

PULSARS

A LABORATORY IN SPACE

Tobias Beuchert

(Astro-)teilchen Seminar SS2011 am ECAP

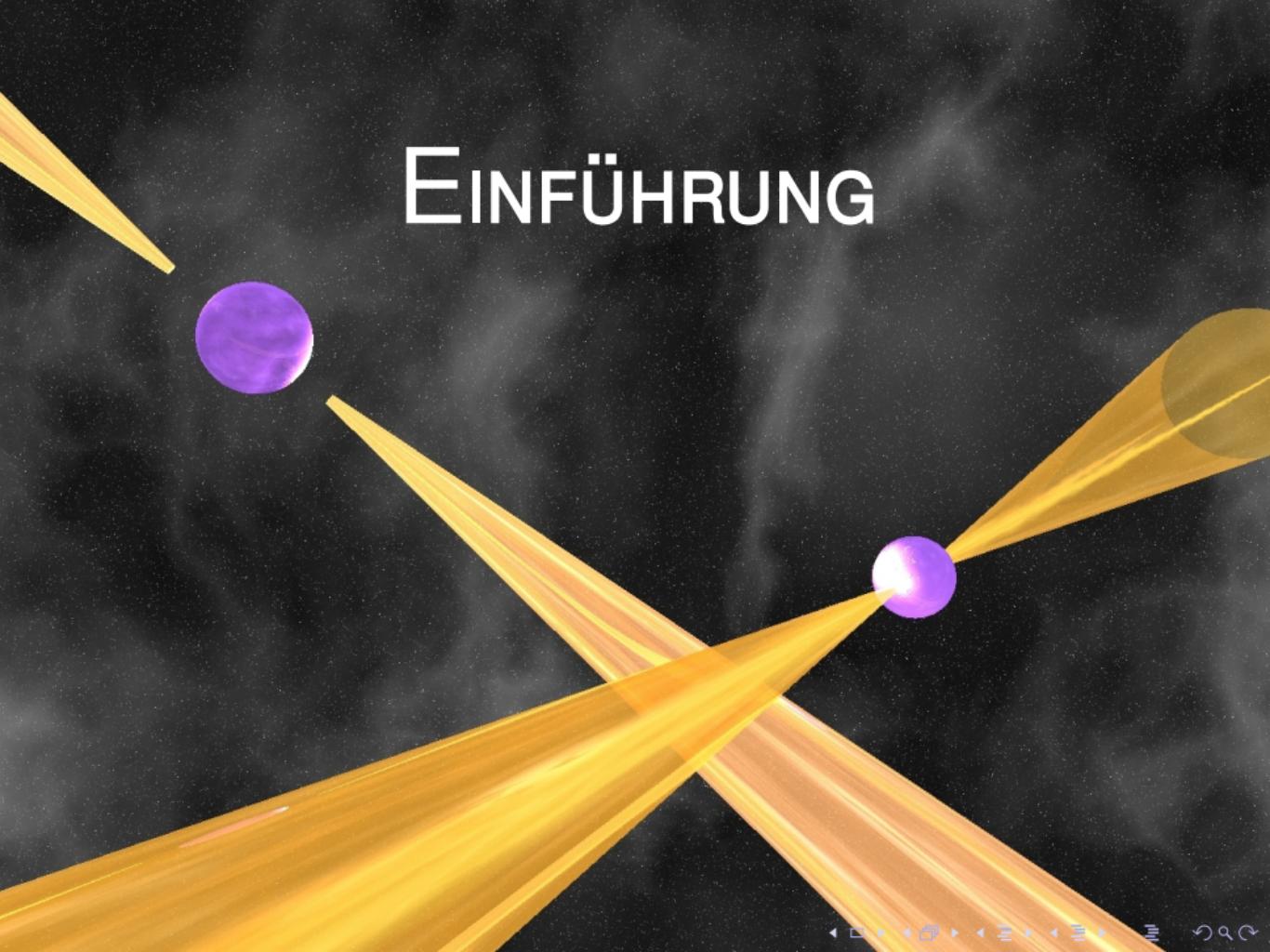
Dr. Remeis Sternwarte Bamberg, Uni Erlangen-Nürnberg

27th June 2011

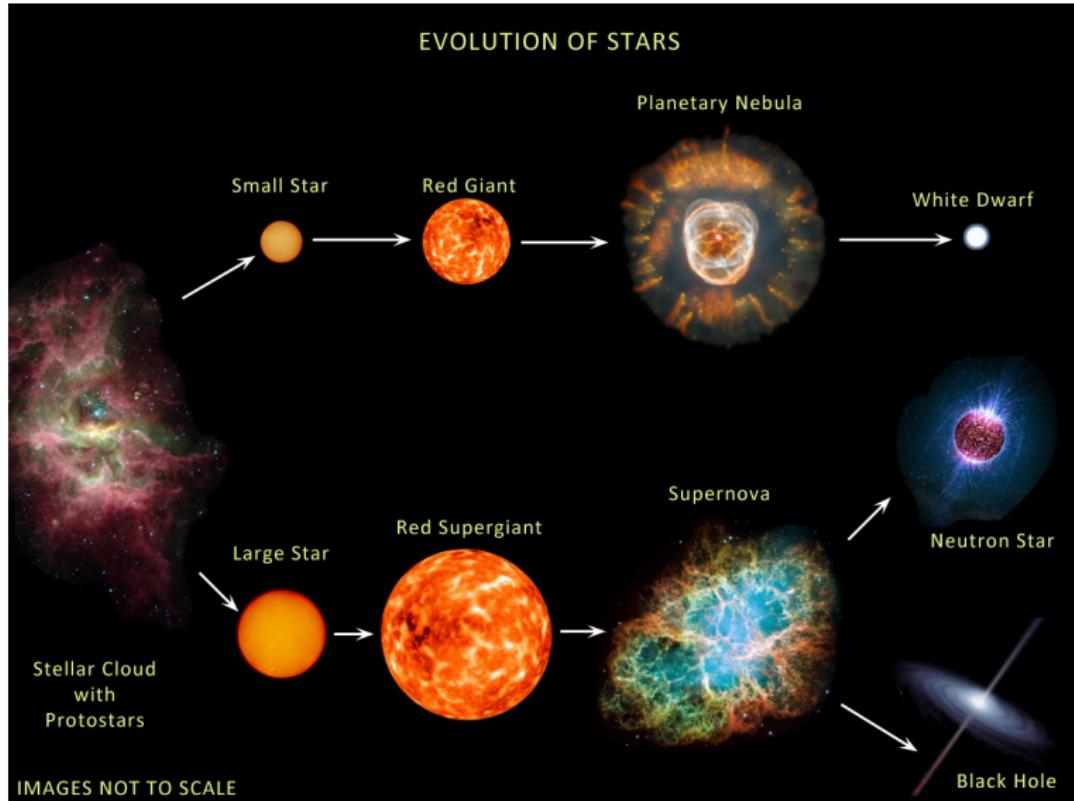
INHALT

- Einführung
- Theorie normaler Pulsare
- Theorie akkretierender
Pulsarsysteme
- “Pulsar Timing”
- (add on: Radio Frequenz Interferenz)

EINFÜHRUNG



SUPERNOVAE



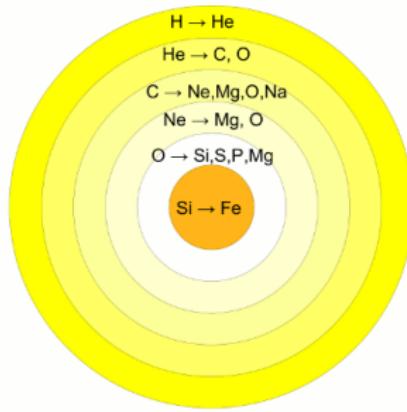
SUPERNOVAE

Supernovae induziert durch Akkretion (SN Ia)

- ▶ $6 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$
- ▶ Schalenbrennen bis Mg,Ne \Rightarrow Weißer Zwerg (WD)
- ▶ Akkretion auf WD von Begleitstern
- ▶ \Rightarrow Neutronenstern (NS) für $M > 1.44 M_{\odot}$
(e^- Entartungsdruck \downarrow)
- ▶ \Rightarrow NS

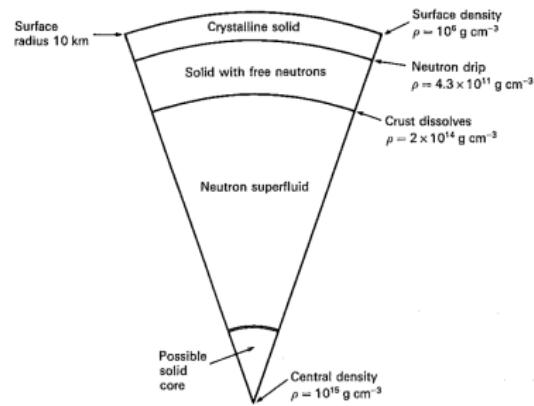
Supernovae durch stellaren Kollaps (SN II)

- ▶ $M > 8 M_{\odot}$
- ▶ T höher \rightarrow Schalenbrennen bis Fe
- ▶ Fusion im Kern stoppt \rightarrow
 $p_{\text{grav}} > p_{\text{entart}}$
- ▶ NS/Pulsar, BH



AUFBAU

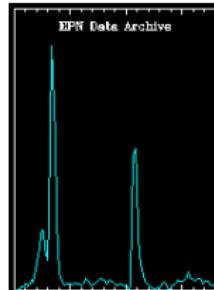
- ▶ **Neutronisation** $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- ▶ Magnetohydrodynamik: **Dynamoeffekt** (Konvektion, Rotation)
- ▶ Konservierung des magnetischen Flusses
→ stärkeres B-Feld)
- ▶ ABER: B-Felder Ausgangsstern - Pulsar unkorreliert
- ▶ Feldstärken: $10^8 - 10^{12}$ Gauss
- ▶ Aufbau: Kruste - suprafluider Teil (n, p) + e^- - zentraler Kern



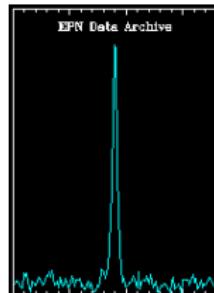
Lyne & Smith, *Pulsar Astronomy*

EMISSION

- ▶ konusförmige Abstrahlung
- ▶ Emissionsmechanismen? → später



Crab, 33 ms

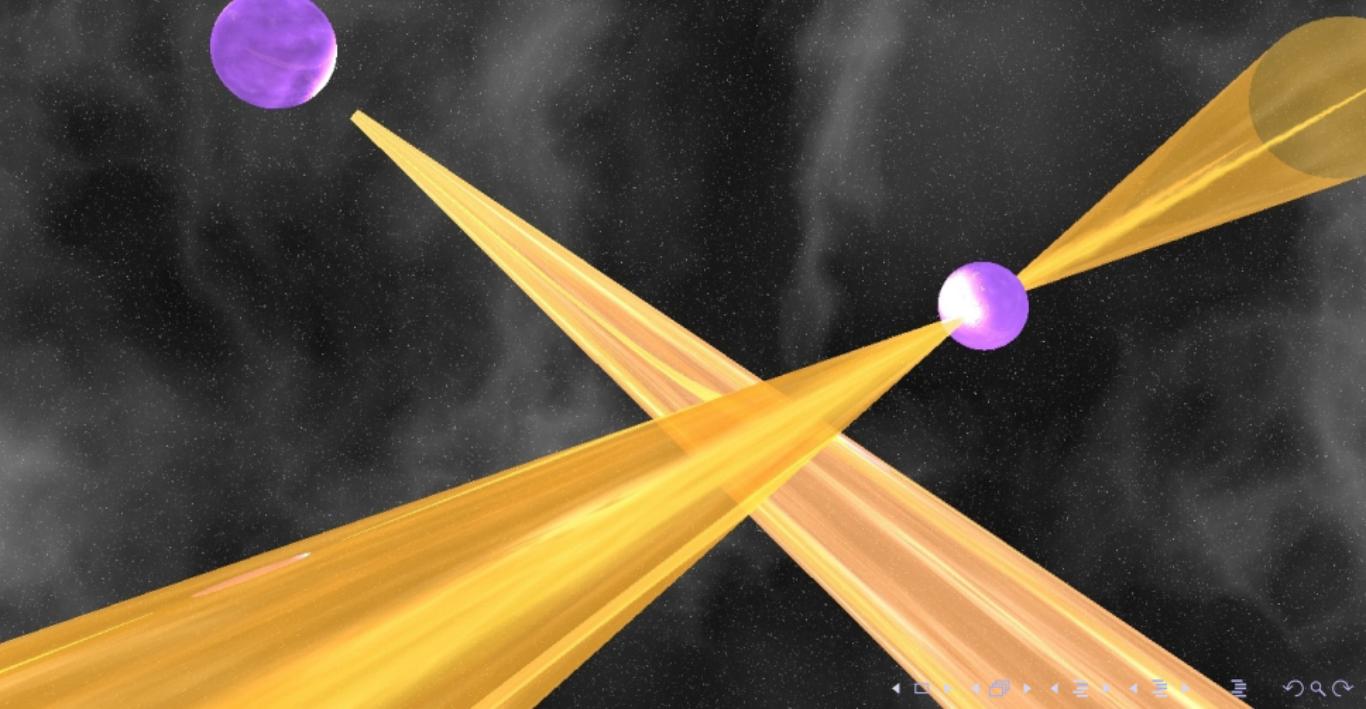


Vela, 89 ms

stop

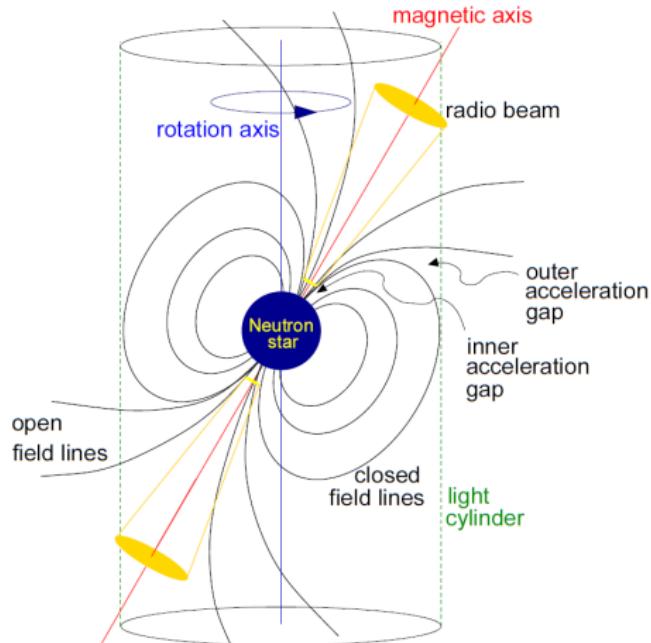
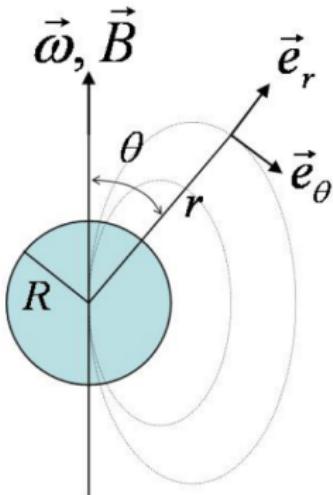
⁰<http://www.jb.man.ac.uk/~mkramer/Animations.html>,
<http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/Education/Sounds/index.html>

THEORIE “NORMALER” PULSARE



“COSMIC LIGHTHOUSE”

- ▶ bipolares B-Feld, $\mathbf{m} \nparallel \boldsymbol{\omega}$
- ▶ **light cylinder** mit $R_{LC} = cP/2\pi \Rightarrow$
Grenze mitrotierenden Plasmas
- ▶ **inner-/ outer acceleration gaps**
Emissionsquellen



Kramer, *The Double Pulsar*, 2006

ELEKTRODYNAMIK

- Analogie zu elektrischem Dipol - **Multipolentwicklung**

$$\phi(\mathbf{r}) = \phi_{\text{Monopol}} + \phi_{\text{Dipol}} + \dots$$

$$\phi_{\text{Monopol}} = Q/r \text{ und } \phi_{\text{Dipol}} = \mathbf{rd}/r^3$$

- $E = -\nabla\phi_{\text{Dipol}} = 2d/r^3$, analog $B_0 \sim 2m/R^3$ für $\mathbf{r} = \mathbf{R}$, $\theta = 0$

- $\mathbf{d} \rightarrow \mathbf{m}$

- Lamour Formel für Abstrahlung eines rotierenden magn. Dipols $P = \frac{2}{3} \frac{|\ddot{\mathbf{m}}|^2}{c^3}$

- $|\ddot{\mathbf{m}}| = \omega^2 |\mathbf{m}| \sin \alpha$ und $B = 2m/r^3$ einsetzen

- $P = \dot{E}(B) = -\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = \frac{\omega^4 r^6 B^2 \sin \alpha^2}{6c^3}$

Ebenfalls gültig:

- "Spin Down Luminosity:" $\dot{E} = -\frac{d}{dt} E_{\text{rot}} = -\frac{d}{dt} \frac{1}{2} I \omega^2 = -I \omega \dot{\omega} = 4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3} \Rightarrow \dot{E} \sim \frac{\dot{P}}{P^3}$

- mit oben gleichsetzen: $B(r = R) = \sqrt{\frac{3c^3}{8\pi^2} \frac{I}{R^6 \sin \alpha^2} P \dot{P}} \approx 3.2 \cdot 10^{19} \text{ G} \cdot \sqrt{P \dot{P}}$

SPIN DOWN

- ▶ $\dot{E} = -l\omega\dot{\omega} = (2/3c^3)m^2\omega^4 \sin\alpha^2$ mit $\omega = 2\pi/P$ oder $\nu = 1/P$
- ▶ ⇒ Potenzgesetz $\dot{\nu} = -K\nu^n$ mit $K = \frac{2m^2 \sin\alpha^2}{3lc^3}$
- ▶ $n = 3 \Leftrightarrow$ nur Dipolstrahlung
- ▶ aus Messungen ⇒ "breaking index" $n = \frac{\nu_{ij}}{\nu^2}$

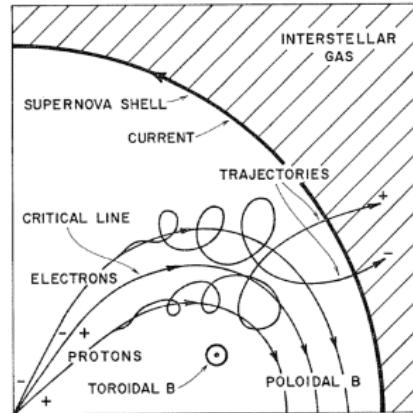
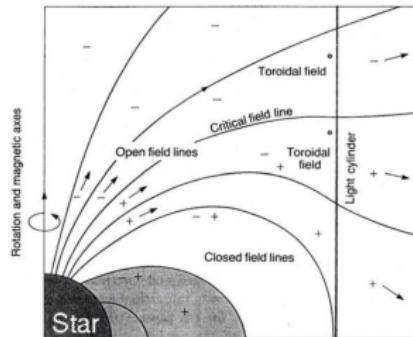
ALTERSBESTIMMUNG

- ▶ $\dot{\nu} = -K\nu^n \xrightarrow{P=1/\nu} \dot{P} = KP^{2-n} \xrightarrow{\int} T = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right] \xrightarrow{n=3} \tau_{\text{char}} = \frac{P}{2\dot{P}}$
- ▶ Annahme außen **Vakuum**, reine **Dipolstrahlung**
- ▶ oft **Reales, kinetisches Alter** (Messung) < **Charakteristisches Alter** (Soll)
- ▶ ⇒ Selektionseffekt: Beobachtbarkeit!

MAGNETOSPHÄRE - EXISTENZBEWEIS

GOLDREICH-JULIAN-MODELL $\omega \parallel m$

- ▶ bisher: außen Vakuum
- ▶ Freie Ladungen bei $r < R + \text{rot.}$
 B -Feld \Rightarrow Lorentzkraft \Rightarrow
Ladungsseparation \Rightarrow el.
Gegenfeld: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E}_{\text{ind}} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$
- ▶ $\mathbf{E}_{\text{ind}}|_{r < R} \Rightarrow \phi$ ($\mathbf{E}_{\text{ind}} = -\nabla\phi$)
- ▶ $\phi \stackrel{!}{=} \text{stetig bei } r = R \Rightarrow \mathbf{E}_{\text{ind}}|_{r > R}$
(Monopol + Quadrupol)
- ▶ $qE_{||,\text{ind}} = qE_{\text{ind}} B / |\mathbf{B}| \sim 10^{13} \cdot F_{\text{grav}}$
- ▶ \Rightarrow Magnetosphäre
- ▶ mitrotierendes Plasma: $\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \mathbf{r}$
- ▶ Bindung an innere Feldlinien über
 $\mathbf{vB} = 0$



EMISSIONSMECHANISMEN

NIEDERE ENERGIEN (RADIO)

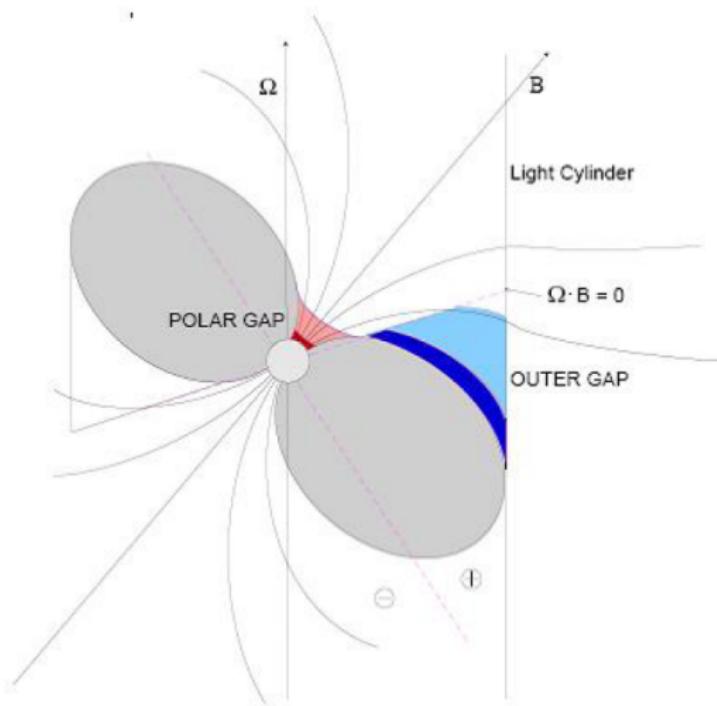
- ▶ $T_b \approx E/k_B \approx 10^{30} \text{ K}$
- ▶ ⇒ **kohärente Strahlung**, schmales Frequenzspektrum
- ▶ “antenna mechanism” (Strahlung beschleunigter Teilchenbündel)
- ▶ relativistische Plasmaemission
- ▶ MASER (**Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation**)
- ▶ Synchrotron, wenn emittierende Plasmabündel in Phase

HOHE ENERGIEN (RÖNTGEN, GAMMA)

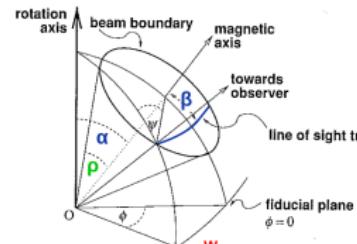
- ▶ $T_b \approx 10^{11} \text{ K}$
- ▶ ⇒ **inkohärente Strahlung**, breites Frequenzspektrum
- ▶ **polar/inner gaps:** inverse Compton Strahlung
- ▶ **outer gaps:** Teilchenbeschleunigung, Synchrotron/“curvature emission”, Paarerzeugung, Kaskaden
- ▶ breiterer Emissionskegel

⁰Ginzburg & Zhelezniakov (1975), Lorimer & Kramer (2005), Melrose & Gedalin (1999), Lyne & Graham-Smith (1998), Kolanosk (2005)

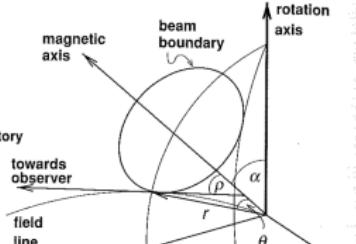
EMISSIONSMECHANISMEN



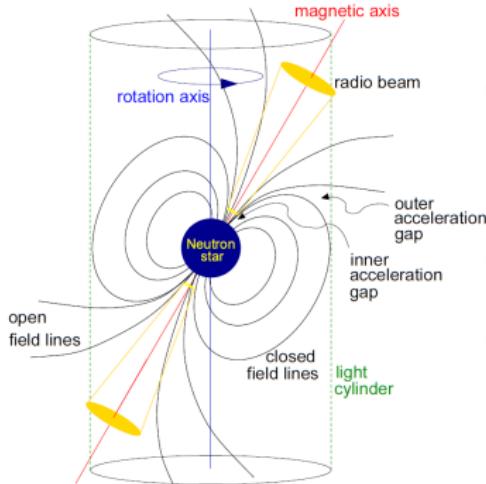
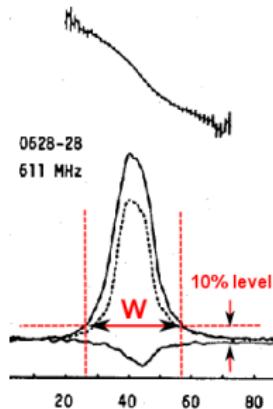
RADIO BEAM



(a)



(b)



► beobachtete Pulsbreite W :

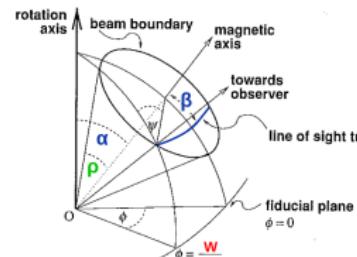
$$\sin \frac{W}{4} = \frac{\sin \rho/2^2 - \sin \beta/2^2}{\sin \alpha \cdot \sin \alpha + \beta}$$

► α, β aus Drehung des Polarisationswinkels Ψ :

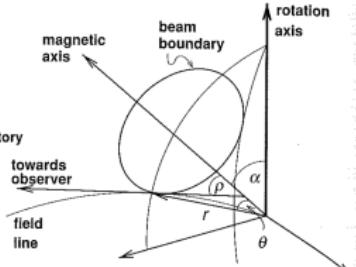
►

$$\tan \Psi - \Psi_0 = \frac{\sin \alpha \sin \Phi - \Phi_0}{\sin \alpha + \beta \cos \alpha - \cos \alpha + \beta \sin \alpha \cos \Phi - \Phi_0}$$

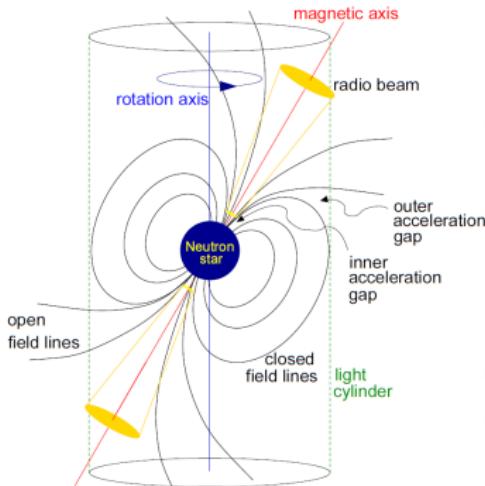
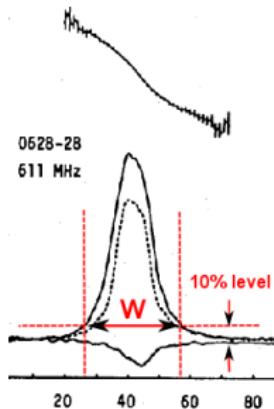
RADIO BEAM



(a)



(b)

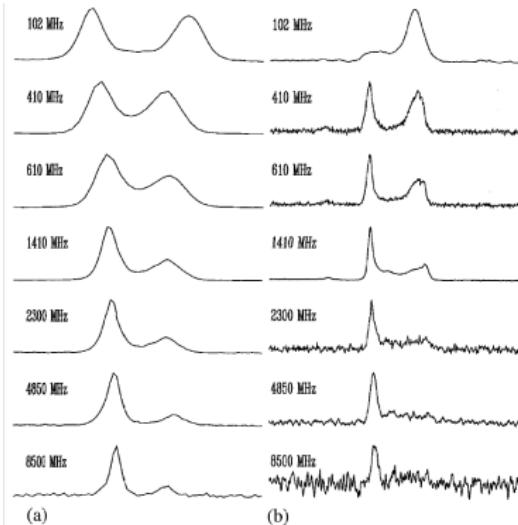


► Messung: $W, \alpha, \beta \Rightarrow \rho$

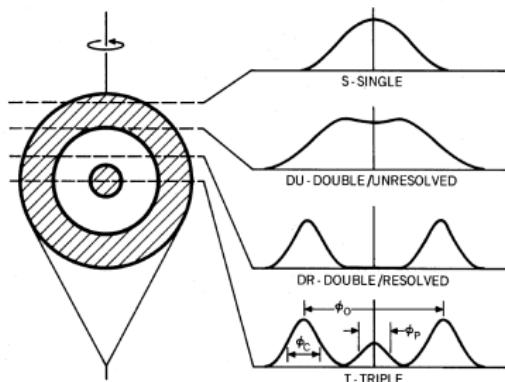
$$\rho \sim \sqrt{r_{\text{em}}} \frac{1}{\sqrt{P}} \quad R_{\text{LC}} = c \frac{P}{2\pi} \Rightarrow \rho \sim \left(\frac{r_{\text{em}}}{R_{\text{LC}}} \right)^{1/2}$$

- $\rho \uparrow, P \downarrow$ für $r_{\text{em}} = \text{const}$
- $\rho \uparrow, r_{\text{em}} \uparrow$ für $P = \text{const}$

RADIO BEAM

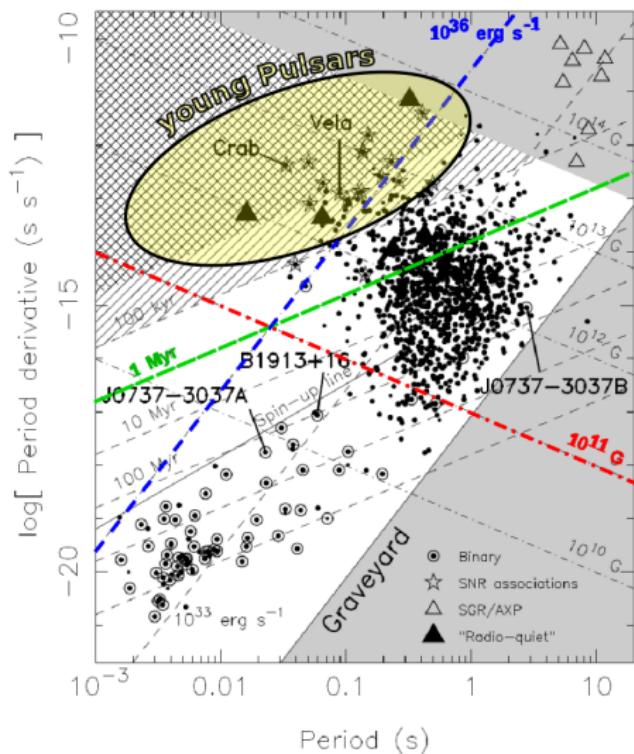


- ▶ Peakabstand \uparrow , beobachtete Pulsbreite $W \uparrow \Leftrightarrow p \uparrow \Leftrightarrow r_{\text{em}} \uparrow$



- ▶ Doppelhöckerstruktur (“**hollow-beam-model**”)
- ▶ Beobachtungsfrequenz $\downarrow \Rightarrow$ Peakabstand \uparrow

$P - \dot{P}$ -DIAGRAMM



$$\tau_{\text{char}} = \frac{P}{2\dot{P}}$$

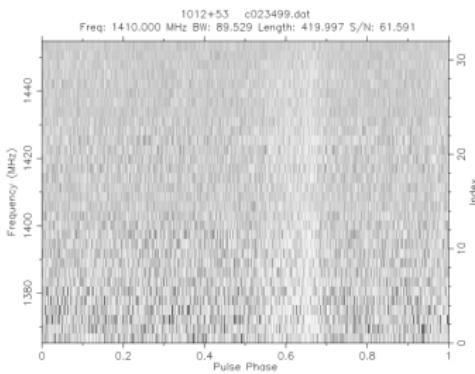
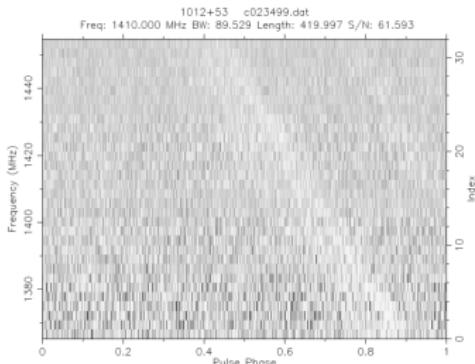
$$\dot{E} \sim \frac{\dot{P}}{P^3}$$

$$B(r=R) \approx 3.2 \cdot 10^{19} \text{ G} \cdot \sqrt{P\dot{P}}$$

- ▶ Alterungsprozess entlang $P\dot{P} \approx \text{const.}$
- ▶ Test:
 $\dot{P}\dot{P} = \frac{1}{v} \left(\frac{1}{v} \right) = \text{const} \Rightarrow \dot{v} = -Kv^3$
Achtung: log-log plot \Rightarrow Gerade
- ▶ "Graveyard": Detektionslimit

BEOBACHTUNG VON RADIO PULSAREN

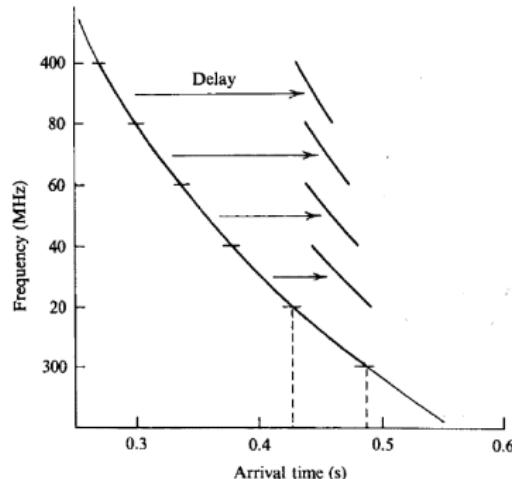
DE-DISPERSION



- ▶ Pulse bei höheren Frequenzen kommen früher an
- ▶ Verzögerung durch Elektronendichte = $DM \nu^{-1}$

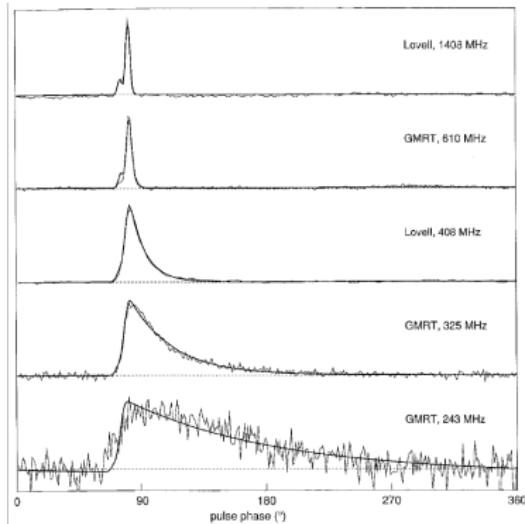
▶

$$DM = \int_0^d n_e dl$$



BEOBACHTUNG VON RADIO PULSAREN

PULS STREUUNG



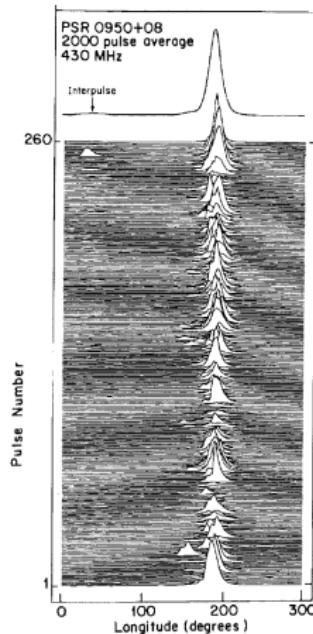
- ▶ Zeitliche Dehnung \sim DM
- ▶ stärkere Streuung bei höheren Frequenzen

SZINTILLATION

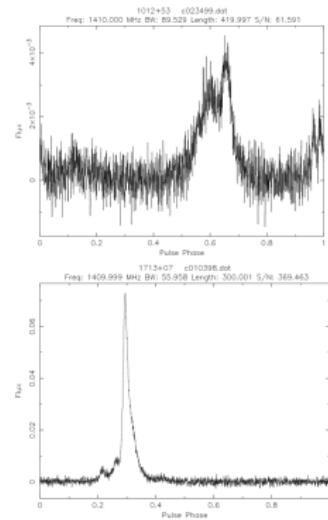
- ▶ Unregelmäßigkeiten und Turbulenzen in ISM
- ▶ \Rightarrow Ungerademäßige Einzelprofile

BEOBSCHTUNG VON RADIO PULSAREN

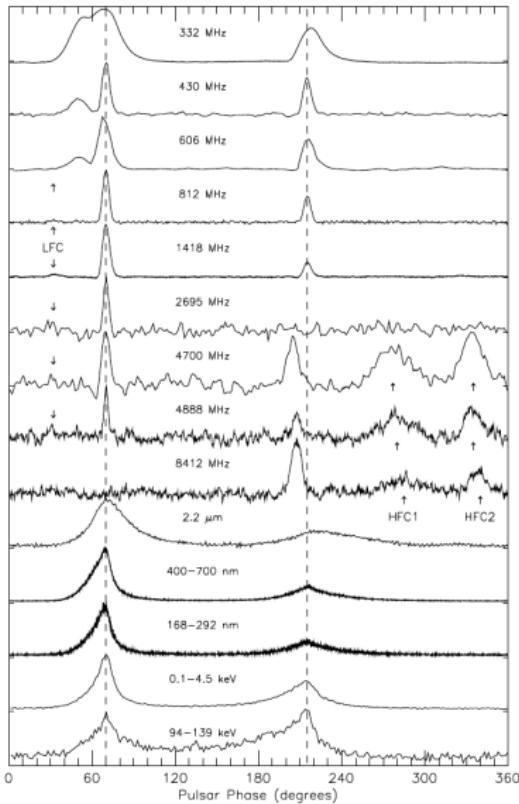
INTEGRIERTE PULSPROFILE



- Falten vieler Einzelpulse \Rightarrow **integriertes Pulsprofil / template profile**
- charakteristisch für einen Pulsar

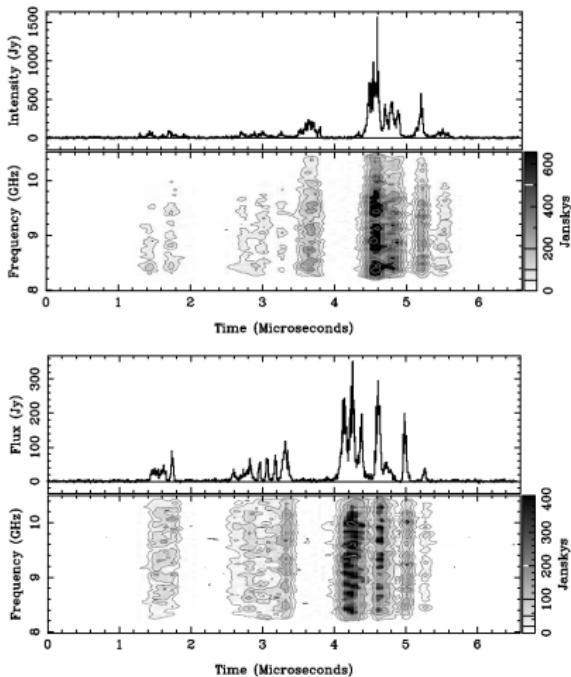


CRAB



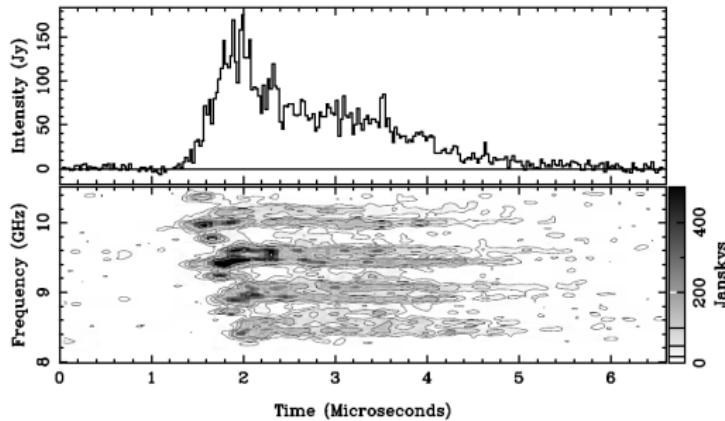
- ▶ Breitbandemission (Radio → Gamma)
- ▶ **main pulse** und **interpulse**
- ▶ Periode: 33 ms
- ▶ 0.4 ns-Zeitauflösung mit Arecibo
- ▶ Interpulse teils versetzt
- ▶ ⇒ warum?

CRAB - MAIN PULSE (MP)



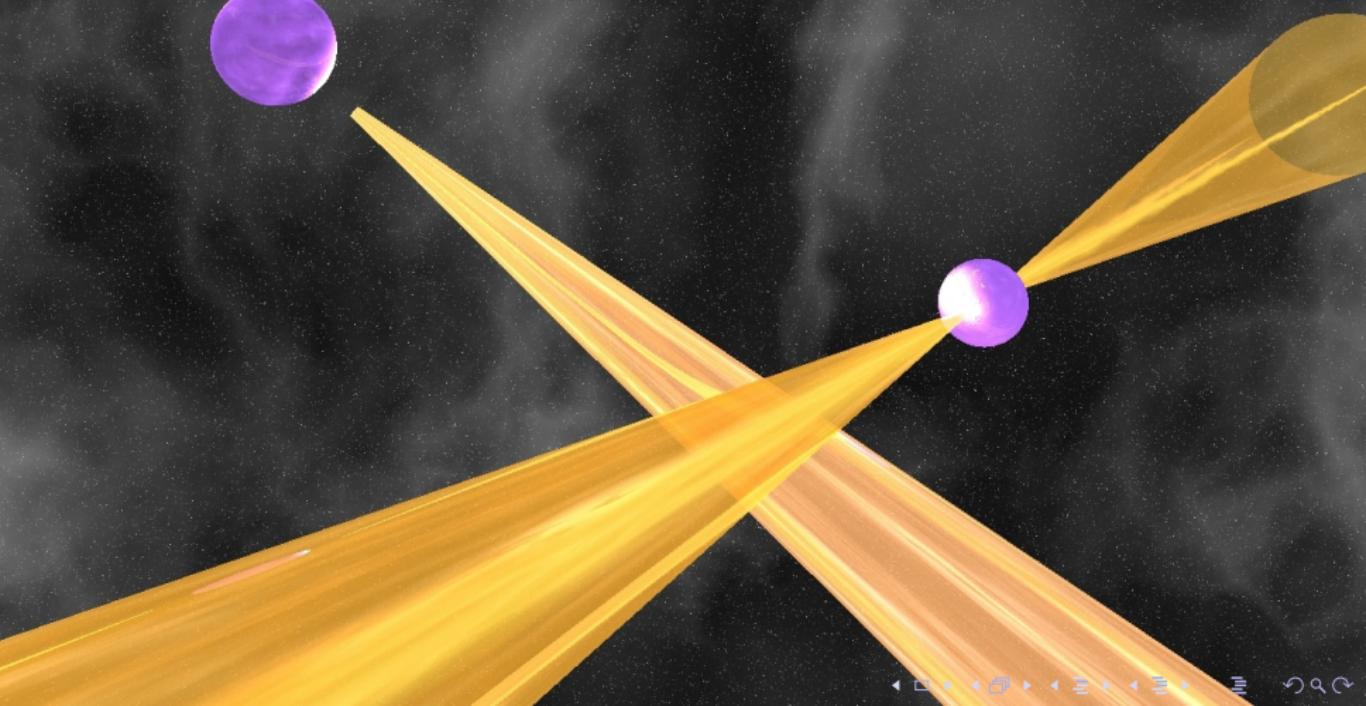
- ▶ Dispersion korrigiert
- ▶ Substruktur \Rightarrow "microbursts", "nanoshots"
- ▶ Welcher Emissionsmechanismus (Radio)?
- ▶ Lösung hier: unstetiger Plasmafluss im Konus \Rightarrow **starke Plasmaturbulenzen, SPT**
- ▶ Pulse im ns-Bereich \Rightarrow Emissionsregionen $< 1 \text{ m}$

CRAB - INTERPULSE (IP)

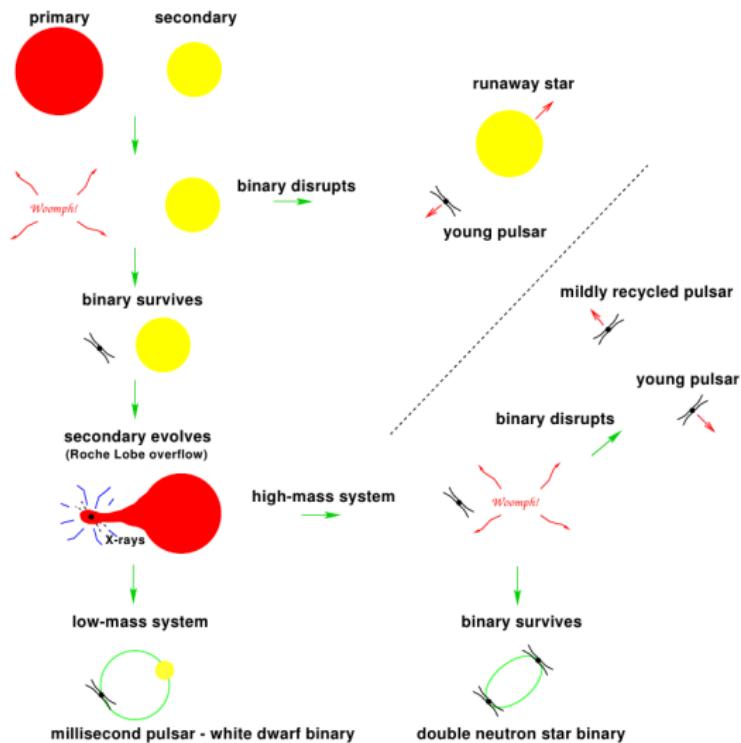


- ▶ Dispersion Measure (DM) vom MP reicht nicht (zusätzliche Dispersion)
 - ▶ stärker polarisiert als MP
 - ▶ dynamisches Spektrum
- ⇒ Unterschiedliche Emissionsregionen für MP und IP!?

BINÄRSYSTEME - MILLISEKUNDEN PULSARE



BINÄRSYSTEME



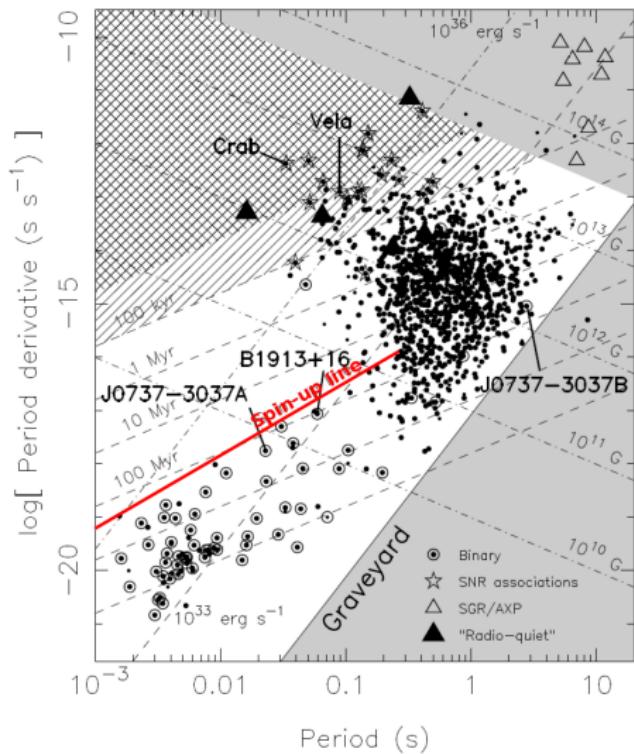
- ▶ Binärsysteme in Unterzahl
- ▶ “runaway stars”
- ▶ High Mass X-ray Binary (HMXB)
- ▶ Low Mass X-ray Binary (LMXB)

BINÄRSYSTEME

- ▶ **spin-up**
Massenakkretion ⇒
Drehimpulsübertrag auf
Pulsar
- ▶ Beschleunigung

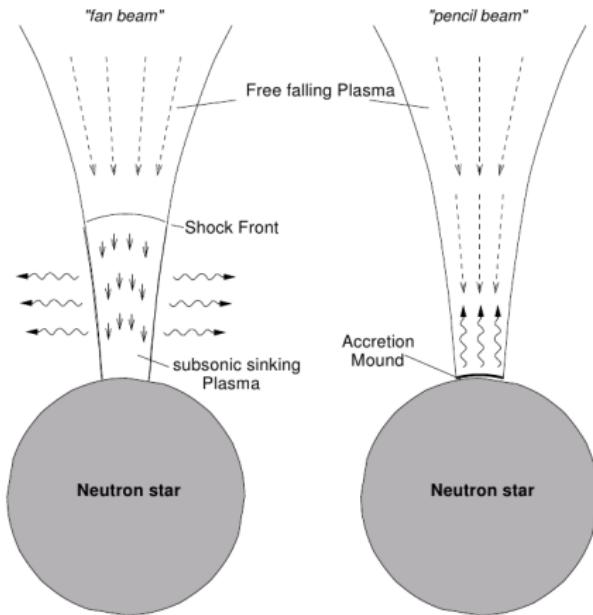
Beispiel für HMXB mit Endstadium:
Pulsar-Binärsystem
(Credit: John Rowe Animation/Australia
Telescope National Facility, CSIRO)

BINÄRSYSTEME



- ▶ **spin-up**
Massenakkretion ⇒
Drehimpulsübertrag auf Pulsar
- ▶ Beschleunigung
- ▶ Limit des spin-up: Akkretionsdruck
= Strahlungsdruck durch
Dipolstrahlung (groß für P ↓)

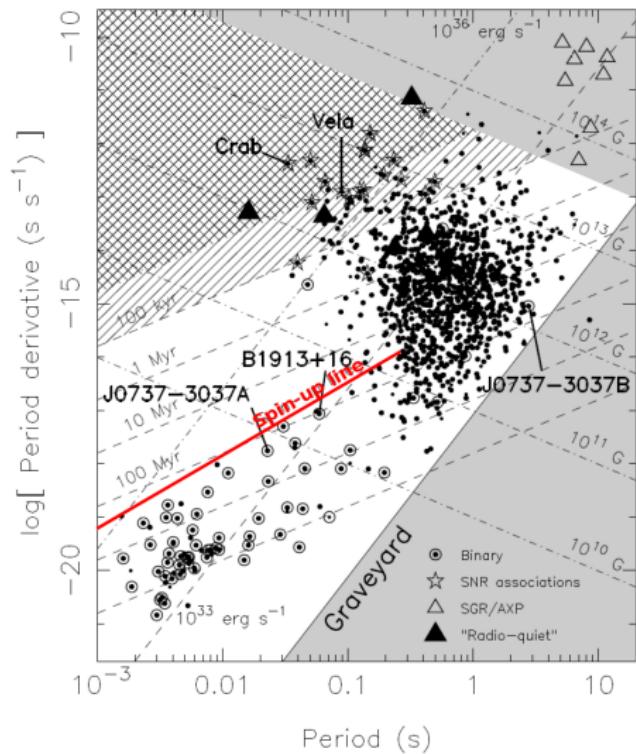
BINÄRSYSTEME



- ▶ akkretiertes Gas \Rightarrow Strahlungsdruck
- ▶ **links:** hohe Akkretionsrate $\dot{M} \Rightarrow$ Schockfront \Rightarrow Aufheizen
- ▶ sinkendes heißes Gas \Rightarrow Röntgenstrahlung
- ▶ \Rightarrow **breiter Röntgenbeam**
- ▶ **rechts:** kleine Akkretionsrate $\dot{M} \Rightarrow$ keine Schockfront
- ▶ Röntgenstrahlung aus Säule
- ▶ \Rightarrow **schmaler Röntgenbeam**

- ▶ Radiostrahlung durch akkretiertes Gas unterdrückt!!

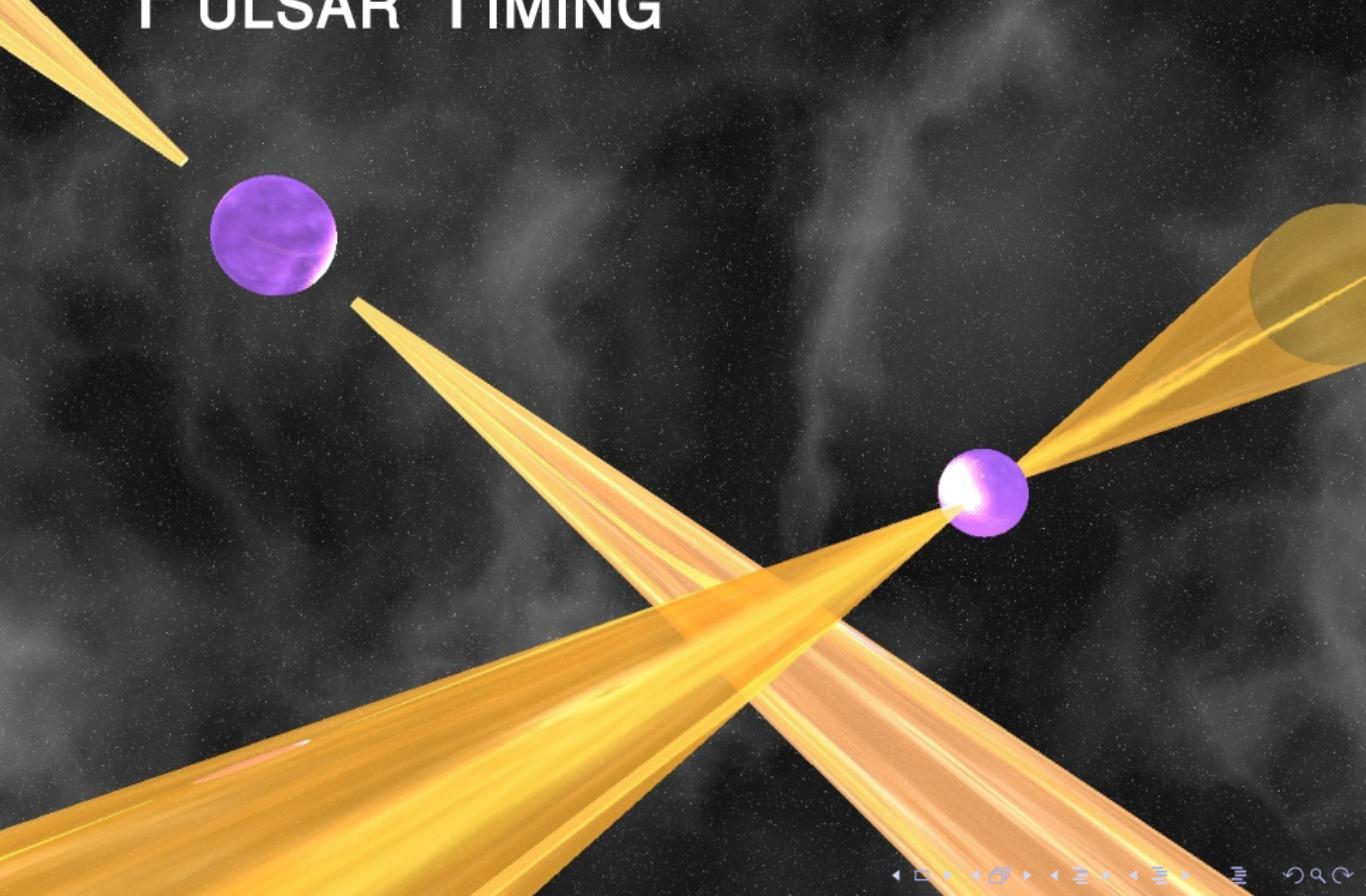
BINÄRSYSTEME



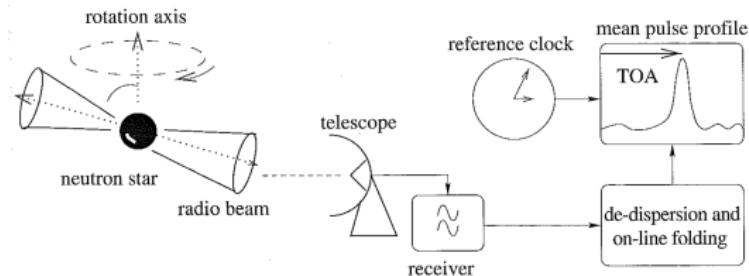
B-Feld ↓ während spin-up

- ▶ Akkretion ⇒ Aufheizen
- ▶ Leitfähigkeit ↓
- ▶ B-Feld ↓

PULSAR TIMING



ALLGEMEINES



- ▶ de-dispersion
- ▶ reduzieren von **Radio Frequenz Interferenz** (RFI) \Rightarrow **IRIDIUM** (66 US-Satelliten, Satphone)
- ▶ Fusionieren aller Frequenzen
- ▶ Faltung aller Pulse zu “template” Profil
- ▶ **Times Of Arrivals** (TOAs) über Kreuzkorrelation des template-Profil mit je ca. 100 integrierten Einzelpulsen
- ▶ Genauigkeit der TOAs

$$\sigma_{\text{TOA}} \sim \frac{W}{\text{S/N}} \sim \frac{1}{N_{\text{pulses}}}$$

NORMALE PULSARE

- ▶ Taylor Entwicklung Pulsarfrequenz

$$\nu(t) = \nu_0 + \dot{\nu}_0(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{\nu}_0(t - t_0)^2 + \dots$$

Erinnerung: $\dot{\nu} = -K\nu^n$, ohne $\ddot{\nu}$!!

- ▶ Puls Nummer N, N_0 bei t_0

$$N = N_0 + \nu_0(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}(t - t_0)^3 \dots$$

- ▶ Fit $N(t_i)$ (Messung) an n_i (nächste Integers) mit TOA Fehler σ_i

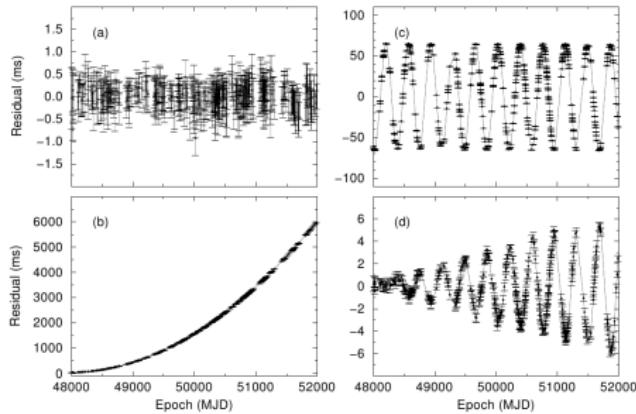
$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{N(t_i) - n_i}{\sigma_i} \right)^2$$

- ▶ Trafo TOAs → Baryzentrum $t_{\text{bary}} = t_{\text{topol}} + t_{\text{corr}} - \Delta D/f^2 + \Delta_{R\odot} + \Delta_{S\odot} + \Delta_{E\odot}$

NORMALE PULSARE

Fitparameter:

- ▶ **astrometrische Parameter** (Position im Römer- und Shapiro delay)
- ▶ **Spinparameter** ($\nu, \dot{\nu}, \ddot{\nu}$)
- ▶ **Binärsystemparameter** ⇒ nächster Abschnitt



- ▶ (a) - bestes Timing-Modell
- ▶ (b) - \dot{P} vernachlässigt
- ▶ (c) - Position PSR bei Trafo in Baryzentrum abweichend
- ▶ (d) - vernachlässigte Eigengbewegung des PSRs

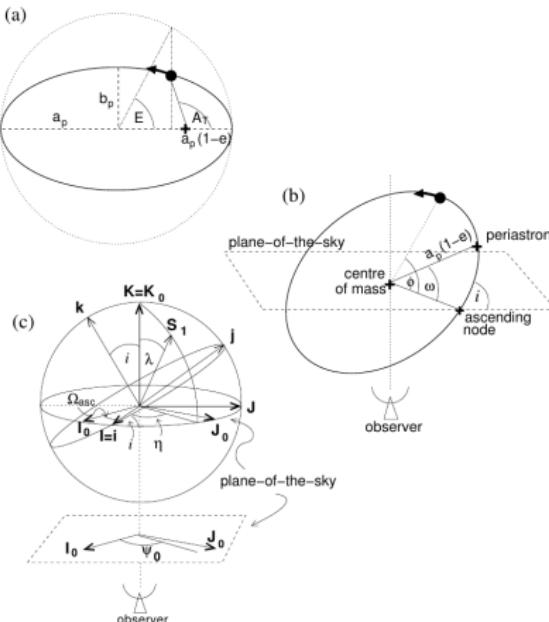
NORMALE PULSARE

Credit: John Rowe Animation/Australia Telescope National Facility, CSIRO

BINÄRSYSTEME

Erweiterung Timing Modell: Baryzentrum Binärsystem

$$t_{\text{bary}} = t_{\text{topol}} + t_{\text{corr}} - \Delta D/f^2 + \Delta_{R\odot} + \Delta_{S\odot} + \Delta_{E\odot} + \Delta_{RB} + \Delta_{SB} + \Delta_{EB} + \Delta_{AB}$$



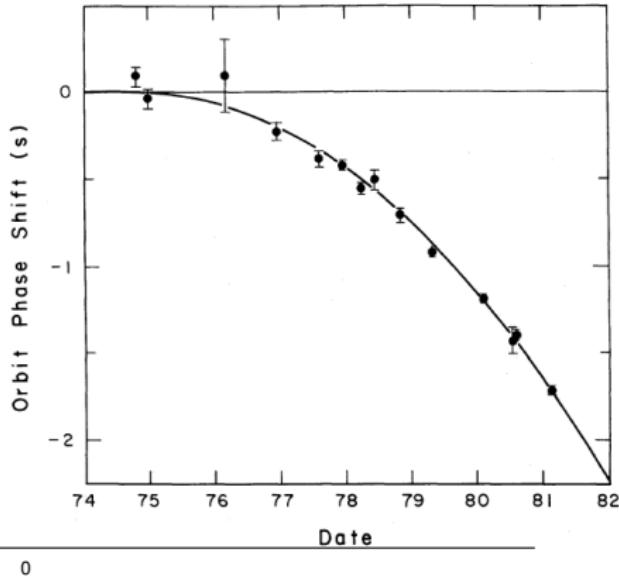
5 Keplerparameter aus Römer delay
 Δ_{RB} herleitbar:

- ▶ P_b - Orbitperiode
- ▶ $a_p \sin i$ - Projektion große Halbachse auf Sichtlinie
- ▶ e - Exzentrizität
- ▶ ω - Winkelhöhe Periastron
- ▶ T_0 - Zeitpunkt Periastron-Passage

Relativistische Korrekturen
⇒ “Post Keplerian Parameters”

HULSE & TAYLOR PSR1913+16

- ▶ Entdeckung 1974 (Hulse & Taylor (1975)), Nobelpreis 1993!
- ▶ Zeitdilatation: TOAs verlangsamt im Apastron, da grav. Feld stärker (Weisberg & Taylor (1984))
- ▶ nach allen Korrekturen “restliches” \dot{P}
- ▶ parabolische Residuen
- ▶ Energieverlust durch **Gravitationswellen** (Taylor & Weisberg (1982))



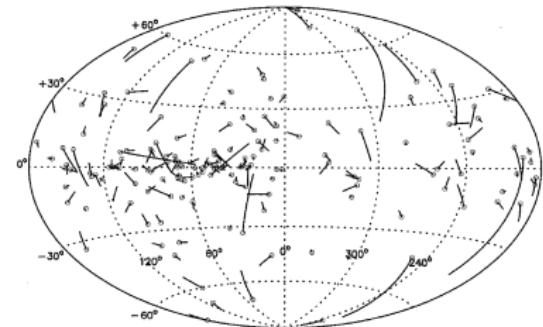
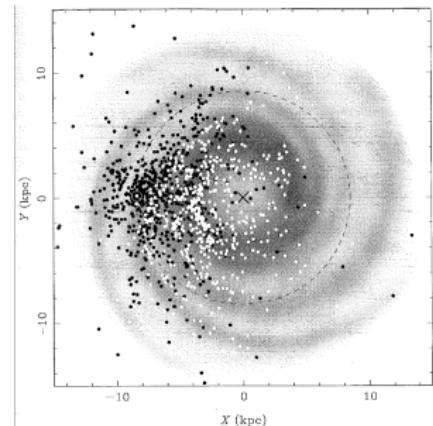
ZUSAMMENFASSUNG

- ▶ Energieverlust einzelner Pulsare \Rightarrow rotierendes Dipolmagnetfeld
- ▶ Magnetosphäre + B-Feld \Rightarrow gemessene Strahlung
- ▶ Genesis \Rightarrow wenige Binärsysteme, viele Einzelpulsare (hohe Fluchtgeschwindigkeiten)
- ▶ Radioastronomie: starkes Werkzeug für nicht akkretierende Einzelpulsare (Beschaffenheit des Radiobeams, Emissionsquellen -/mechanismen)
- ▶ Pulsartiming: ebenfalls mächtiges Werkzeug für Pulsarphysik, Charakterisierung von Binärsystemen, aber auch Gravitationswellen!!

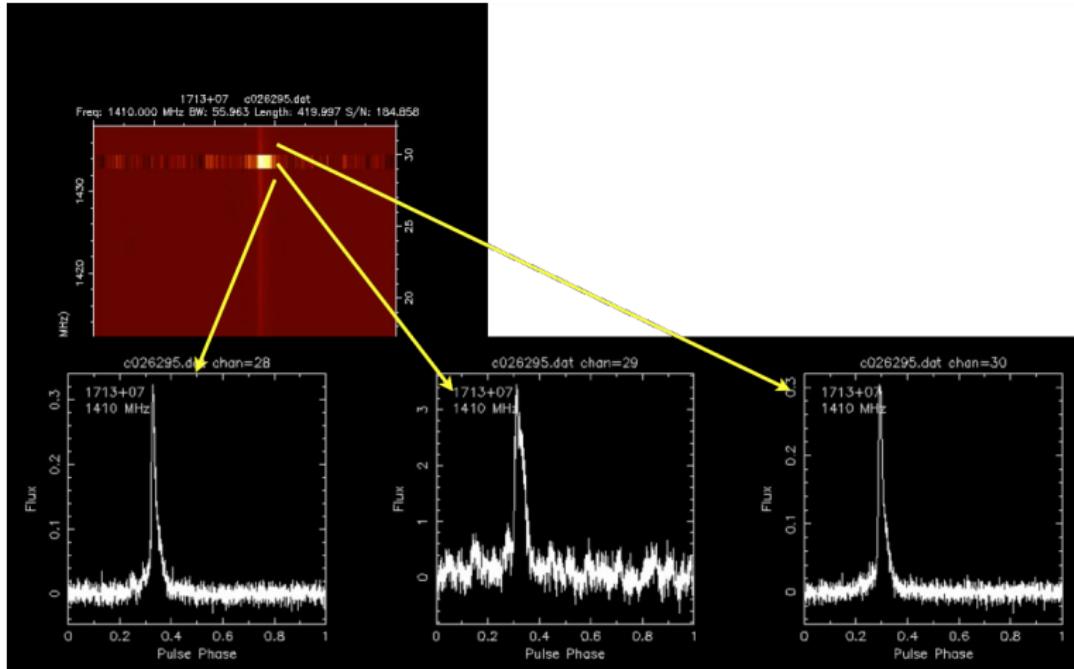
- Backer D.C., 1976, *The Astrophysical Journal* 209, 895
- Cohen J.M., Rosenblum A., 1972, *Astronomy and Astrophysics Supplement* 16, 130
- Ginzburg V.L., Zhelezniakov V.V., 1975, *Annual review of astronomy and astrophysics* 13, 511
- Goldreich P., Julian W.H., 1969, *The Astrophysical Journal* 157, 869
- Hankins T.H., Eilek J.A., 2007, *The Astrophysical Journal* 670, 693
- Hulse R.A., Taylor J.H., 1975, *Astrophysical Journal* 195, L51
- Jessner A., 2010
- Kolanoski 2005, *Einfuehrung in die Astroteilchenphysik*, Lecture WT 2005/2006
Humboldt-Universitaet zu Berlin
- Kramer M., 2006, Séminaire Poincaré
- Kreykenbohm I., 2004, Ph.D. thesis, Eberhard-Karls-Universitaet Tueubingen
- Lorimer D., Kramer M., 2005, *Handbook of Pulsar Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Lorimer D.R., 2005, *Living Reviews in Relativity* 8, 7
- Lyne A.G., Manchester R.N., 1988 234, 477
- Lyne G., Graham-Smith F., 1998, *Pulsar Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Melrose D.B., Gedalin M.E., 1999, *The Astrophysical Journal* 521, 351
- Rybicki G., 2004, *Radiative Processes in Astrophysics*, Wiley-Vch, Weinheim
- Taylor J.H., Weisberg J.M., 1982, *Astrophysical Journal* 253, 908
- Verbiest J., 2010
- Weisberg J.M., Taylor J.H., 1984, *Physical Review Letters* 52, 1348

VERTEILUNG

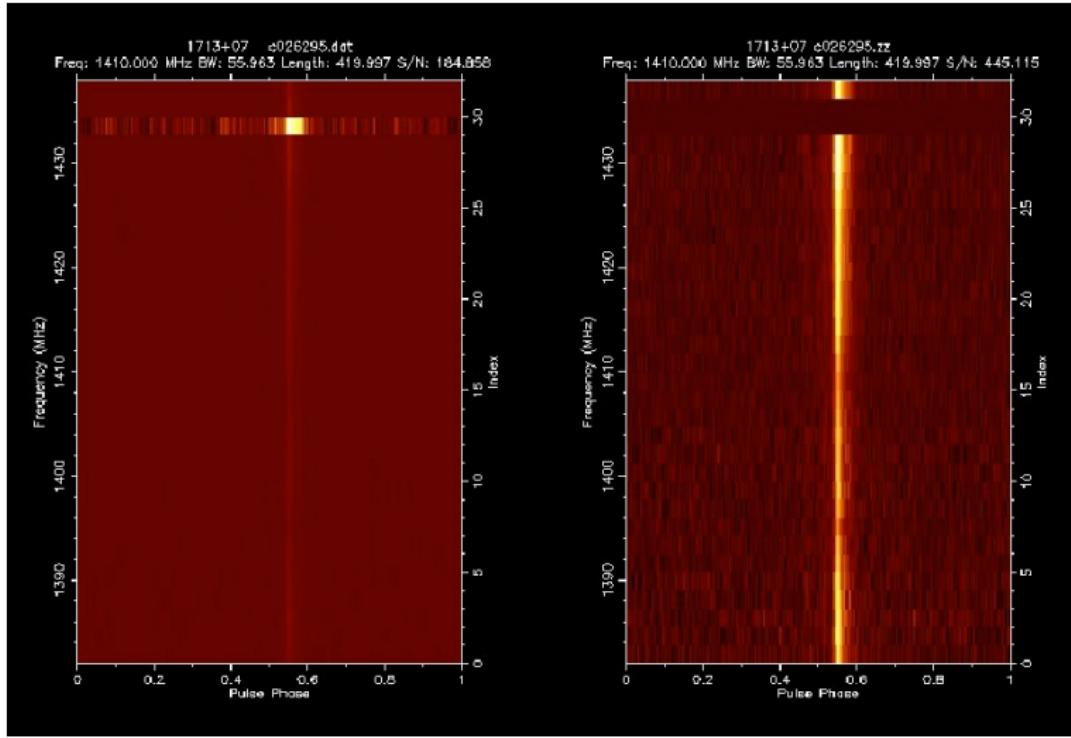
- ▶ **scheinbare** Agglomeration um Sonnensystem ("SN-kick")
- ▶ Selektionseffekt thermisch schwacher Quellen: "beam towards earth"



RFI



RFI



RFI

