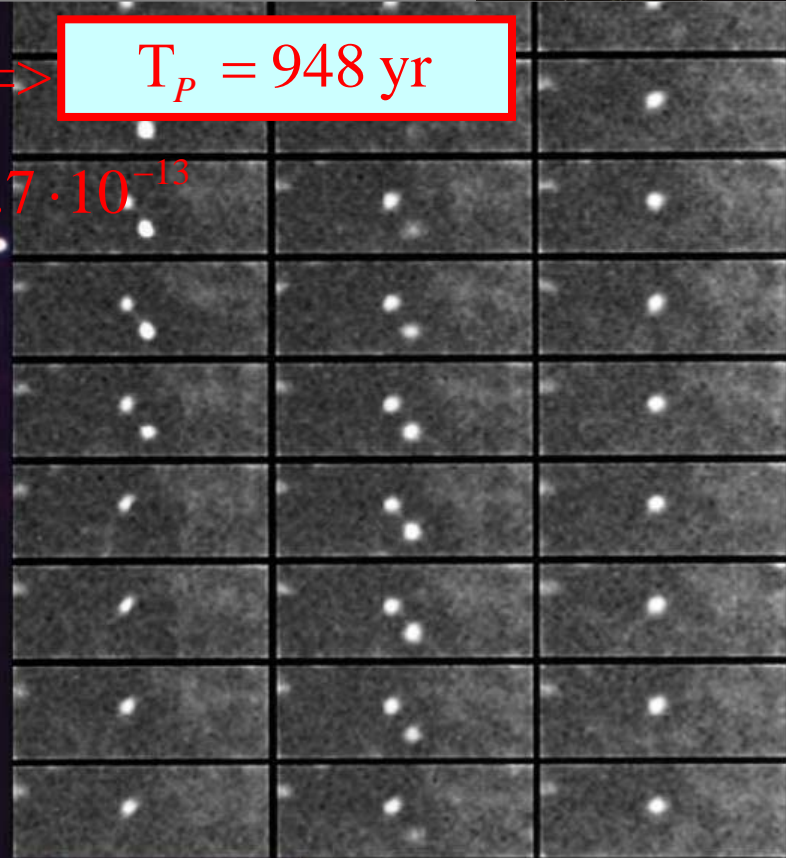
Beobachtung des Ausbruchs: 1054 =>

$$T_p = 948 \text{ yr}$$

Eigenschaften: $T = 33 \text{ ms}$ $\dot{T} = 3.7 \cdot 10^{-13}$

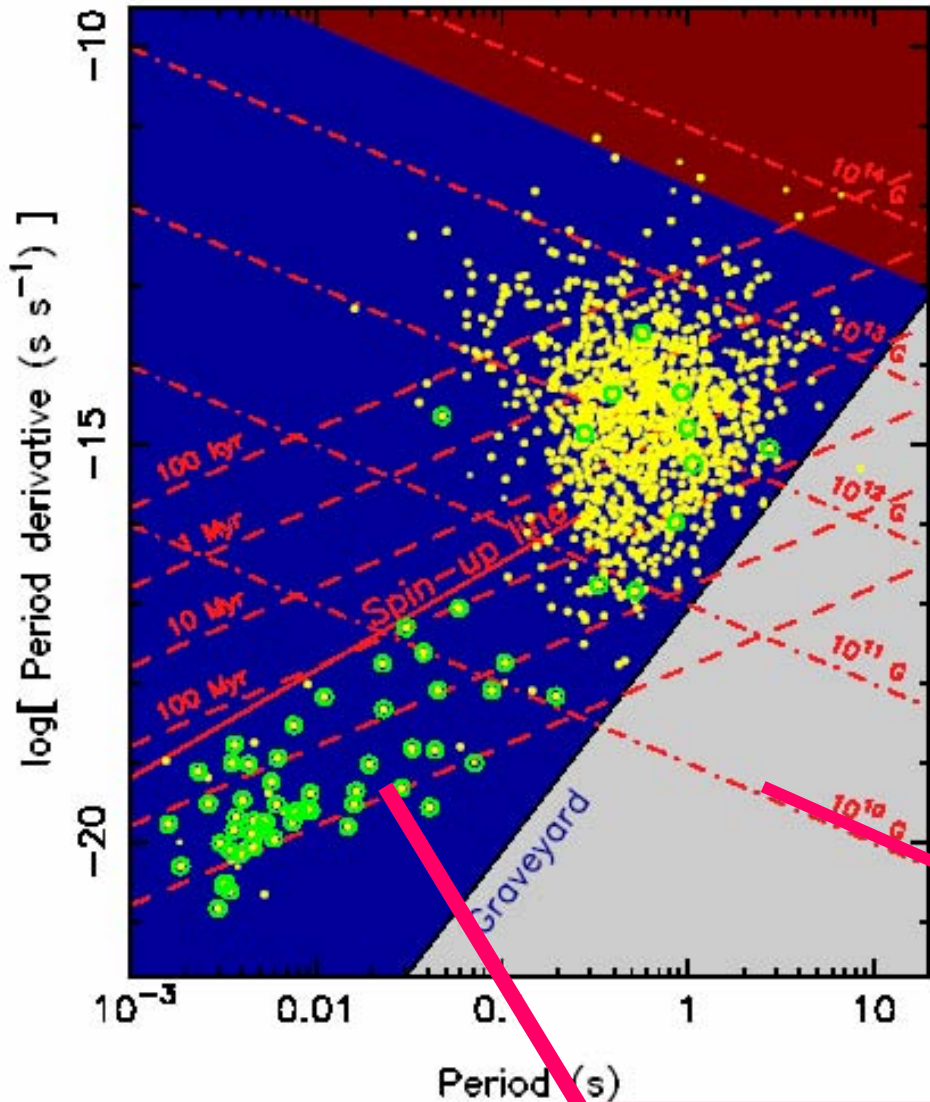
Theorie:

$$T_p \approx \frac{T}{2\dot{T}} \approx 1400 \text{ a}$$



Pulsar im
Crab-Nebel
PSR B0531+21
 $T = 33 \text{ ms}$

Normale und Millisekunden Pulsare



- Binäre Pulsare in offenen Kreisen
- Unterschiedliche Populationen
- Unterschiedliche Magnetfeldstärken und Alter
- Keine Radiostrahlung außerhalb der blauen Region erwartet/erlaubt

Linien gleicher
Magnetfeldstärke

Linien gleichen Alters



Pulsare: Spektrale Energieverteilung

Strahlung der Pulsare



- Radio: die meisten Pulsare werden im Radiobereich detektiert. 1700+ Pulsare bislang (0.1 mJy – 5 Jy)
- Gamma-Strahlung: viele Punktquellen, viele mit Pulsaren identifiziert, in einigen wurden Pulse gefunden (Statistik nicht gut genug)
- Optisch: nur ~10 detektiert. Nicht alle pulsieren
- Röntgen: viele Pulsare, schwächer als Radio-Emission
- Jüngere Pulsare strahlen eher höher energetische Strahlung ab

Integriertes Profil des Krebs-Pulsars Spektrale Energieverteilung

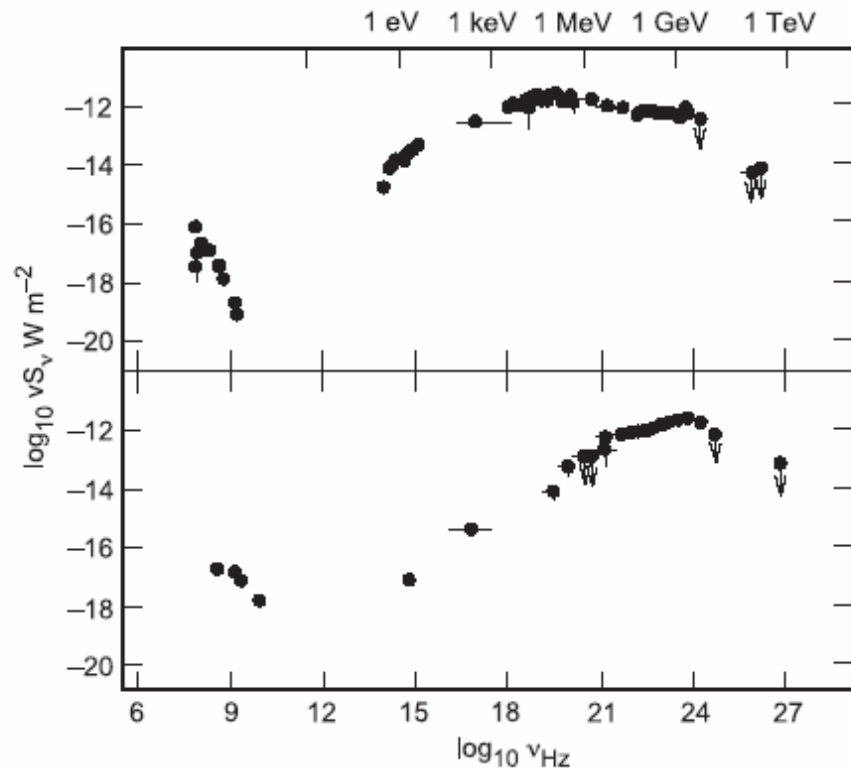
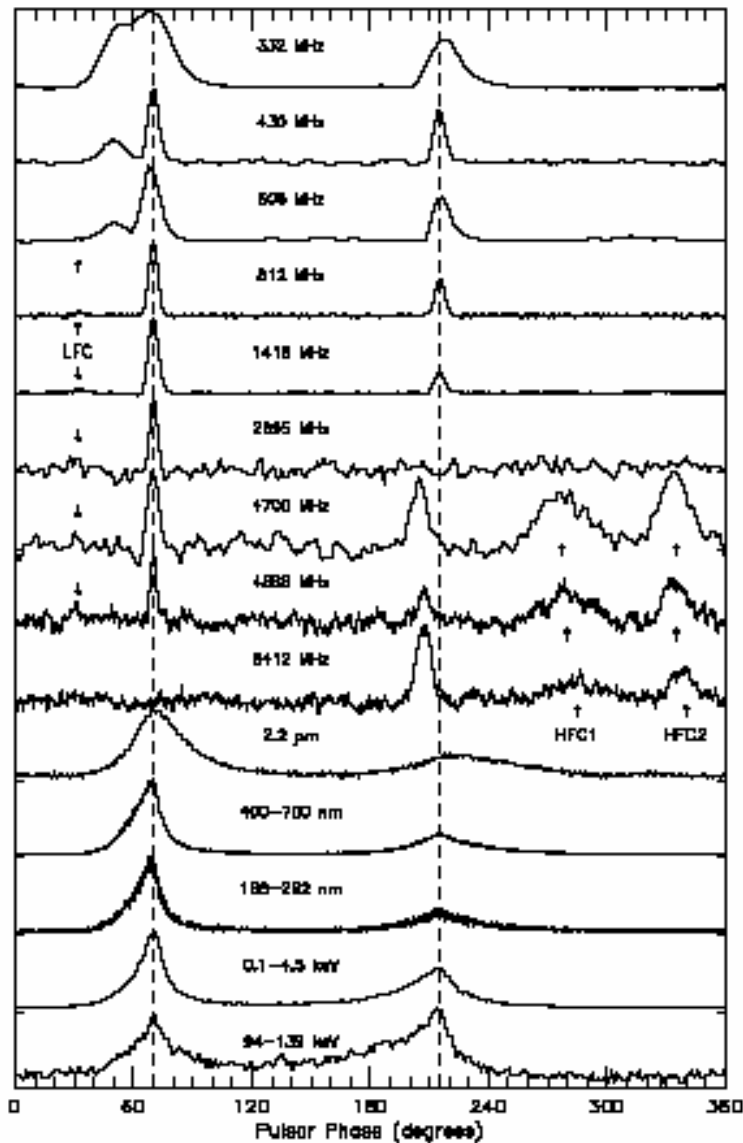
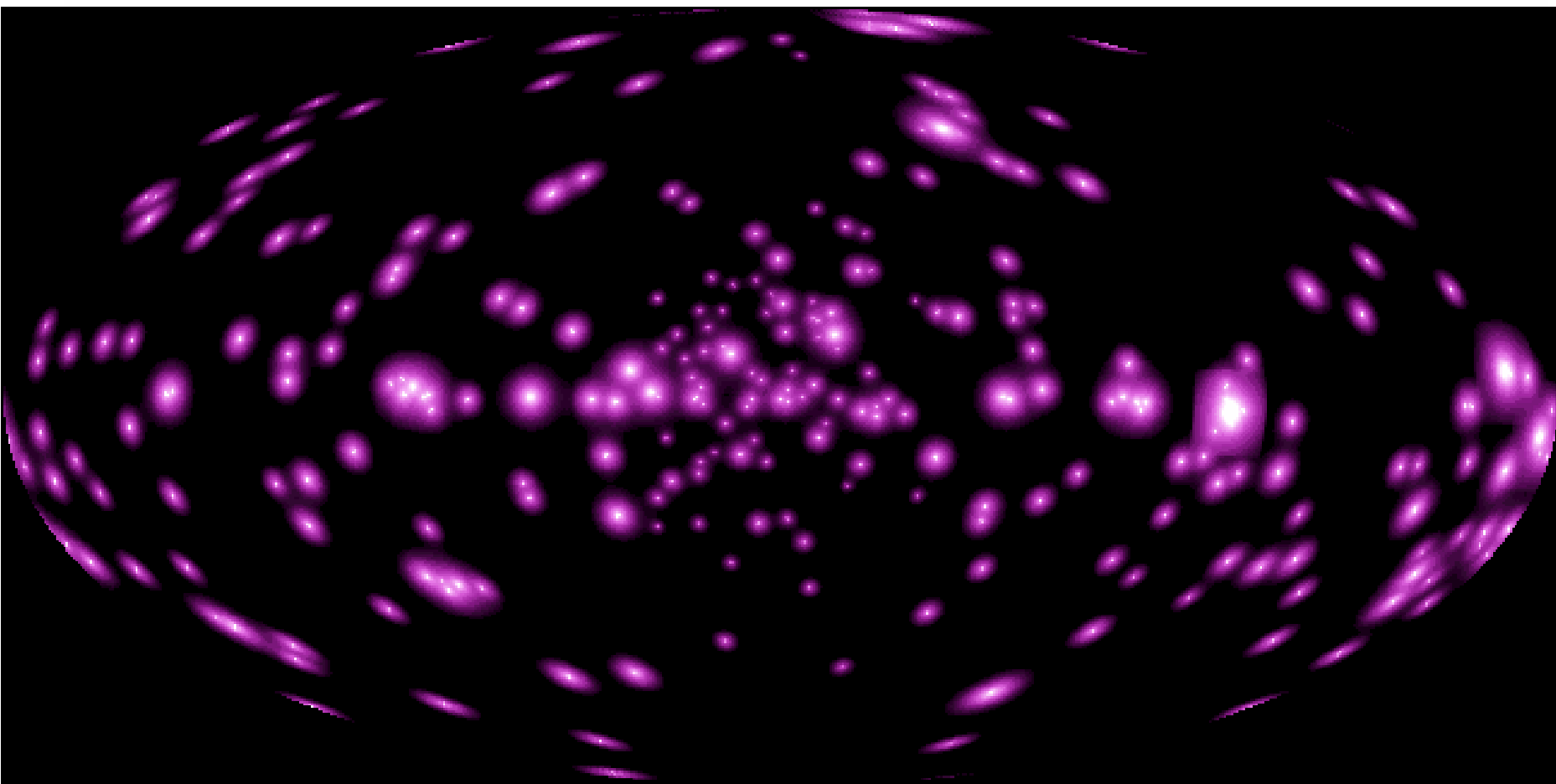


Figure 37. The distribution of emitted power in the Crab and Vela pulsars, plotted as $\log \nu S_\nu$ versus $\log \nu$ (Thompson 1996).

EGRET-Pulsars



- ★ Pulsars
- Solar Flares
- ◆ Galaxy (LMC)
- ▲ Unidentified Sources

Pulsar im Krebs/Velanebel

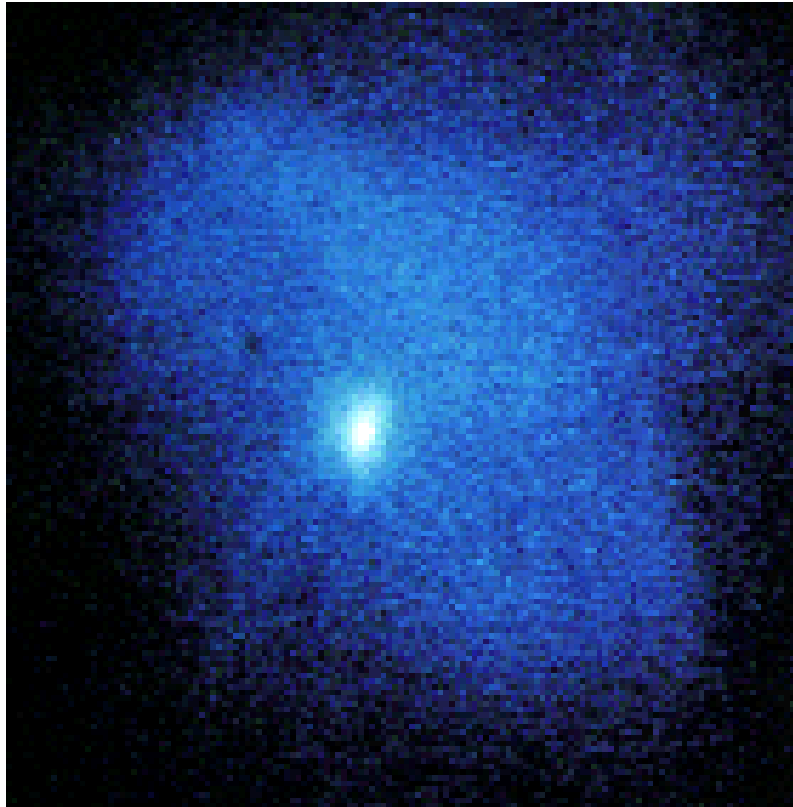


Krebs Pulsar

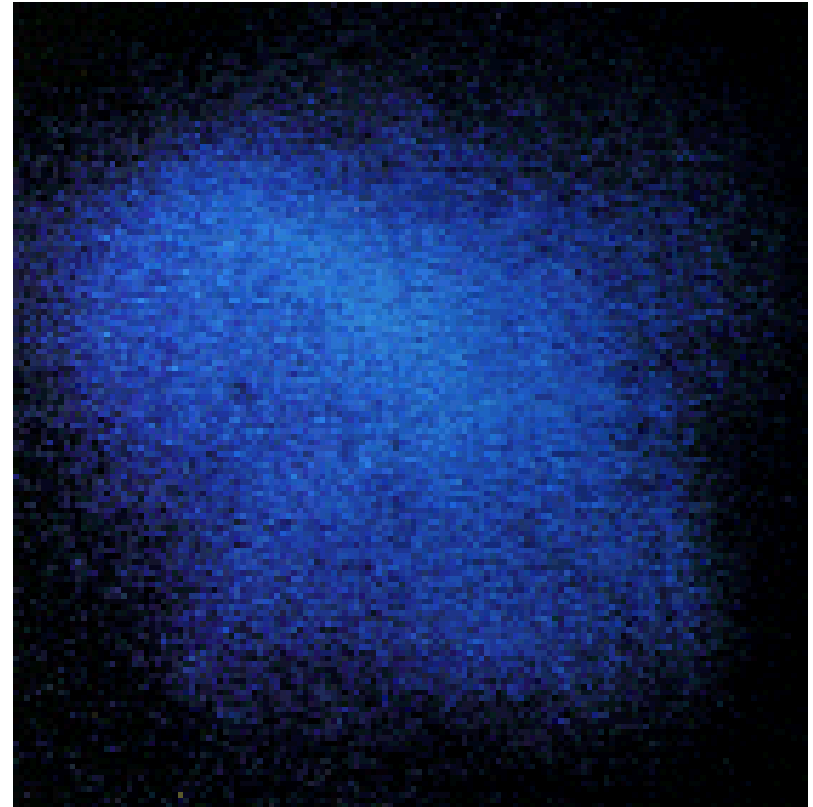


Vela Pulsar

Pulsare im Röntgenlicht



Pulsar an



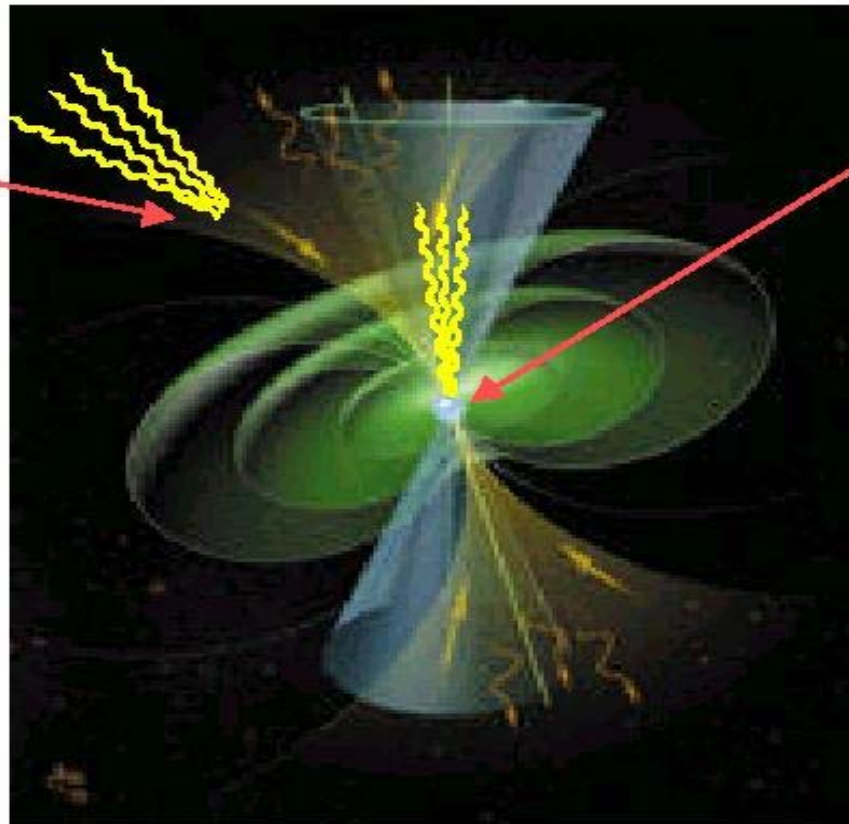
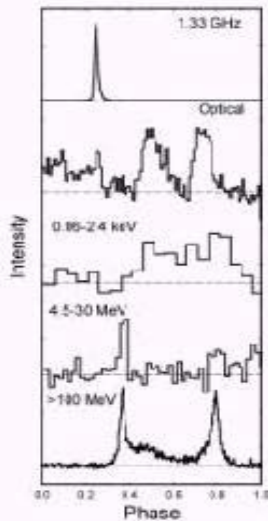
Pulsar aus

Pulsar Modelle

Outer Gap
Emission: multi- λ
lightcurves

out of phase

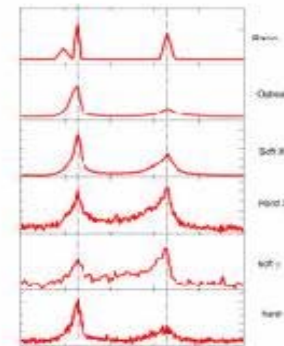
Prototype: Vela



Polar Cap Emission:
multi- λ lightcurves

in phase

Prototype: Crab



for $B \sim B_{\text{crit}}$

photon splitting

$\gamma \rightarrow \gamma\gamma$

(PSR B1509-58)

DESY Zeuthen, Juni 2001

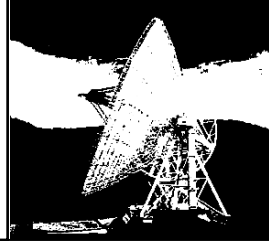
Frequenz, Intensität und Ausdehnung d. EM- Kaskaden bestimmen Pulsprofile, Pulsspektren und Strahlbreite
man schließt daraus auf Größe und Geometrie plasmafreier Lücken (Gaps) in verschied. Modellen



Pulsare & Binäre Schwarze Löcher

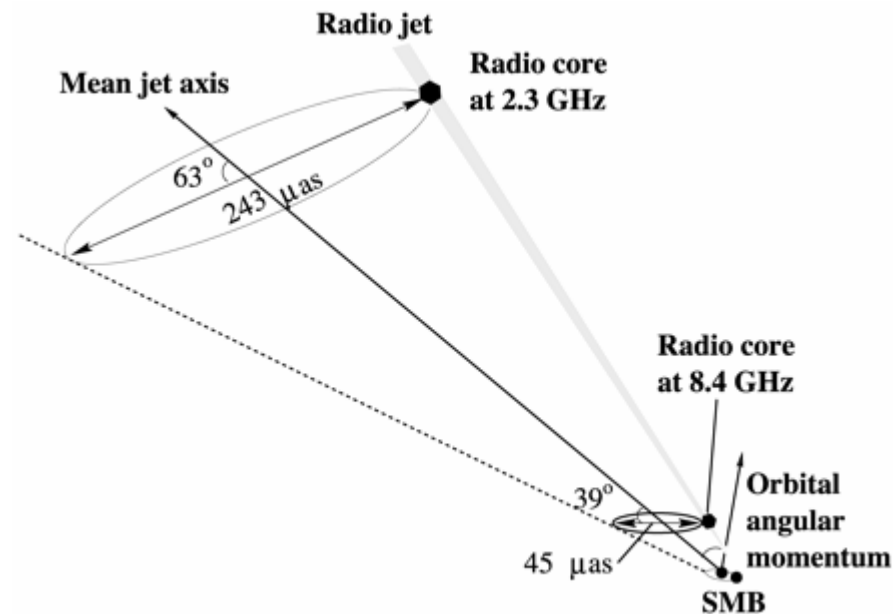
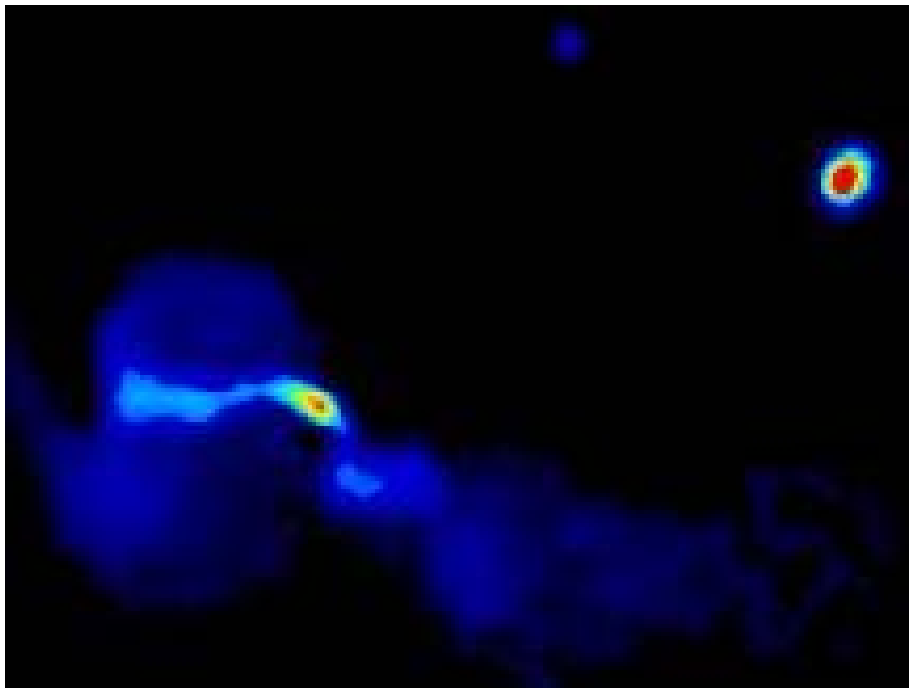
Binary Supermassive Black Holes

further evidence: VLBI phase-referencing

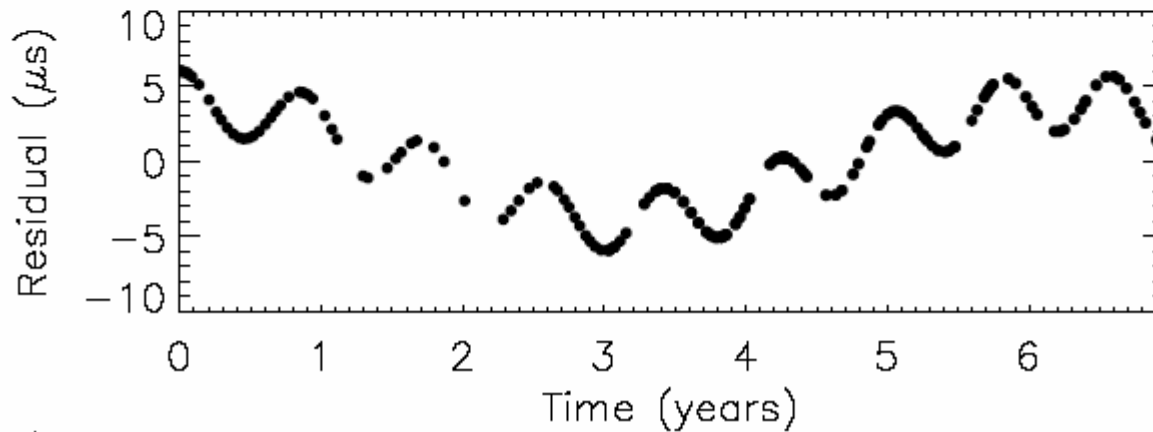
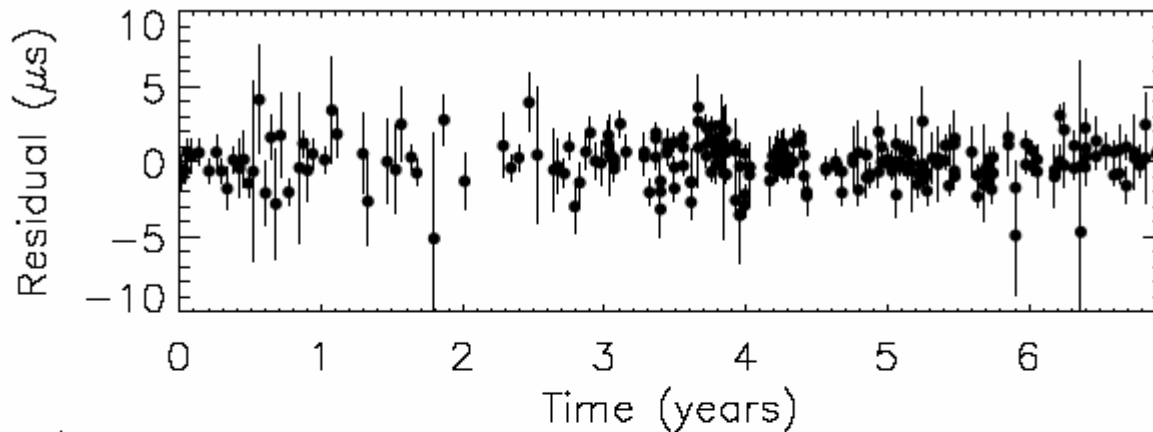


VLBI phase-referencing
observations
Radio Galaxy 3C 66B

The unresolved radio core shows well defined elliptical motions with a period of 1.05 ± 0.03 years, which provides a direct detection of an SMB



Pulsar-Messungen 3C66B

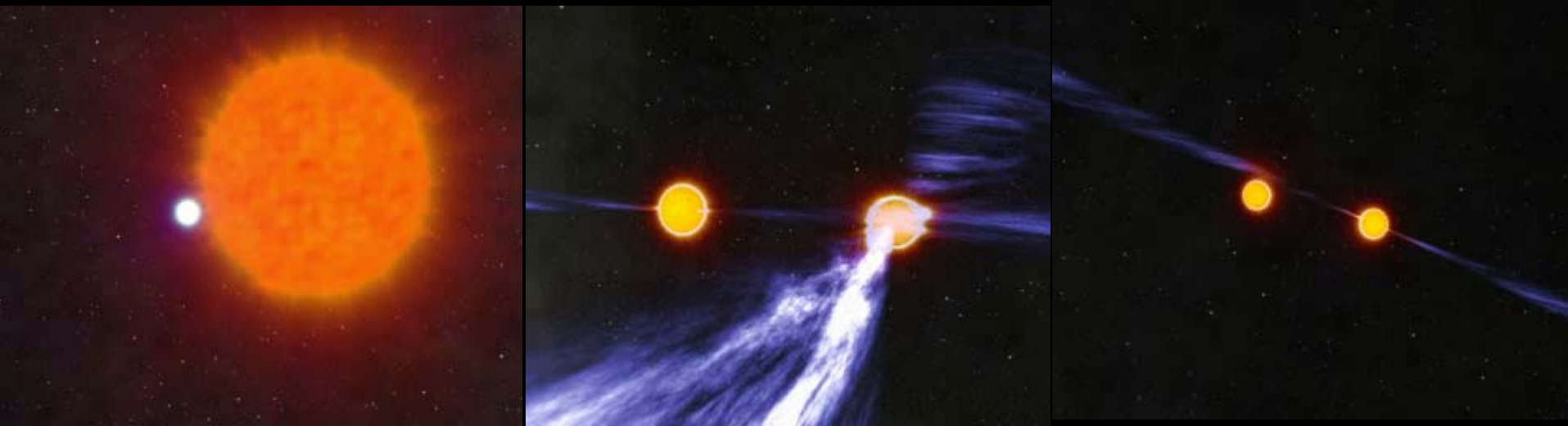


- Oben: Pulsar-Messungen
- Unten: Vorhersage für den Fall eines Binären Schwarzen Lochs



Doppel-Pulsare: Test der Relativitätstheorie

Doppel-Pulsare

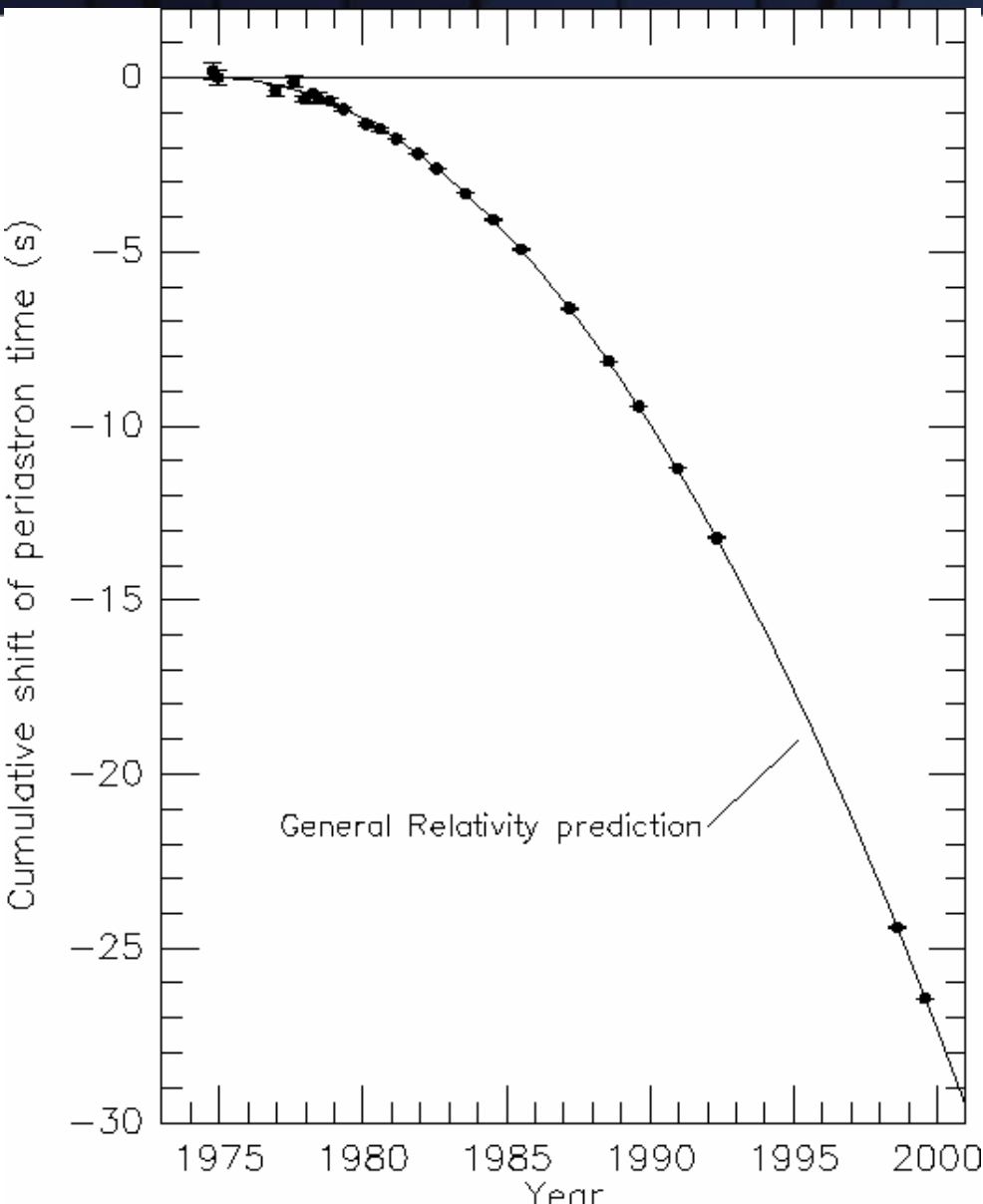


John Rowe Animation/Australia Telescope National Facility, CSIRO

J0737-3039

Hulse & Taylor 1974: erster Doppel Pulsar entdeckt

Test der Allgemeinen Relativitätstheorie



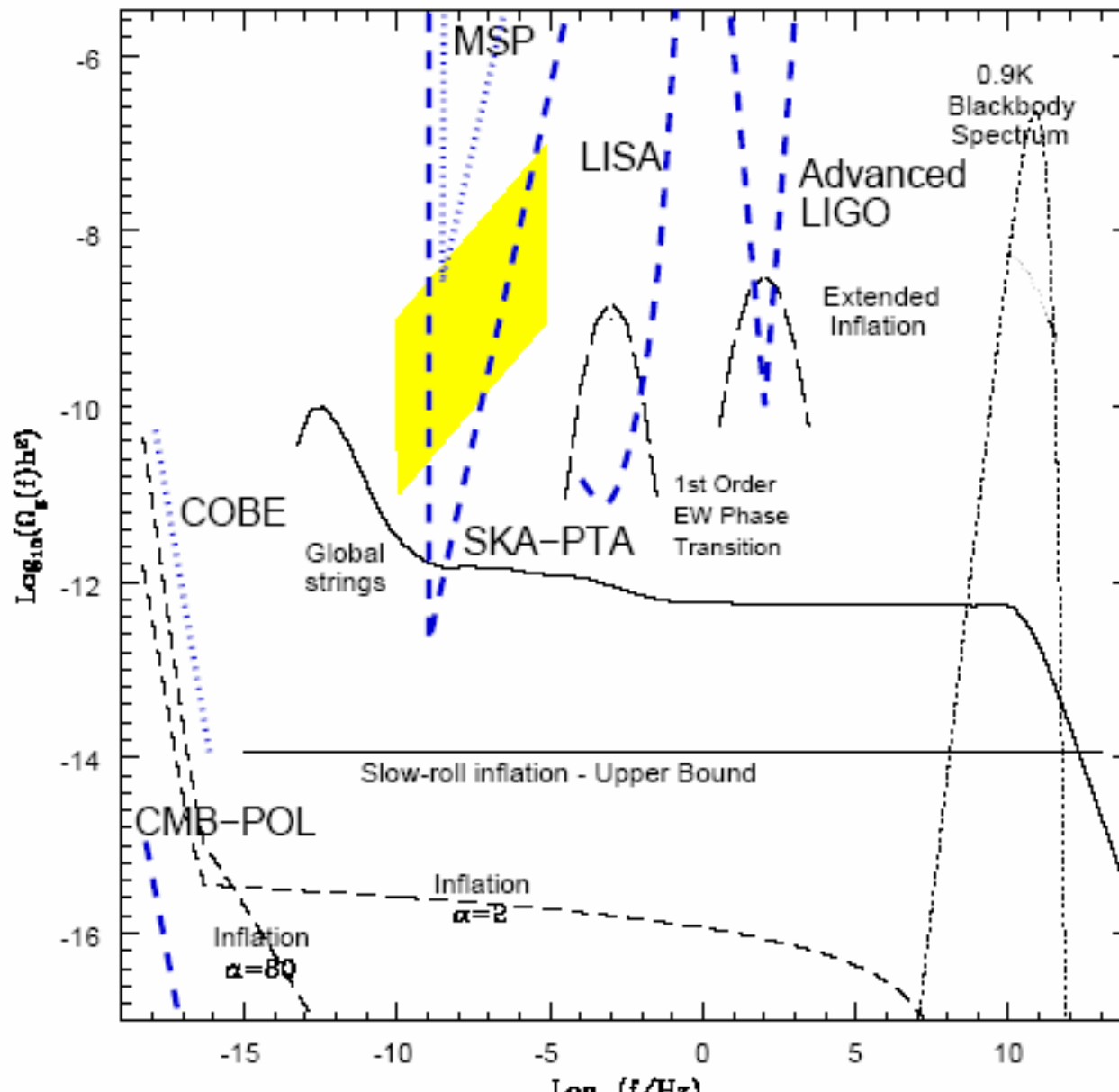
- 3.2 mm pro Orbit kleiner
- Zeitliche Basislinie: 30 Jahre
- Innerhalb von 0.2% der Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie
- Neuer Doppel-Pulsar
...

Pulsar Timing Array (PTA)



- Entfernte Millisekunden-Pulsare werden regelmäßig mit Radioteleskopen bei 1410 und 2380 MHz (17 Jahre längste „Überwachung“) beobachtet um eventuelle Störungen durch Gravitationswellen (lange Perioden: 10 Jahre) zu detektieren
 - Ziel: Untersuchung des Big Bang und die Bildung von Galaxien im frühen Universum, Merger
 - Bislang keine unerklärlichen Effekte

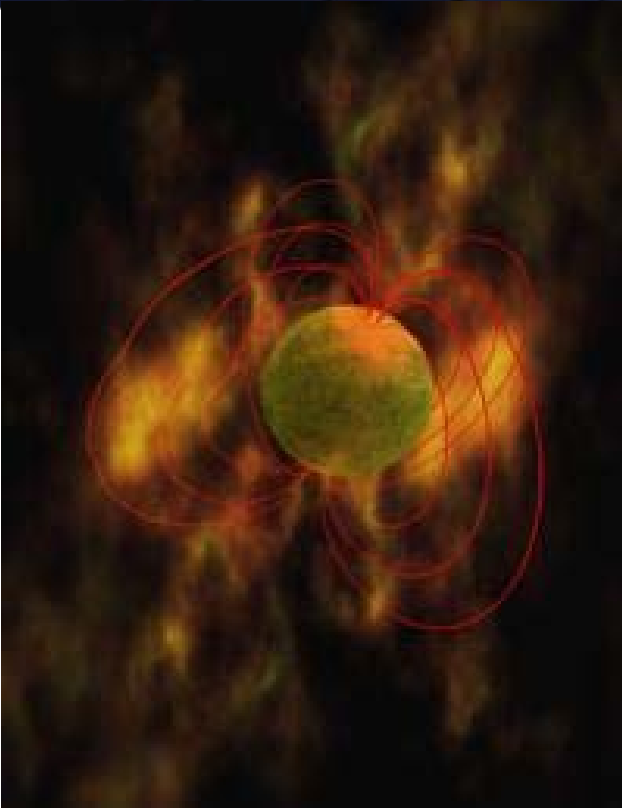
SKA-PTA





Teilzeit-Pulsar: RRTs

RRARs: Rotating Radio Transients

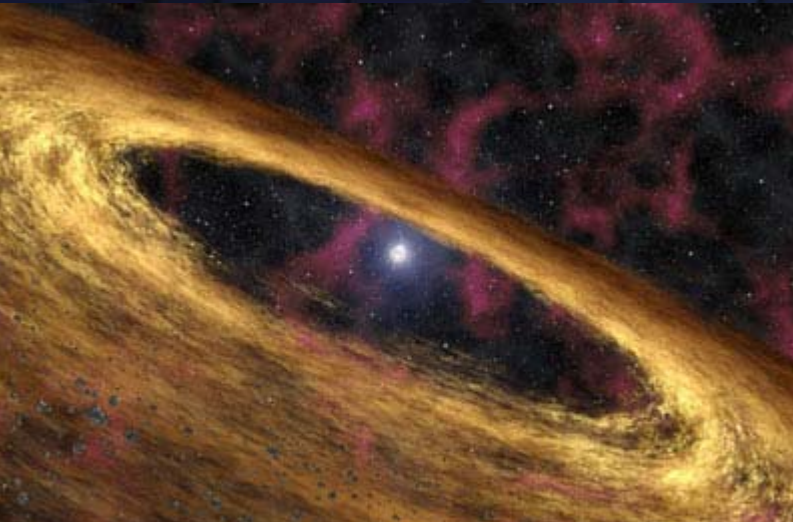


- Neue Klasse von Pulsaren: immer wieder gewaltige, aber kurze Radiopulse und sind ansonsten unsichtbar
- Innerhalb eines Tages für den Bruchteil einer Sekunde sichtbar
- 2-30 Millisekunden, zwischen den Ausbrüchen: 4 Minuten bis zu 3 Stunden
- Weder Röntgen- noch Gamma-Strahlung
- Grund: sehr starke Magnetfelder, Ähnlichkeit zu Magnetaren?



Pulsare & Planeten

Pulsare formen Planeten



- 1991: erstes planetarisches System gefunden – um einen Millisekunden-Pulsar
- Wie hat sich dieses Planetensystem gebildet (vor oder nach dem Pulsar)?

Host star	Distance (light-years)	Mass (Earth=1)	Semi-major axis (AU)	Period	Eccentricity
<u>PSR 1257+12</u>	1,000	0.015	0.19	25.3 d	0.0
		3.4	0.36	66.5 d	0.02
		2.8	0.47	98.2 d	0.03
		~100	~40	~170 y	-
<u>PSR B1620-26</u>	12,400	?	~38	~100 y	-



Pulsar-Daten

Kurze Zusammenfassung

Daten zu Pulsaren



- Neutronensterne, ca. 1.4-1.8 Sonnenmasse
- Magnetfeld zw. 10^9 und 10^{14} Gauss
- Entstehen vermutlich in Supernova-Explosion Typ II
- Strahlen vorwiegend im Radiobereich (höchste Empfindlichkeit bei 1.4 GHz)
- Perioden (P) der Rotation variieren zw. 1.557 ms (642 Hz) und 8.5 s (0.12 Hz)
- Mit der Rotation verlieren die Pulsare Energie und die Rate der Rotation vermindert sich
- Verschiedene Arten von Pulsaren
 - Normale Pulsare mit $P > 20$ ms und $dP/dt > 10^{-18}$
 - Millisekunden Pulsare (Pulsar Recycling) mit $P < 20$ ms und $dP/dt < 10^{-18}$
- Der erste Millisekunden-Pulsar wurde 1982 detektiert
- Mehr als 100 Mio Neutronensterne in der Milchstraße

Daten zu Pulsaren



- Entdeckung des Vela Pulsars: Assoziation Pulsar – Supernova
- Unterstützt durch Pulsar-Entdeckung in Krebs-Supernova Überrest; Assoziation (Radio) Pulsare mit rotierenden Neutronensternen; (dann auch im Röntgen und Gamma-Bereich detektiert)
- 5 normale Pulsare im Optischen
- 17 normale und 6 Millisekundenpulsare im Röntgen
- 7 normale Pulsare im Gamma-Bereich

Daten zu Pulsaren



- Doppel-Pulsar System: PSR B1913+16
- Zweites System: PSR J0737-3039?
- Mikrostruktur in den Pulsen: gigantische Nanosekunden-Pulse (2) im Krebs-Pulsar, Emissionsregion von der Größe 1m
- Mehr als 1700 Pulsare bekannt
- 80 binäre und Millisekunden-Pulsare assoziiert mit der Scheibe unserer Galaxie
- 103 Pulsare in 24 der galaktischen Kugelsternhaufen
- Integration über Oberflächendichte der Pulsare über die Galaxie, daraus: ~160000 aktive normale Pulsare und 40000 Millisekunden Pulsare in der Galaxis
- Typische Lebensdauer: 10^7 Jahre, galaktische Geburtsrate von ~1 pro 60 Jahre – konsistent mit der Rate der Supernovae
- Millisekunden-Pulsare sind wesentlich älter, mittlere Geburtsrate von 1 pro 345 000 Jahre

Noch Fragen ...



Grundlegende Fragen noch ungeklärt,

- z.B. das eigentliche Entstehen der Radiostrahlung
- Unerwarteter Verlauf des Spektrums nach Aufnahme von 7mm- und 3mm- Linie
(Strahlung entsteht nahe der Pulsaroberfläche)
- Bislang noch kein Pulsar gefunden im Orbit um ein Schwarzes Loch als Begleiter
- *Polar Cap* und *Outer Gap Modell* werden derzeit untersucht (TeV- Emissionen)
- Gravitationswellennachweis durch Beobachtung von Pulsaren?

...in zwei Wochen



Themen
& Daten

- 05.05 Einführung & Übersicht
- 12.05. Radioteleskope & Radiobilder
- 26.05. Der Radiohimmel im Licht der 21cm-Linie
- 09.06. Maser, das Interstellare Medium & Merger
- 23.06. AGN & Binäre Schwarze Löcher (NEUES!)
- 07.07. Pulsar-Astronomie (heute & in Zukunft)
- **21.07. Quanten der Raumzeit**