

Weißer Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher

Werner Becker

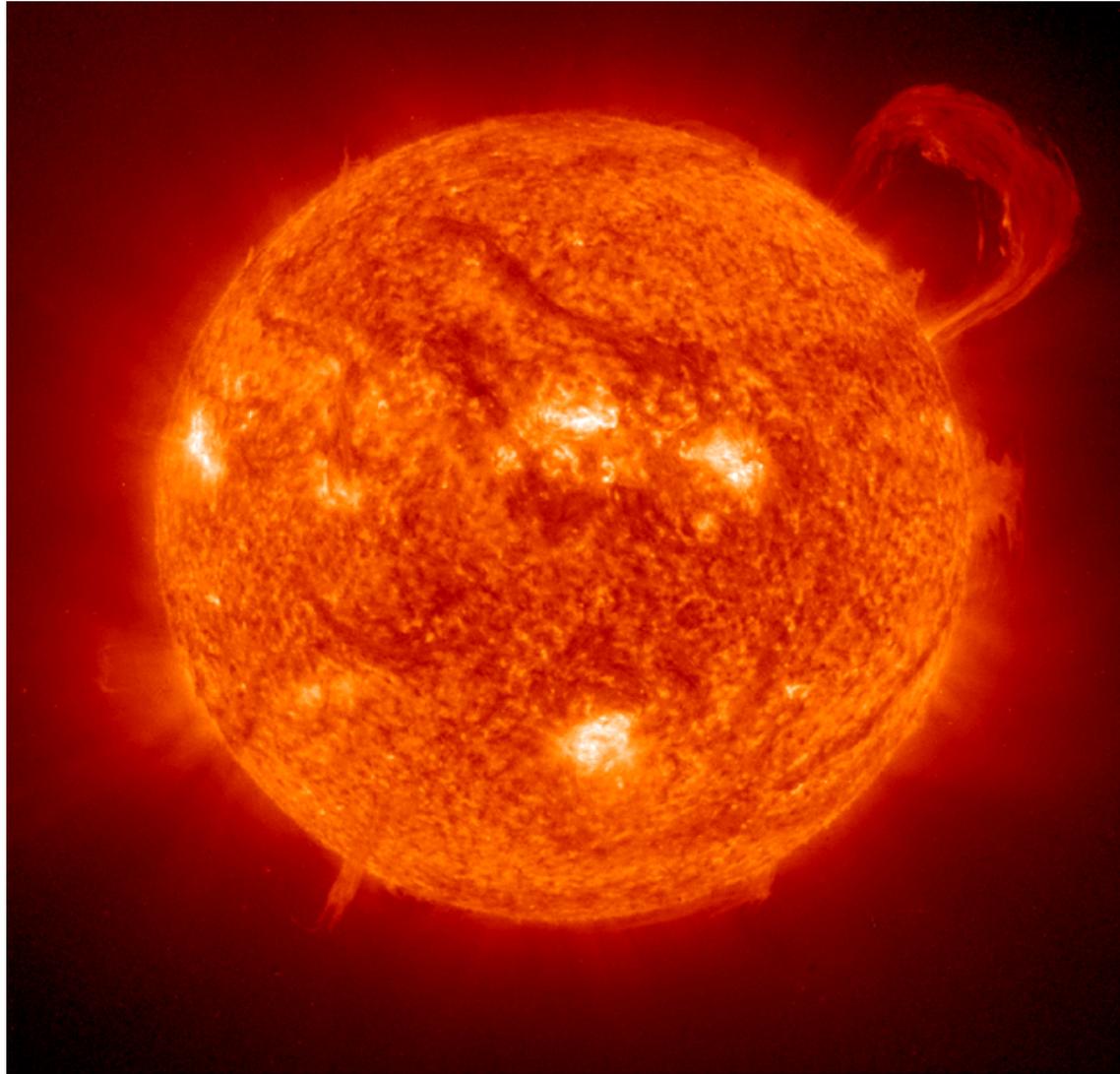
Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik

Max-Planck Institut für Astrophysik

web@mpe.mpg.de

<http://www.xray.mpe.mpg.de/~web>

Was passiert wenn die Sonne kollabieren würde?



Typische Neutronensternparameter:

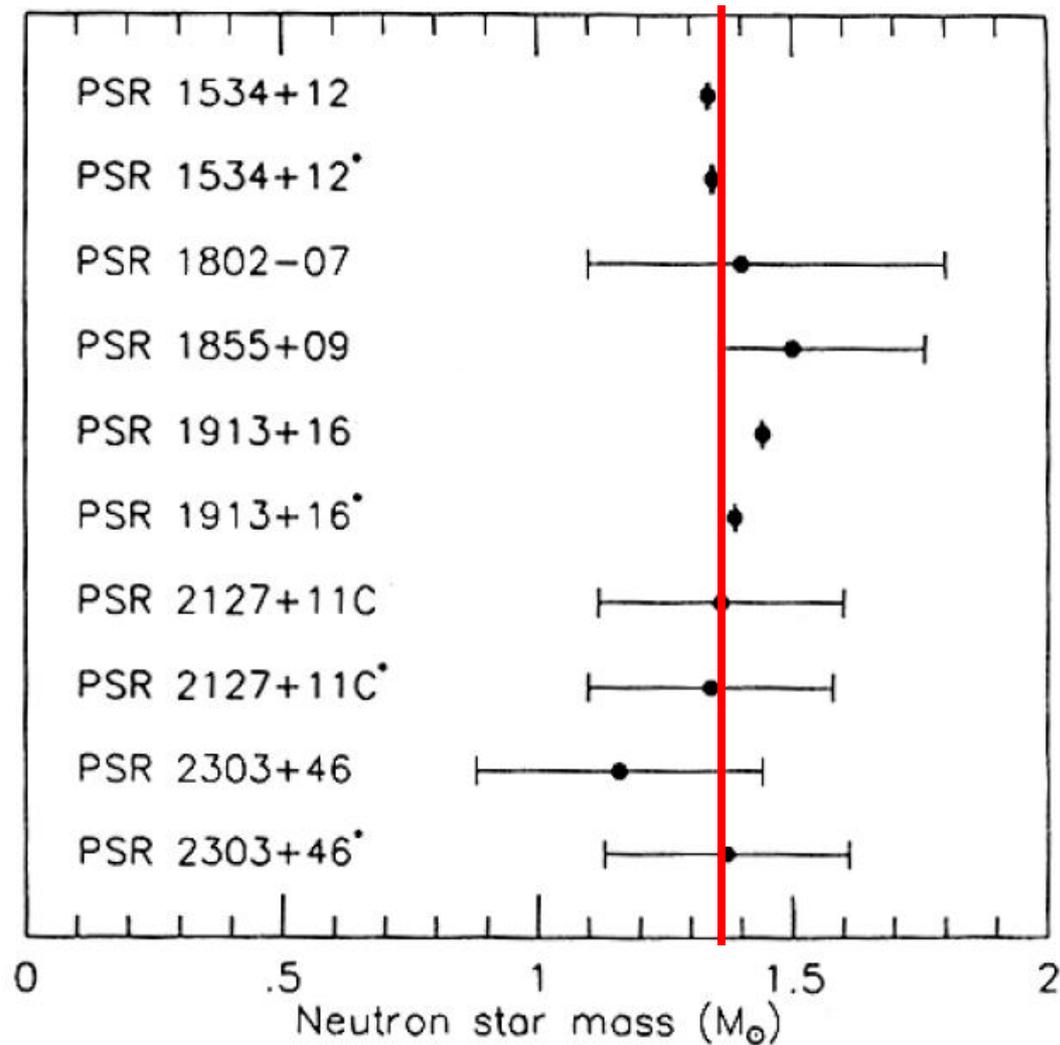
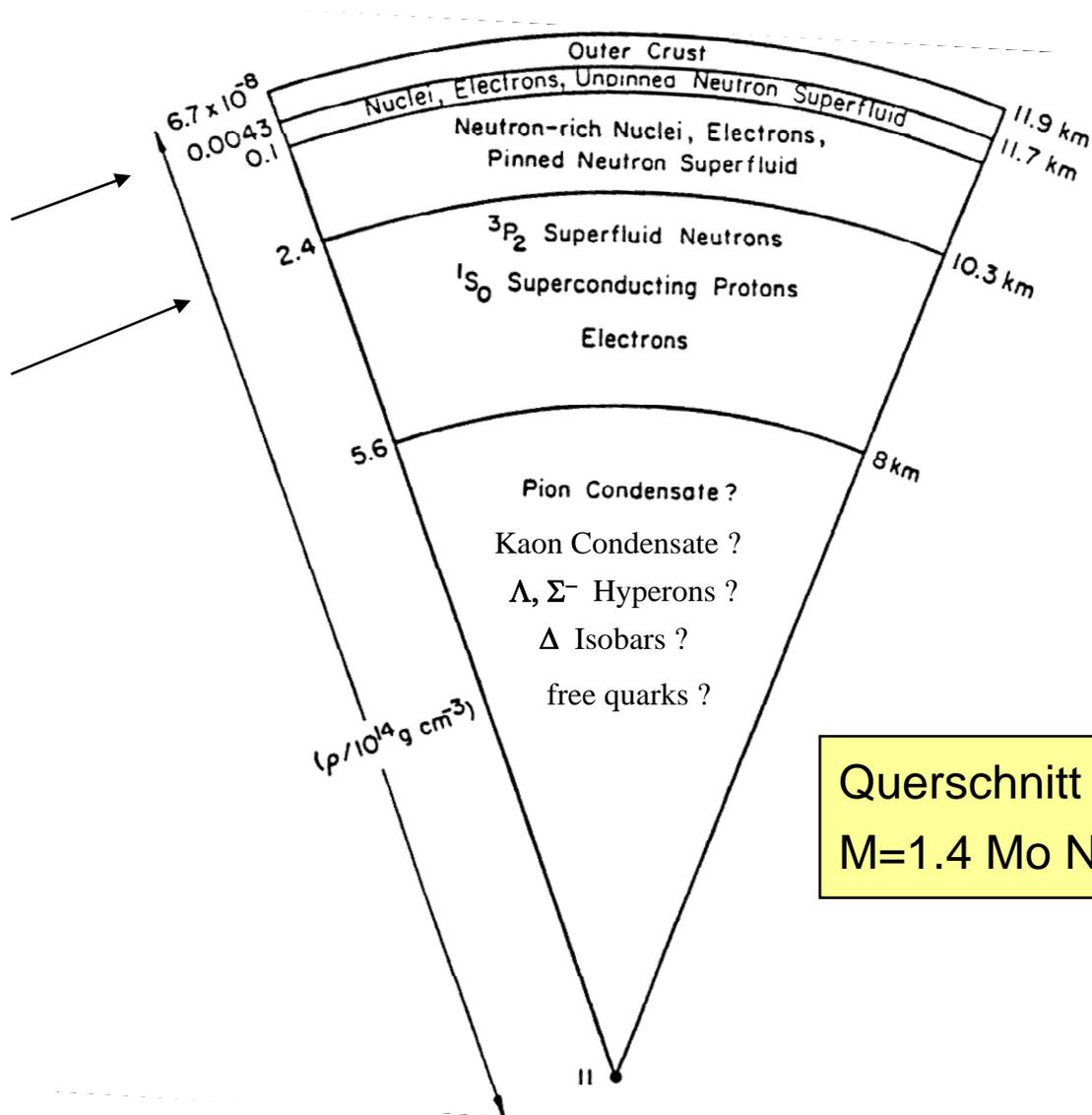


Fig. 30. Masses of 10 neutron stars measured by observing relativistic effects in binary pulsar orbits. Asterisks after pulsar names denote comparisons to the observed pulsars (from Taylor 1995).

Aufbau von Neutronensternen:

Neutronen-
tropfpunkt

Kerndichte



Querschnitt durch einen
M=1.4 Mo Neutronenstern

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

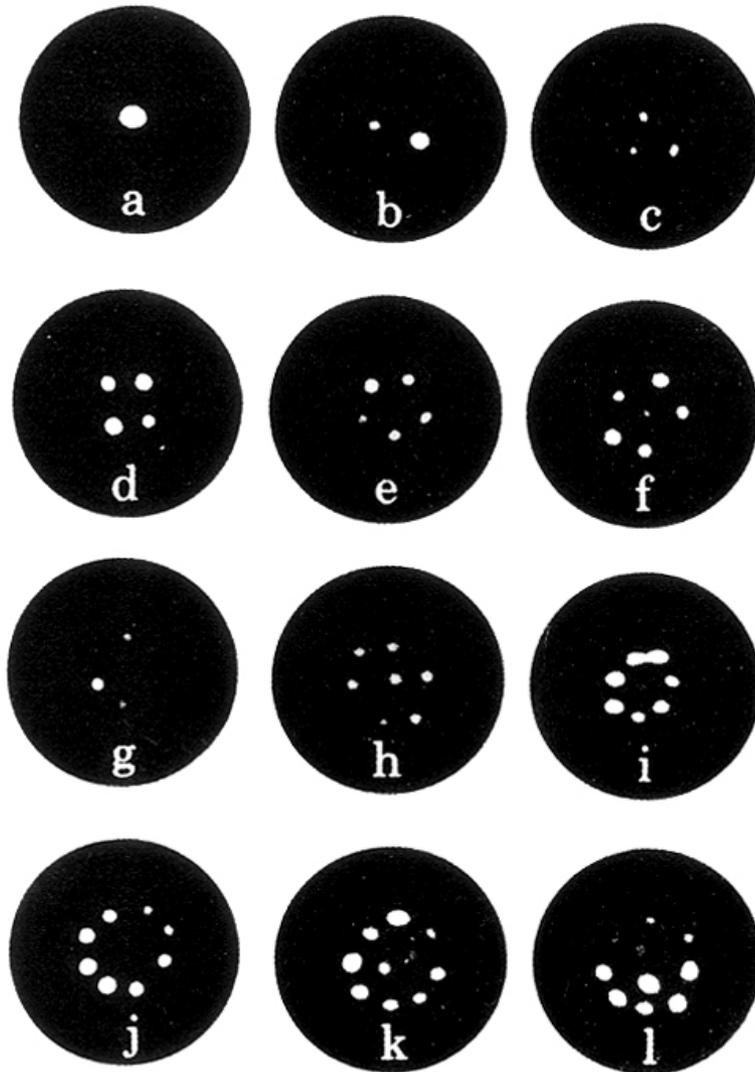


Fig. 33. Onsager-Feynman quantized vortices in a rotating beaker containing superfluid helium (from Yarmchuk et al. 1979).

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

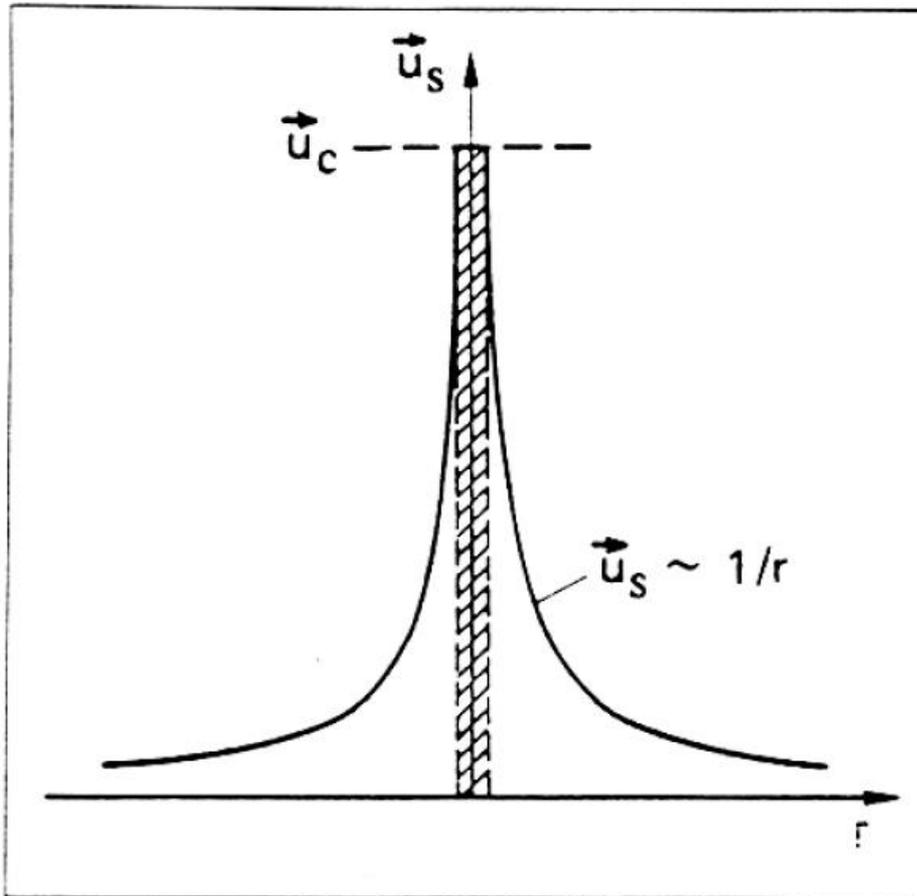


Abb. 2.3 Tangentialgeschwindigkeit der superfluiden Quasiteilchen für einen Potentialwirbel mit $u \cdot r = \text{const.}$ Für sehr kleine Werte von r wird u so groß, daß die superfluiden Neutronen die kritische Geschwindigkeit erreichen und das Wirbelzentrum über einen mit der Kohärenzlänge ξ der Quasiteilchen vergleichbaren Bereich normalflüssig wird. Dadurch wird für die supraflüssigen Neutronen-Paare innerhalb des rotierenden Neutronensterns ein mehrfach zusammenhängender Bereich geschaffen, der die Bedingung $\text{rot } \vec{u} = 0$ erfüllt, ohne daß u selbst null ist. Das Strömungsfeld der superfluiden Neutronen-Paare entspricht also dem eines drehungsfreien Wirbelfeldes (Abb. aus Gobrecht 1980).

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

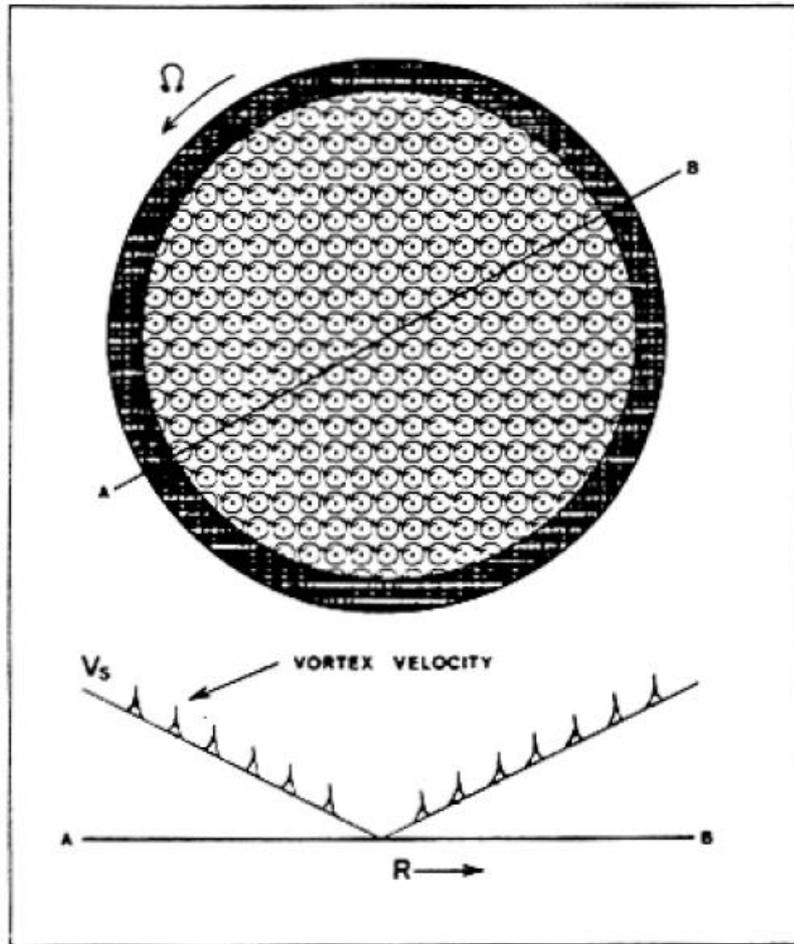


Abb. 2.4 Schematische Darstellung eines Wirbelfadengitters, mittels dem die supraflüssigen Neutronen-Paare innerhalb eines Neutronensterns versuchen, die Festkörperrotation nachzubilden. Ebenfalls gezeigt ist die Geschwindigkeitsverteilung der Vortex-Linien als Funktion des Abstandes von der Rotationsachse des Neutronensterns. (Abb. entnommen aus Sauls 1989).

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

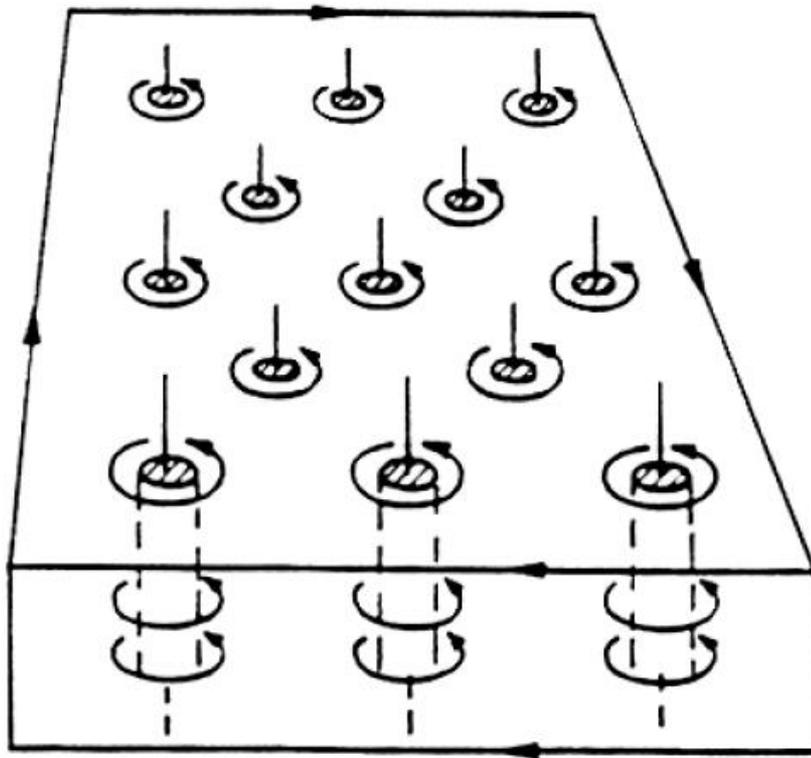


Abb. 2.5 Schematische Darstellung eines magnetischen Flußliniengitters, wie es für Typ II-Supraleiter vorausgesagt und beobachtet wird (Essmann & Träuble 1971). Die Stabilität der Flußlinien folgt aus der kreisenden Bewegung der die Flußlinienachsen umgebenden Cooper-Paare, wobei die gegenseitige Abstoßung der Flußlinien bei vorgegebener Flußliniendichte ein regelmäßiges Dreiecksgitter hervorruft. (Abbildung aus Gobrecht 1980).

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

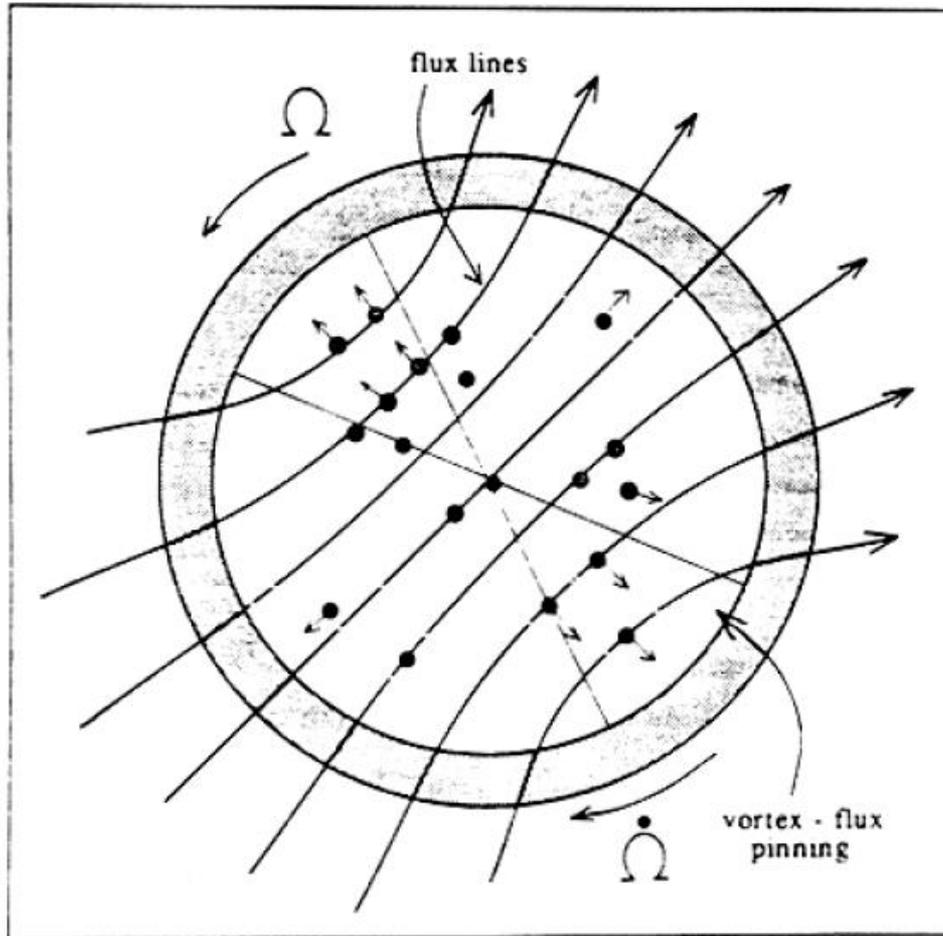
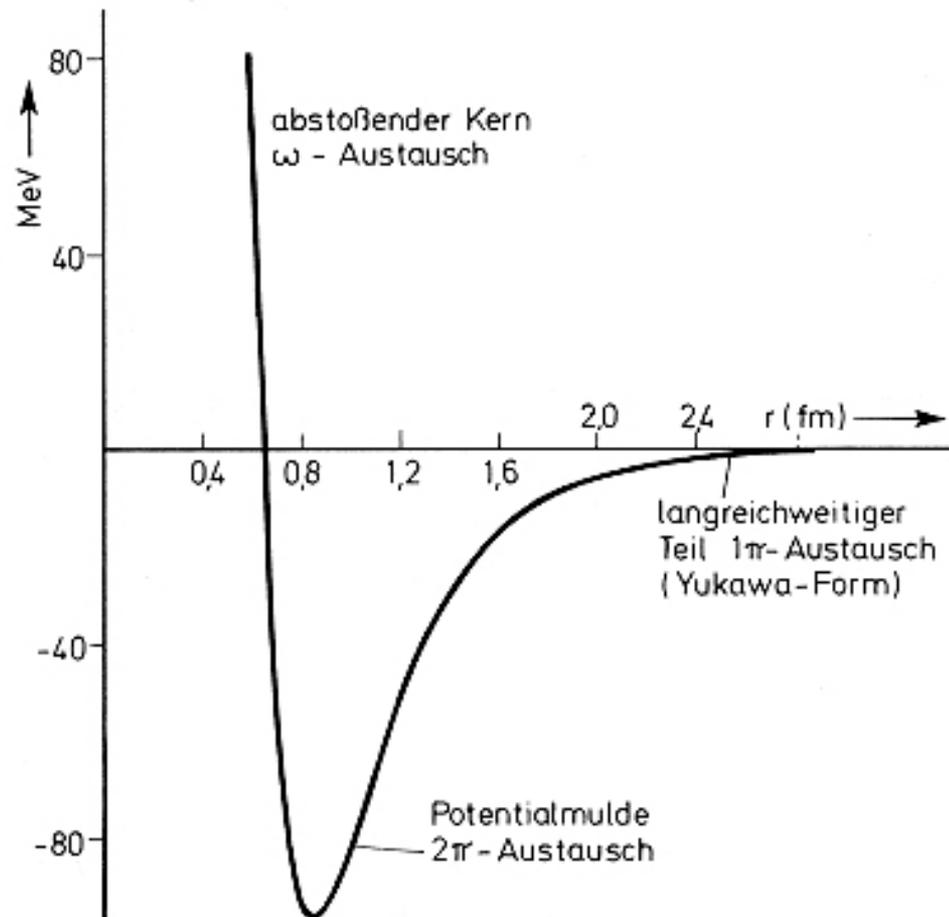


Abb. 2.6 Schematische Darstellung der Verankerung zwischen magnetischen Flußlinien der 1S_0 -supraleitenden Protonen und den durch die Rotation der supraflüssigen 3P_2 -Neutronen vorhandenen Vortex-Linien. Der Bereich der stärksten gegenseitigen Verankerung ist dabei an den Stellen am größten, wo der nach außen gerichtete Fluß der Vortex-Linien senkrecht zu den magnetischen Flußlinien erfolgt. (Abb. entnommen aus Sauls 1989).

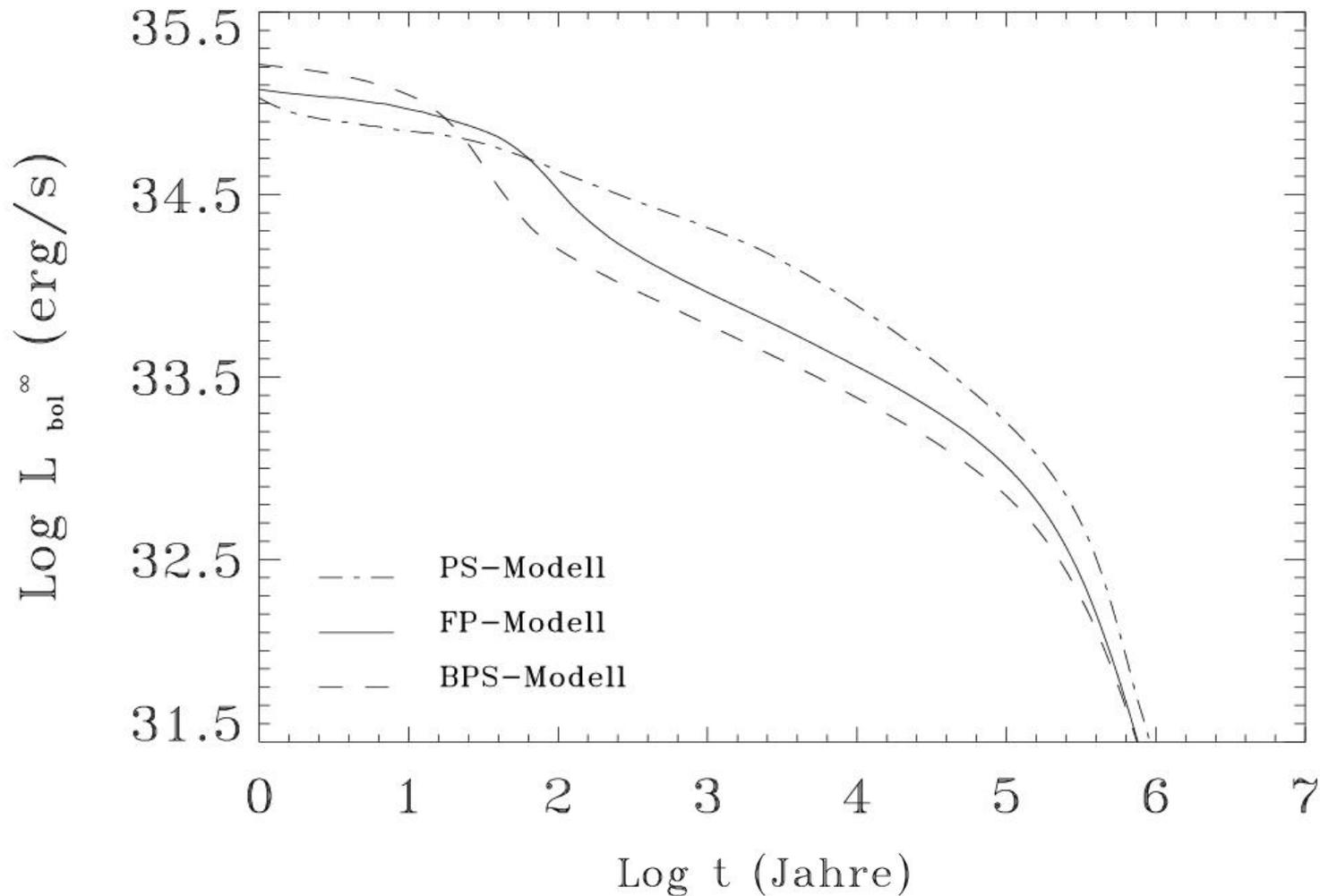
Nukleares WW-Potential:



Reid-Potential

Fig. 11
Potential zwischen zwei Nukleonen im 1S_0 -Zustand. Der gezeichnete Verlauf entspricht dem Potential von Reid [Rei 68], ist hier jedoch nur als qualitative Illustration des Potentialverlaufs zu verstehen

Thermische Evolution von Neutronensternen:



Typische Kühlungskurven nach den PS-, FP-, und BPS-Modellen

Thermische Evolution von Neutronensternen:

The general relativistic equations for solving the structure and evolution of neutron stars (NSs hereafter) are given as [17, 32]:

Hydrostatic Equilibrium:

$$dP/dr = \frac{-G(m + 4\pi r^3 P/c^2)(P/c^2 + \rho)}{r^2(1 - 2Gm/rc^2)}, \quad (1)$$

$$dm/dr = 4\pi r^2 \rho, \quad (2)$$

$$d\phi/dr = \frac{-dP/dr}{(\rho c^2 + P)}, \quad (3)$$

Energy Balance:

$$d(Le^{2\phi})/dr = \frac{-4\pi r^2 n e^\phi C_v dT/dt}{(1 - 2Gm/rc^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Radiative Energy Transport:

$$d(Te^\phi)/dr = \frac{-3\kappa\rho L_\gamma e^\phi}{16\sigma T^3 4\pi r^2 (1 - 2Gm/rc^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

Thermische Evolution von Neutronensternen:

where P , ρ , m , T , L , L_γ , κ , C_v , n , r , and t are pressure, total mass density, mass, temperature, total luminosity, photon luminosity, total opacity, total specific heat, total number density, radial distance from the center of the star, and time, respectively, measured locally. G , σ , and c are Gravitational constant, Stefan-Boltzman constant, and speed of light, respectively. ϕ is the gravitational potential and e^ϕ is the general relativistic correction factor. In the non-relativistic limit e^ϕ reduces to 1, $m \gg 4\pi^3 P/c^2$, $P \gg \rho c^2$, and $1 \gg 2Gm/rc^2$, and these equations reduce to the familiar Newtonian stellar structure evolution equations found in any standard astrophysics textbooks.

The first equation (1) tells just the mechanical balance, i.e., that at each point in a star the gravity must be supported by the internal pressure and the second equation (2) is just the relation between mass and density. The third equation defines the gravitational potential due to general relativity which becomes negligible in the Newtonian limit, and hence this equation does not appear in the Newtonian version of these basic equations. The first three equations determine the structure and mechanical properties of the star such as the relations between mass, radius and central density, while the last two equations determine the thermodynamic properties of the star, such as specific heat, luminosity and internal and surface temperatures.

Thermische Evolution von Neutronensternen:

In order to solve these equations, we require additional supplementary equations:

Equation of State (EOS):

$$P = P(X, \rho, T), \quad (6)$$

Opacity Equation:

$$1/\kappa = 1/\kappa_R + 1/\kappa_C, \quad (7)$$

Luminosity Equations:

$$d(L_\nu e^{2\phi})/dr = \frac{4\pi r^2 n e^\phi q_\nu}{(1 - 2Gm/rc^2)^{1/2}}, \quad (8)$$

$$L_\gamma = 4\pi\sigma R^2 T_s^4, \quad (9)$$

$$L = L_\nu + L_\gamma, \quad (10)$$

where κ_R and κ_C are the radiative and conductive opacity, L_ν and q_ν are total neutrino luminosity and total neutrino emissivity (= luminosity per volume), respectively, X refers to the composition, R is stellar radius, and T_s is stellar surface temperature, respectively.

Thermische Evolution von Neutronensternen:

Combining these equations, the observed photon luminosity and surface temperature are related as:

$$L_\gamma^\infty = 4\pi\sigma R_e^2 (T_s^\infty)^4, \quad (13)$$

where R_e is the effective (observed) radius

$$R_e = e^{-\phi_s} R. \quad (14)$$

In these equations ϕ_s is the gravitational potential at the stellar surface, and

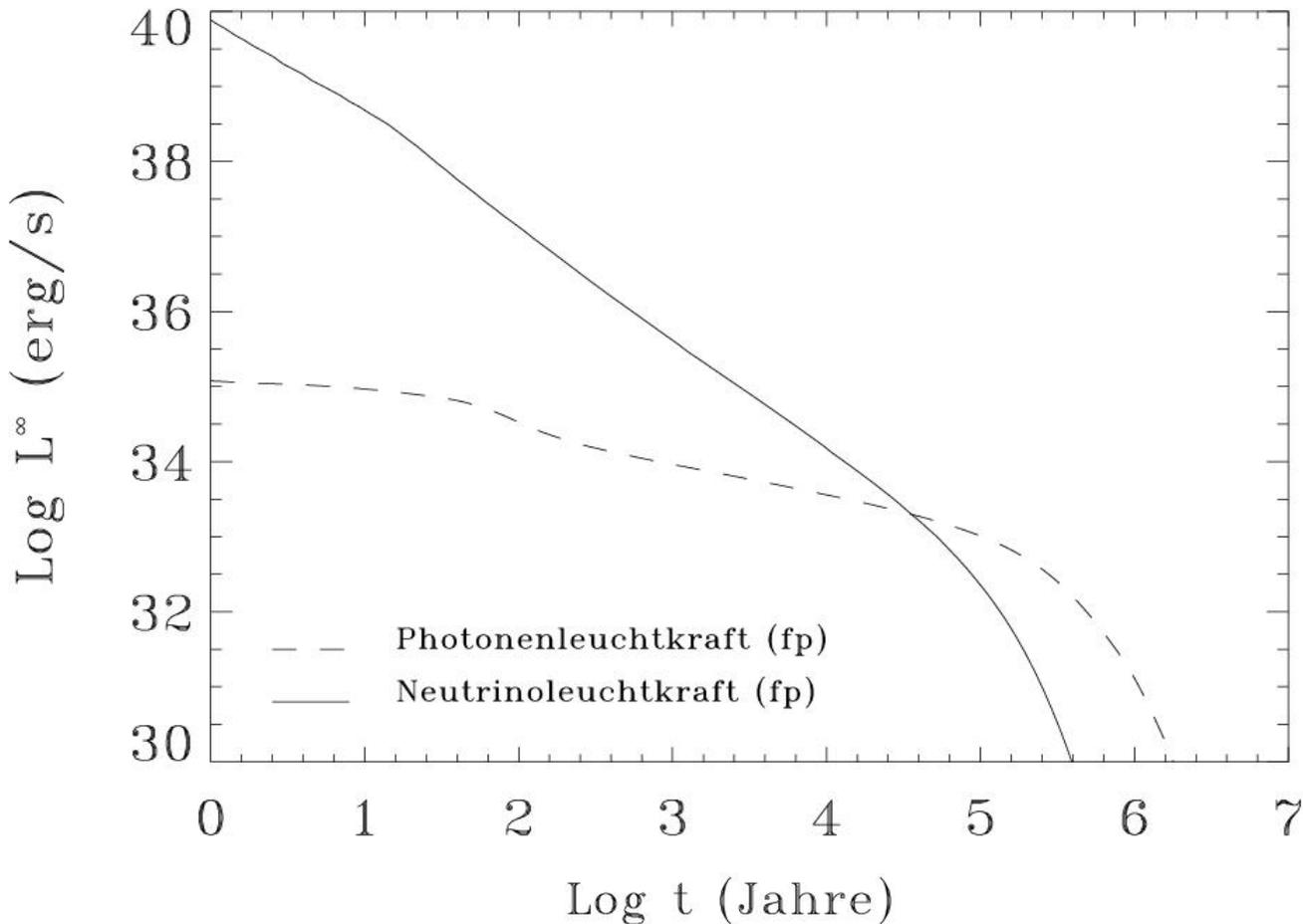
$$e^{\phi_s} = (1 - 2GM/Rc^2)^{1/2}. \quad (15)$$

It may be noted that Equation (4) is especially important for NS cooling theories because it essentially determines cooling. That can be seen more easily if we look at this equation in the Newtonian limit, which reduces to:

$$dE/dt = C_v dT/dt = -L_\gamma - L_\nu + H, \quad (16)$$

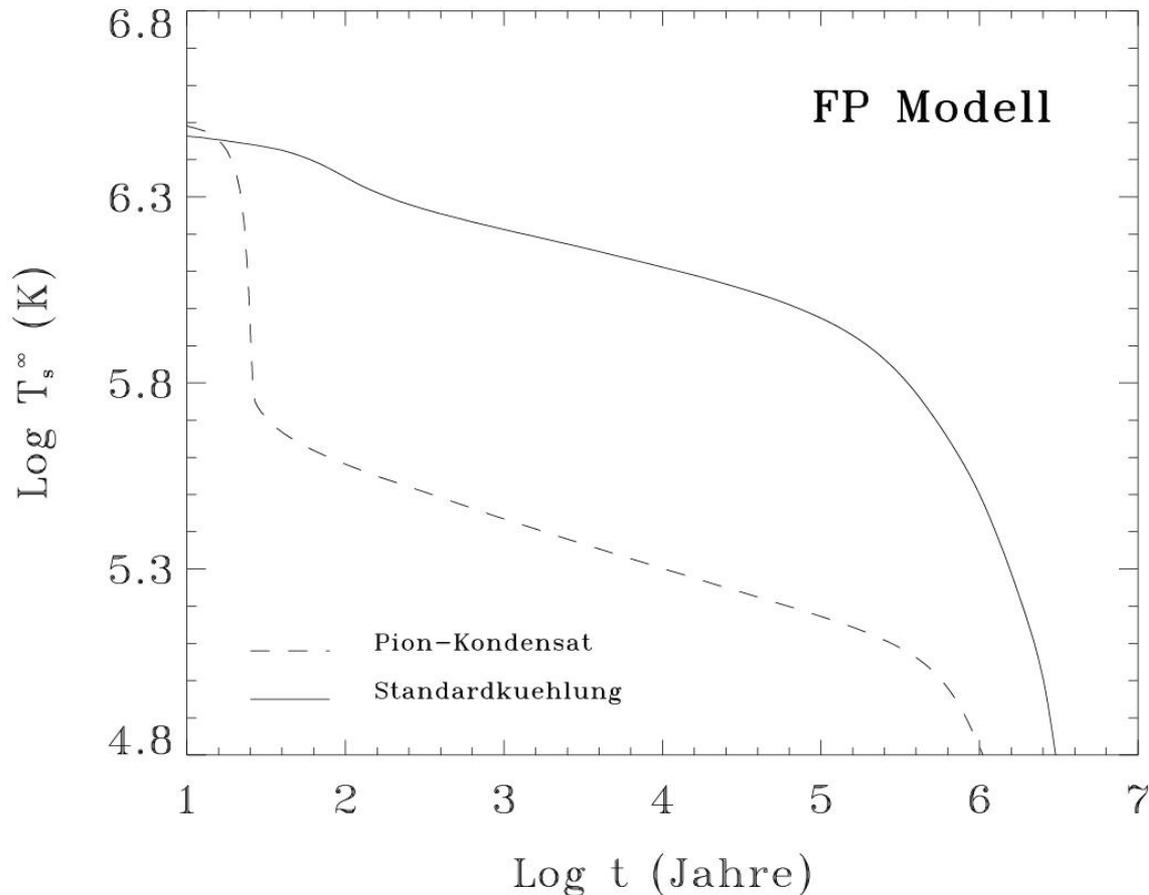
where E is the total internal energy, L_γ and L_ν are photon luminosity and neutrino luminosity, respectively, and C_v is total specific heat. Sometimes

Thermische Evolution von Neutronensternen:



Neutronensterne entstehen mit Temperaturen von $\sim 10^{11}$ K, und kühlen danach im wesentlichen durch Abstrahlung von Neutrinos. Erst ab 50.000 ~ 100.000 Jahren überwiegt die Abkühlung durch thermische Photonen von der Neutronensternoberfläche.

Thermische Evolution von Neutronensternen:



Der genaue Verlauf der thermischen Evolution hängt sehr stark von der Zustandsgleichung des Neutronensterns ab (Standardkühlung, beschleunigte Abkühlung z.B. in Zusammenhang mit dem Ablaufen von Reaktionen mit gesteigerter Neutrinoemissivität)

Thermische Evolution von Neutronensternen: *Heizung*

→ **Heizung:**

Dissipativer WW-Prozesse an der Nahtstelle zwischen fester und supraflüssiger Materie aufgrund einer unterschiedlich starken Winkelgeschwindigkeitsänderung während des Pulsar spin-downs führt zur Heizung (frictional heating)

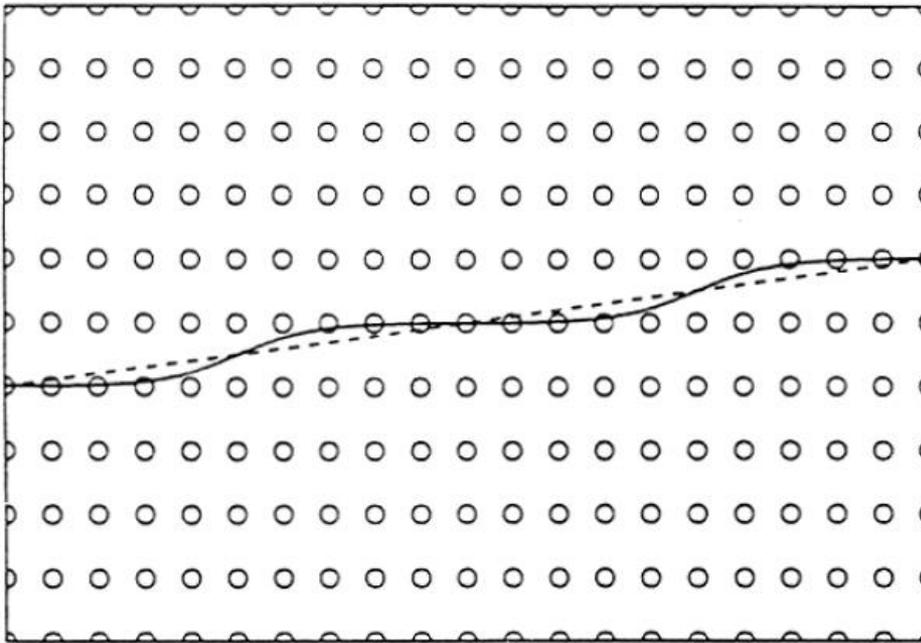


Abb. 2.9 Schematische Darstellung eines an den Haftzentren der inneren Neutronensternkruste verankerten Wirbelfadens. Die durchgezogene Linie repräsentiert einen flexiblen Wirbelfaden, während die gestrichelte Linie eine bezüglich mechanischer Beanspruchung sehr steife Wirbellinie zeigt. Die Steifheit einer Linie entscheidet dabei über die Anzahl der Haftzentren, die für eine Bewegung gleichzeitig entankert werden müssen. (Abb. aus Link et al 1993).

Andere Heizmechanismen sind z.B. Vortex-Pinning / Vortex-Creeping

Aufbau von Neutronensternen: Superfluide Neutronen u. Protonen

Reibungsheizung durch Vortex-Pinning und creeping der superfl. Neutronen

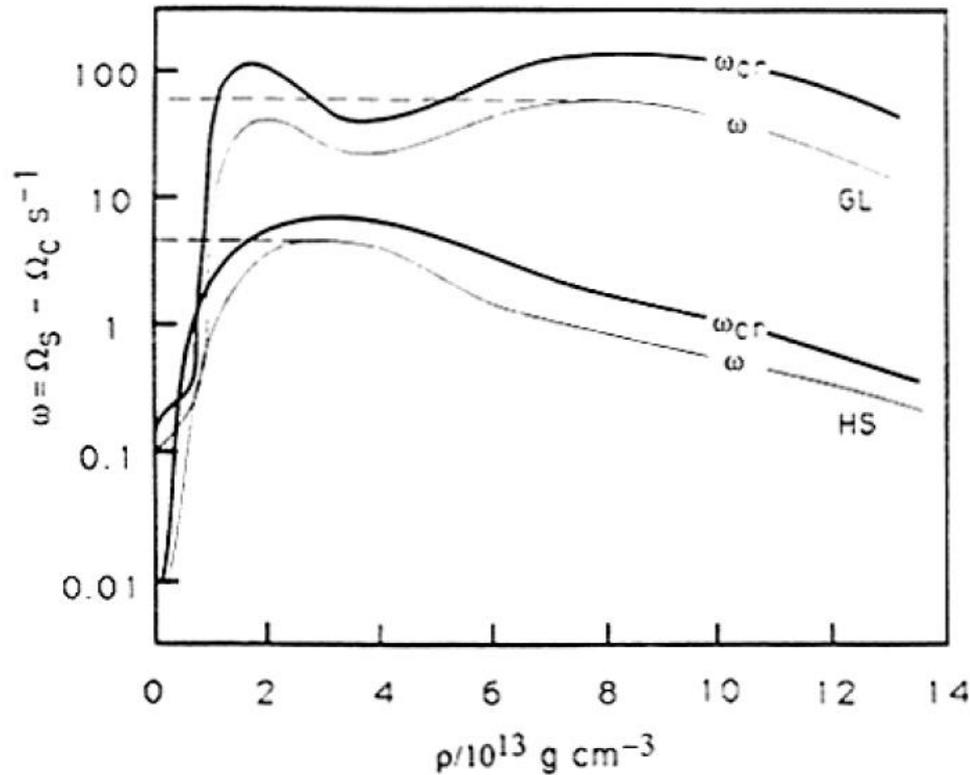
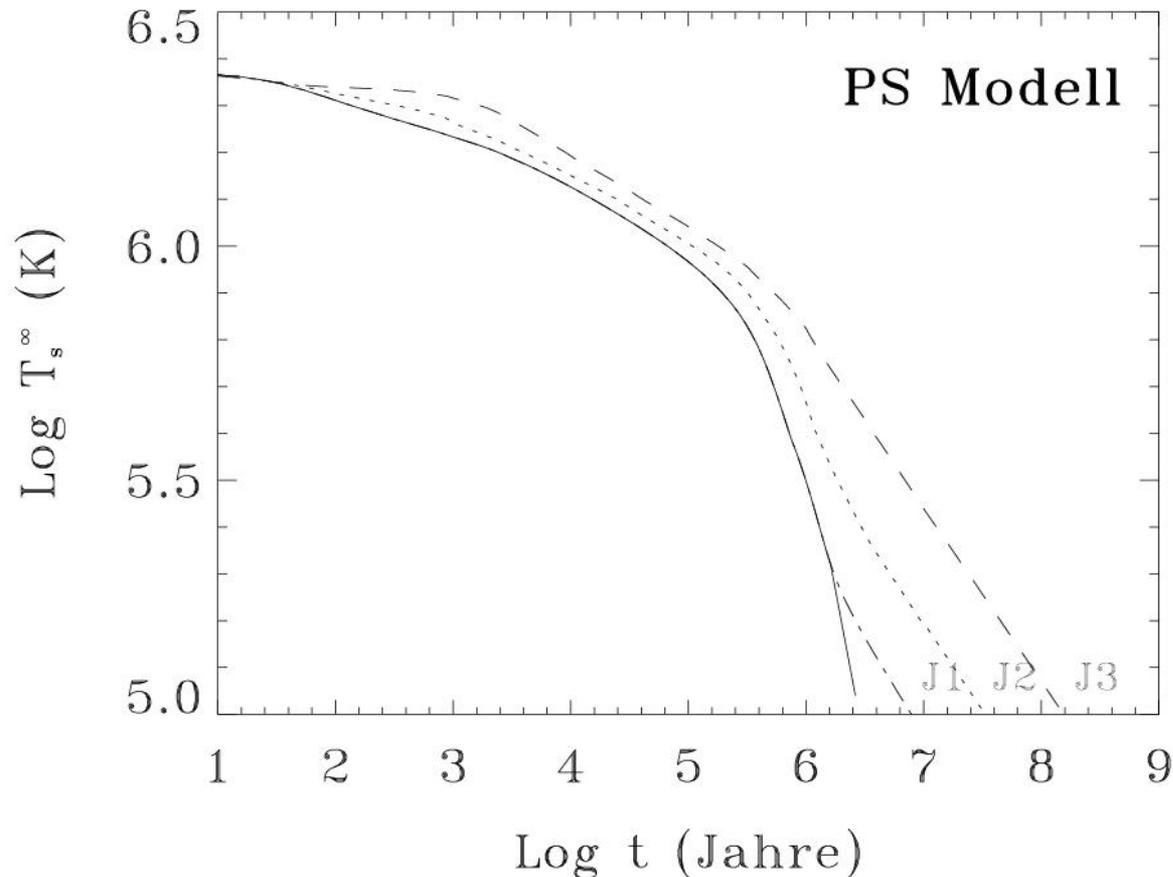


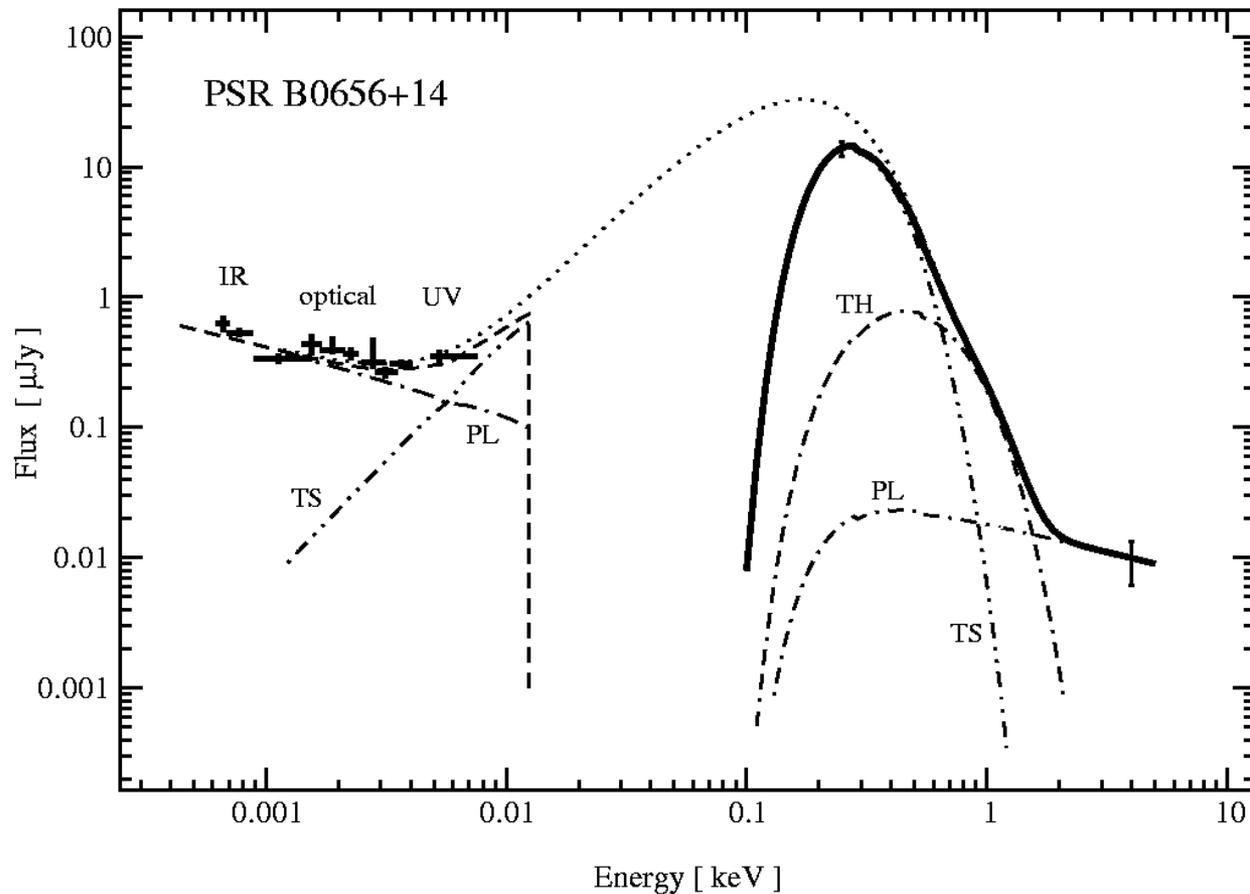
Abb. 2.10 Abhängigkeit der kritischen Winkelgeschwindigkeitsdifferenz ω_{cr} von der Materiedichte ρ des Neutronensterns, basierend auf der Ginzburg-Landau-Theorie (GL) und der 'hard-sphere' Näherung (HS). (Abbildung entnommen aus Link et al 1993).

Thermische Evolution von Neutronensternen: Heizung



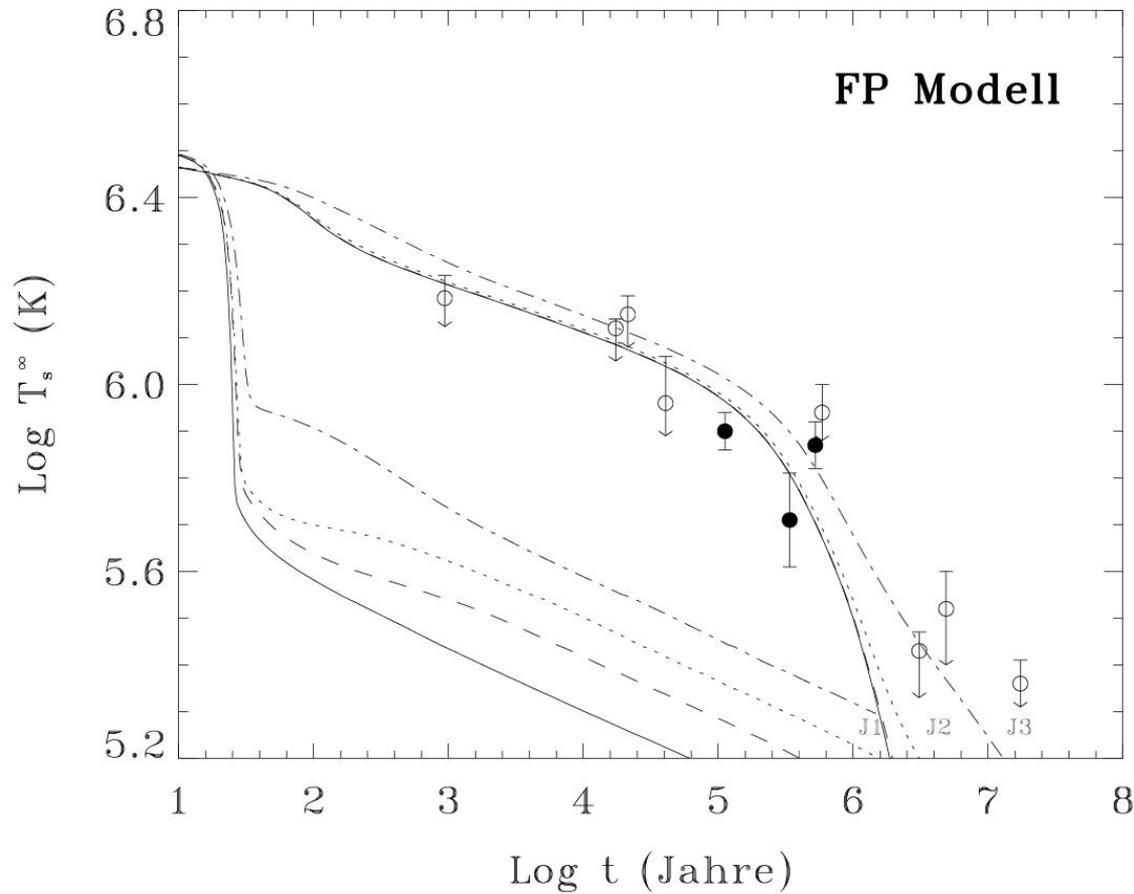
Unterschiedliche Heizbeiträge durch eine verschieden starke Kopplung zwischen der superfluiden und festen Neutronensternkomponente in der äußeren Neutronensternkruste

- Studium kühlender Neutronensterne: PSR 0656+14



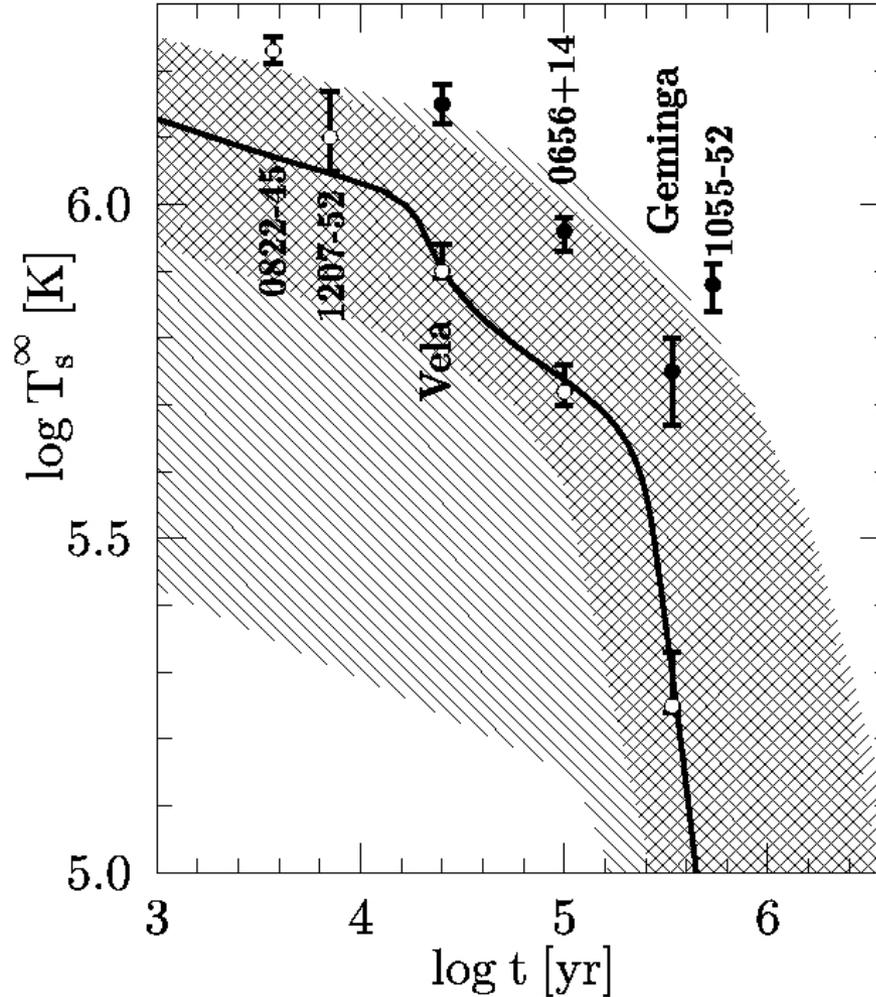
- Röntgenobservatorien wie ROSAT und XMM-Newton erlauben die Messung der Emissionsspektren von Neutronensternen, und daraus die Bestimmung der Neutronensternoberflächentemperatur (Schwarzkörperspektren TS und TH).

Thermische Evolution von Neutronensternen:



Vergleich von theoretischen Vorhersagen und mit Röntgenteleskopen gemessenen Neutronenstern-Oberflächentemperaturen

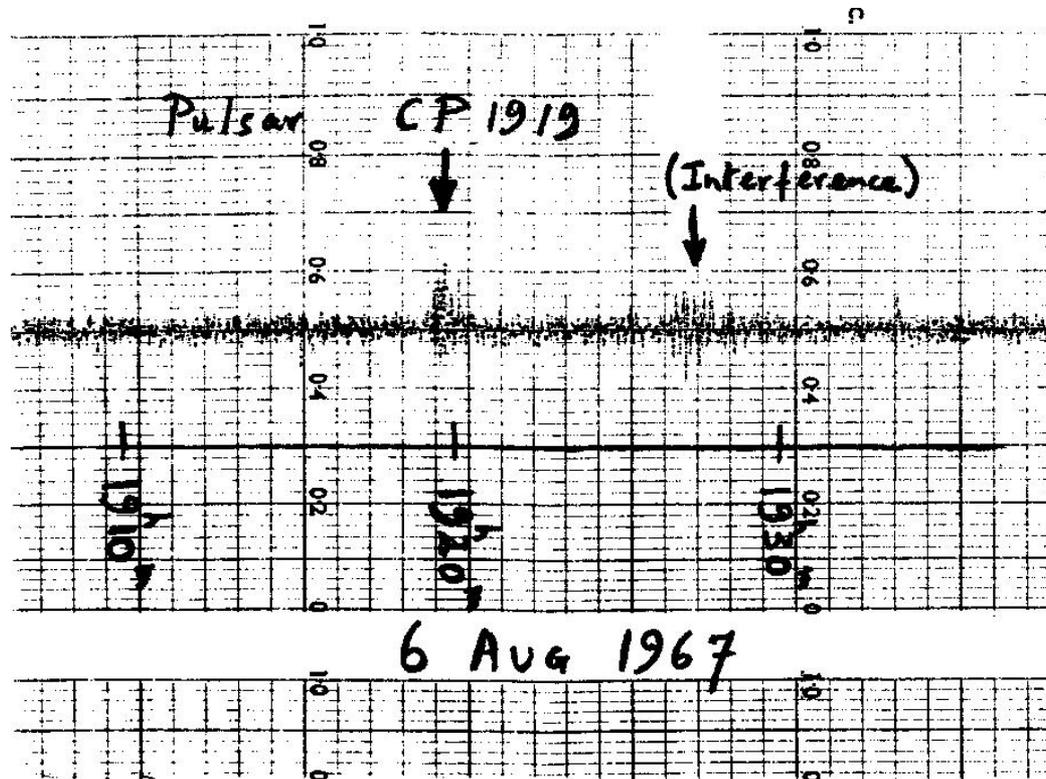
Thermische Evolution von Neutronensternen:



Vergleich von theoretischen Vorhersagen und mit Röntgenteleskopen gemessenen Neutronenstern-Oberflächentemperaturen

Neutronensterne sind als Pulsare beobachtbar

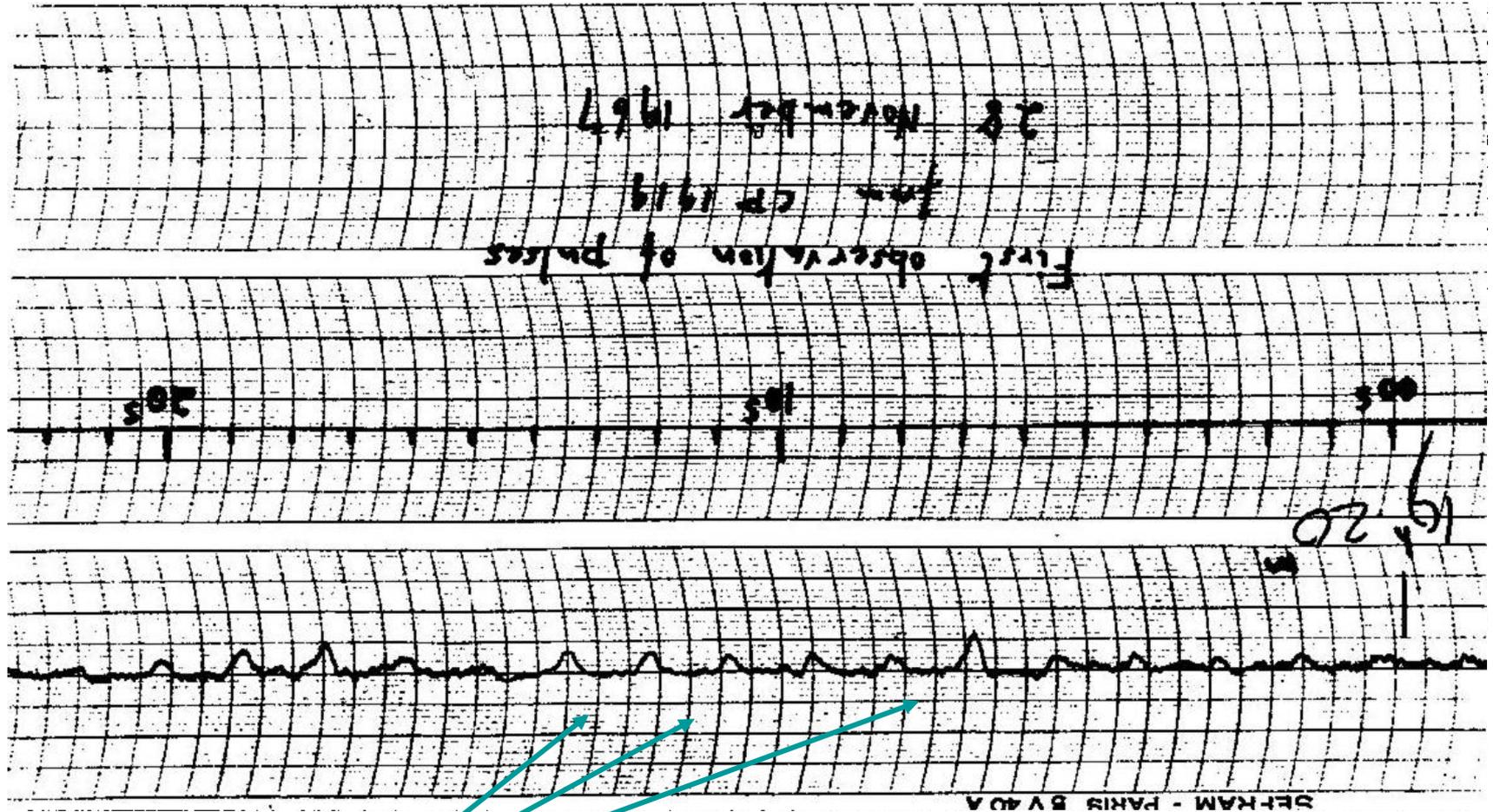
- Pulsare sind stark magnetisierte und schnell rotierende Neutronensterne, die ihre Strahlung entlang sehr schmaler Strahlungskegel abgeben.



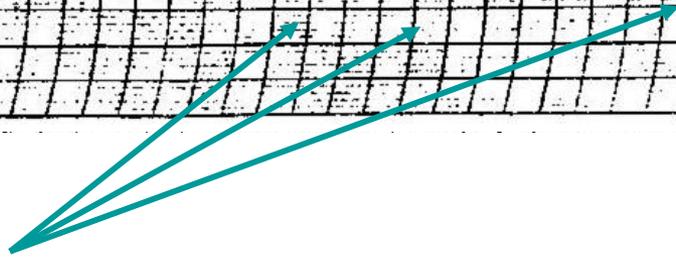
Entdeckung von Neutronensterne als Radiopulsare durch Hewish & Bell (1967)

Für die Entdeckung der Radiopulsare gab es 1974 für Hewish den Nobelpreis für Physik

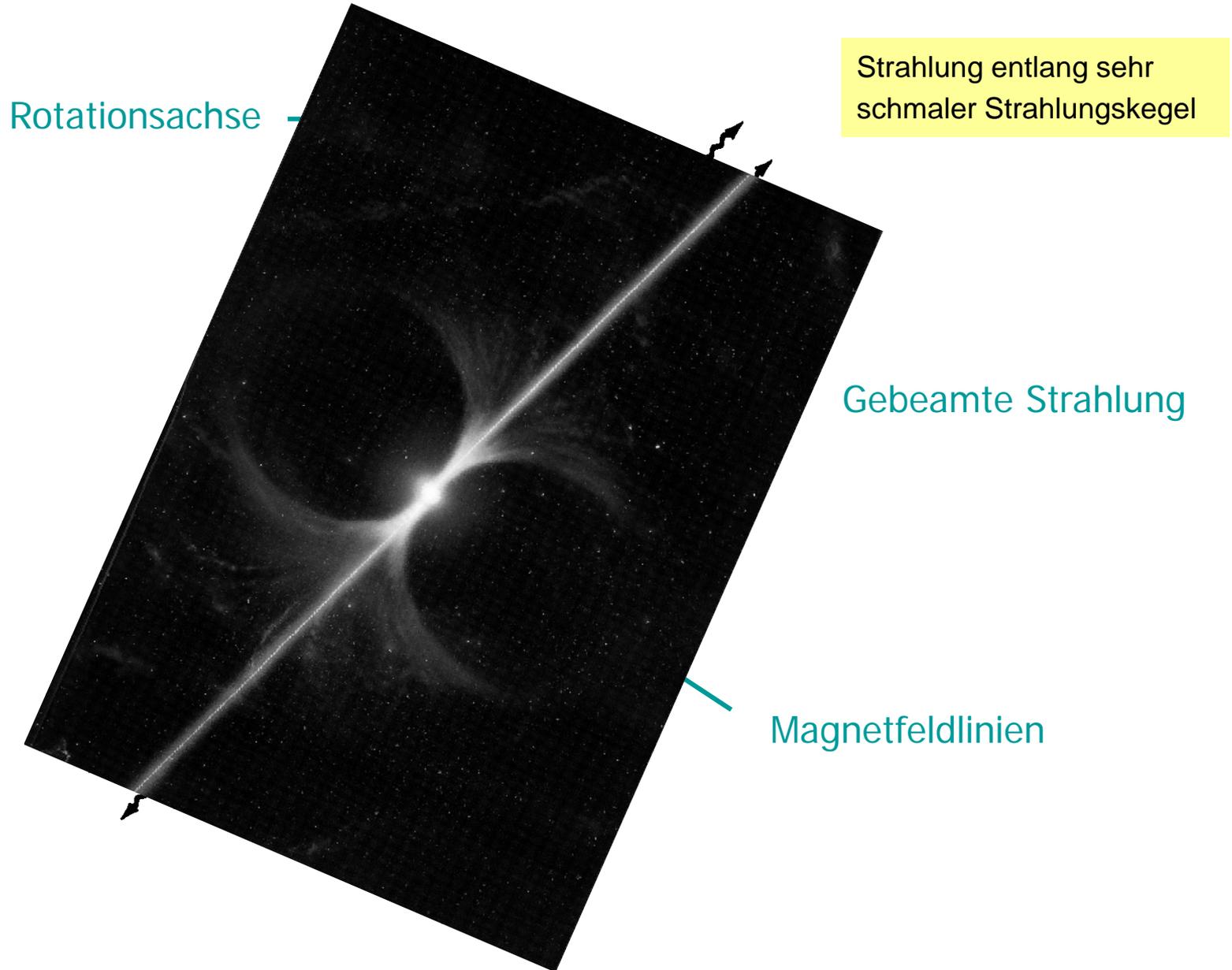
Neutronensterne sind als Pulsare beobachtbar



Radiopulse

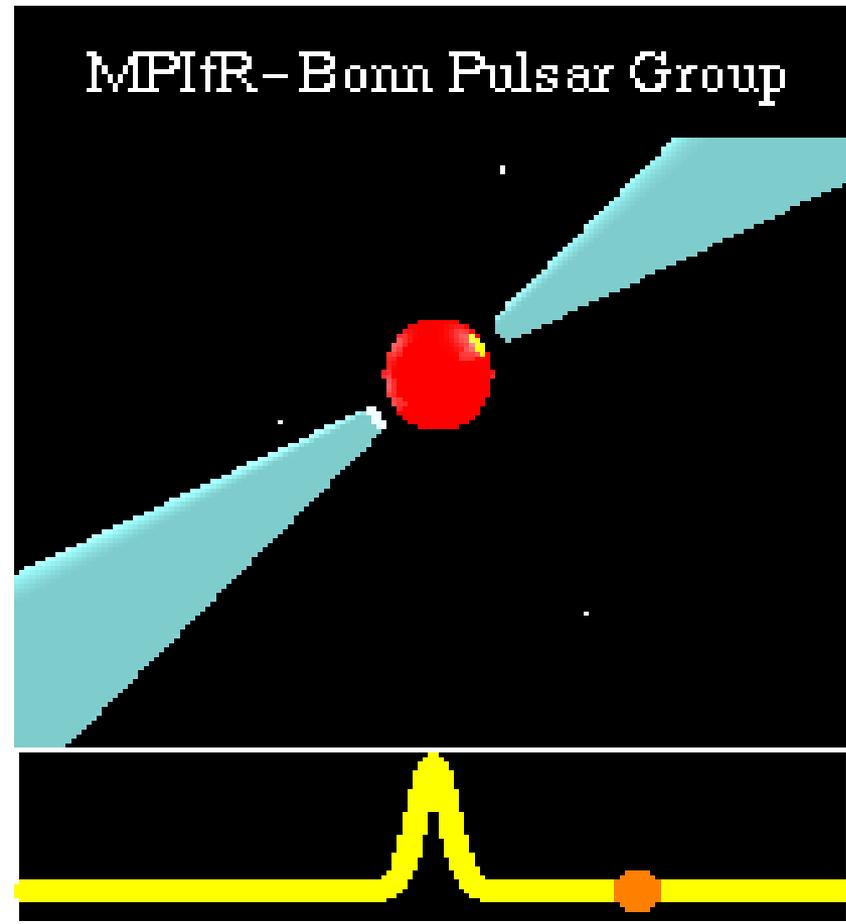


Neutronensterne sind als Pulsare beobachtbar



Neutronensterne sind als Pulsare beobachtbar

Wie kommt es zur *gepulsten* Strahlung ?



Pulsare sind rotationsgetrieben, d.h. die von ihnen abgestrahlte Energie entspricht der Abnahme der Rotationsenergie (Gold 1967; Pacini 1967,68)

Der Crab-Pulsar im Krebs-Supernovaüberrest: (SN 1054)



Krebs-Nebel mit Pulsar: (Radio, optisch, Röntgen)

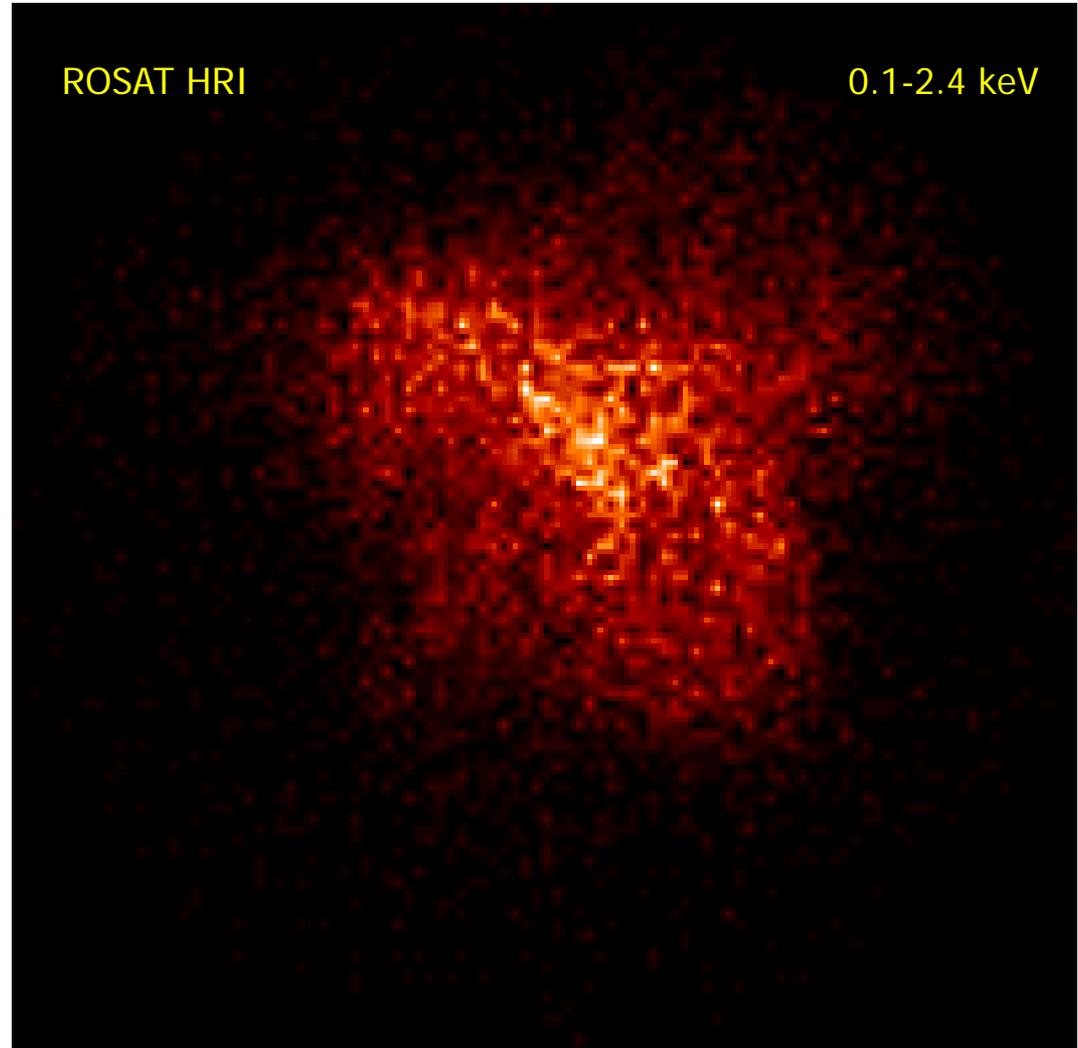
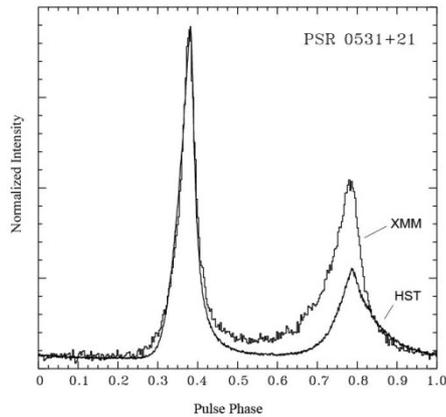
Der Crab-Pulsar im Krebs-Supernovaüberrest: (SN 1054)

- Rotationsperiode 33 ms
- Entfernung 6000 Lj

Vela-Pulsar (P=89 ms) 📢

Crab-Pulsar (P=33 ms) 📢

ms-Pulsar (P=1.6 ms) 📢

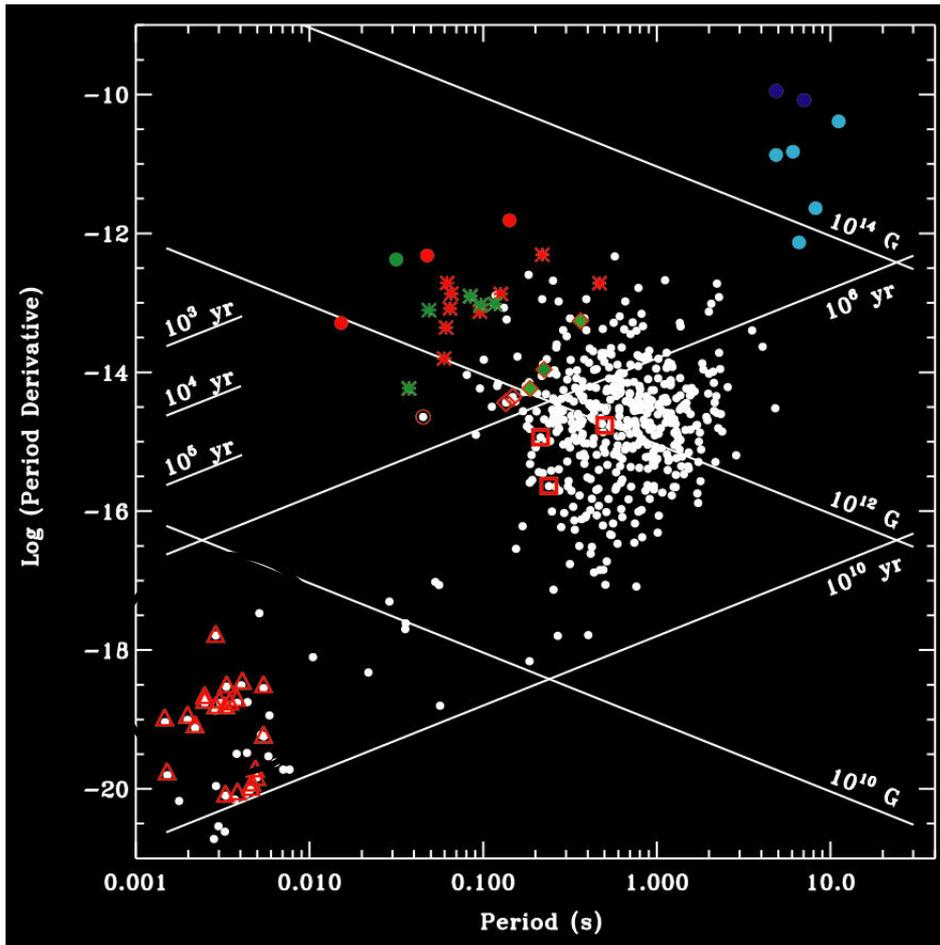


Der Crab-Pulsar im Krebs-Supernovaüberrest: (SN 1054)

- * $I = 10^{45} \text{ g cm}^2$
- * $\Omega = 188.11 \text{ rad s}^{-1}$
- * $\dot{\Omega} = -2.37 \times 10^{-9} \text{ rad s}^{-2}$
- * $E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega^2 \sim 2 \times 10^{49} \text{ erg}$
- * $\dot{E} = I \Omega \dot{\Omega} \sim 4 \times 10^{38} \text{ erg/s}$
- * $|\vec{m}| = \frac{1}{2} B_p R^3$
- * $\dot{E} = -\frac{2}{3 c^3} |\ddot{\vec{m}}|^2$
- * $\dot{E} = -\frac{1}{6 c^3} B_p^2 R^6 \Omega^4 \sin^2 \alpha$
- * $B_p = 2.1 \times 10^{20} \sqrt{\dot{\Omega} / \Omega^3}$
- * $\tau \equiv -\frac{1}{2} \Omega / \dot{\Omega}$



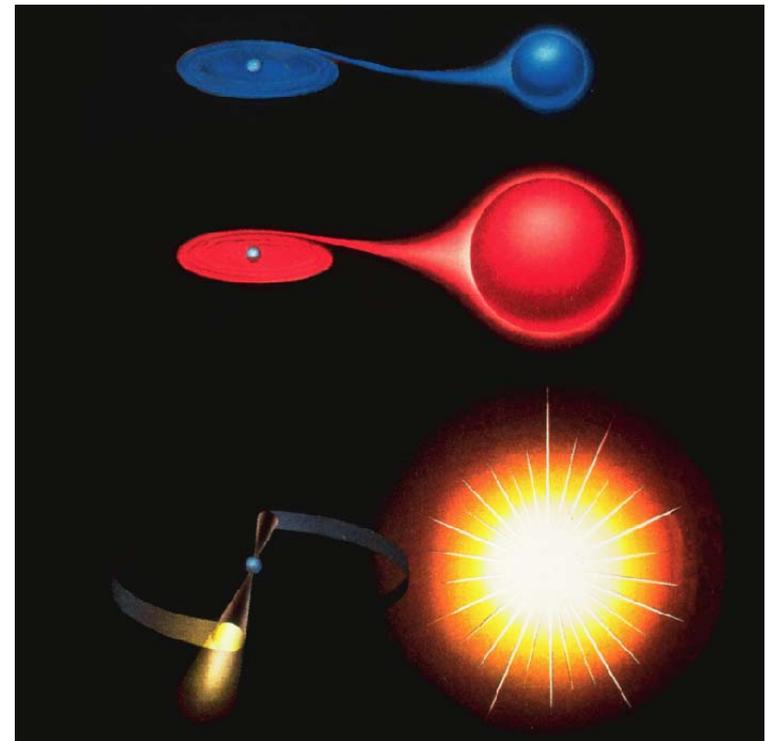
80 rot. getr. Pulsare im Röntgenbereich detektiert



~40 davon sind Millisekundenpulsare

12 dieser ms-Pulsare befinden sich im Globular Cluster 47 Tuc

1 ms-Pulsar im Globular Cluster M28



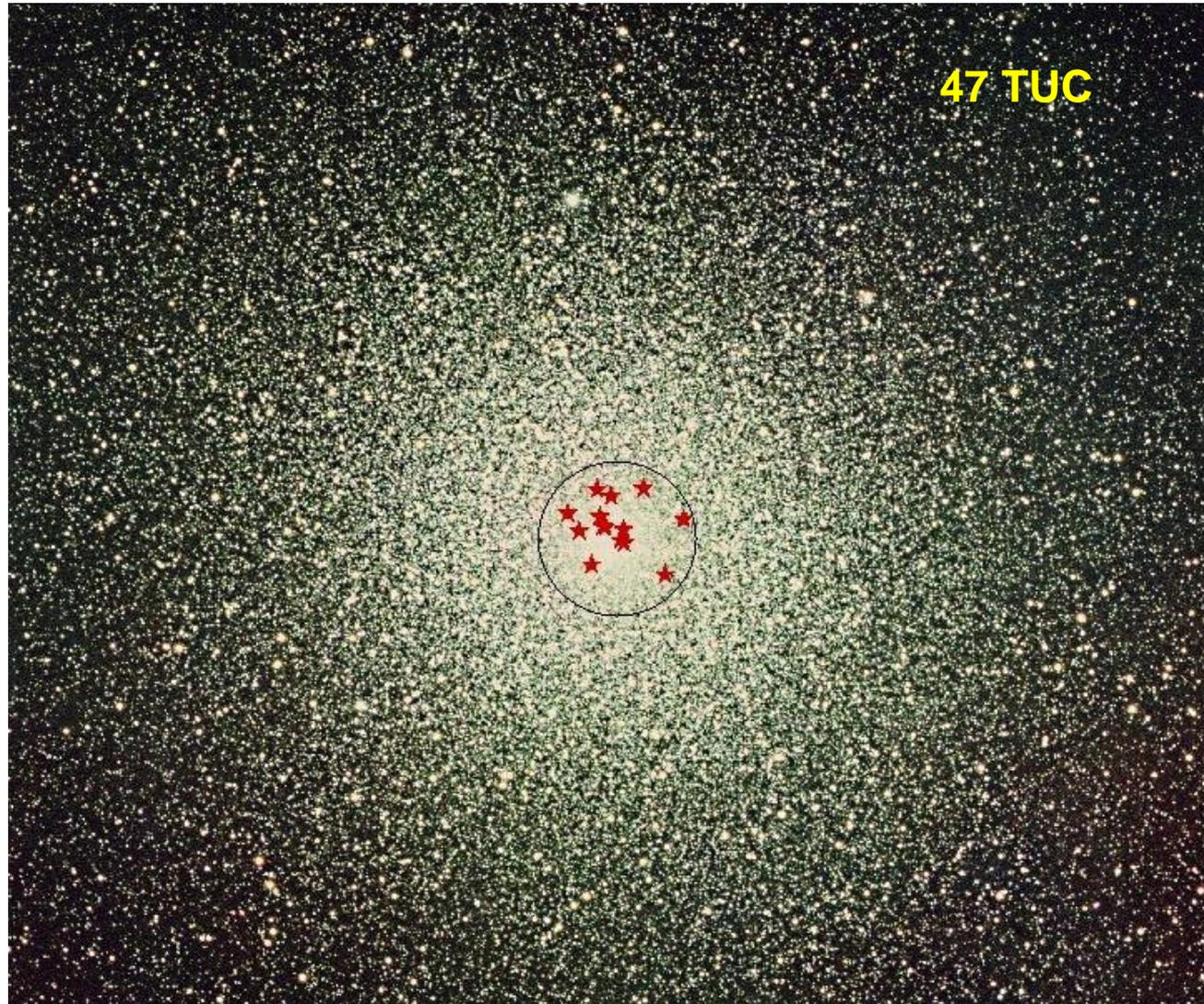
Zur Entstehung von Millisekundenpulsaren

Millisekundenpulsare i Kugelsternhaufen: z.B. 47TUC oder M28

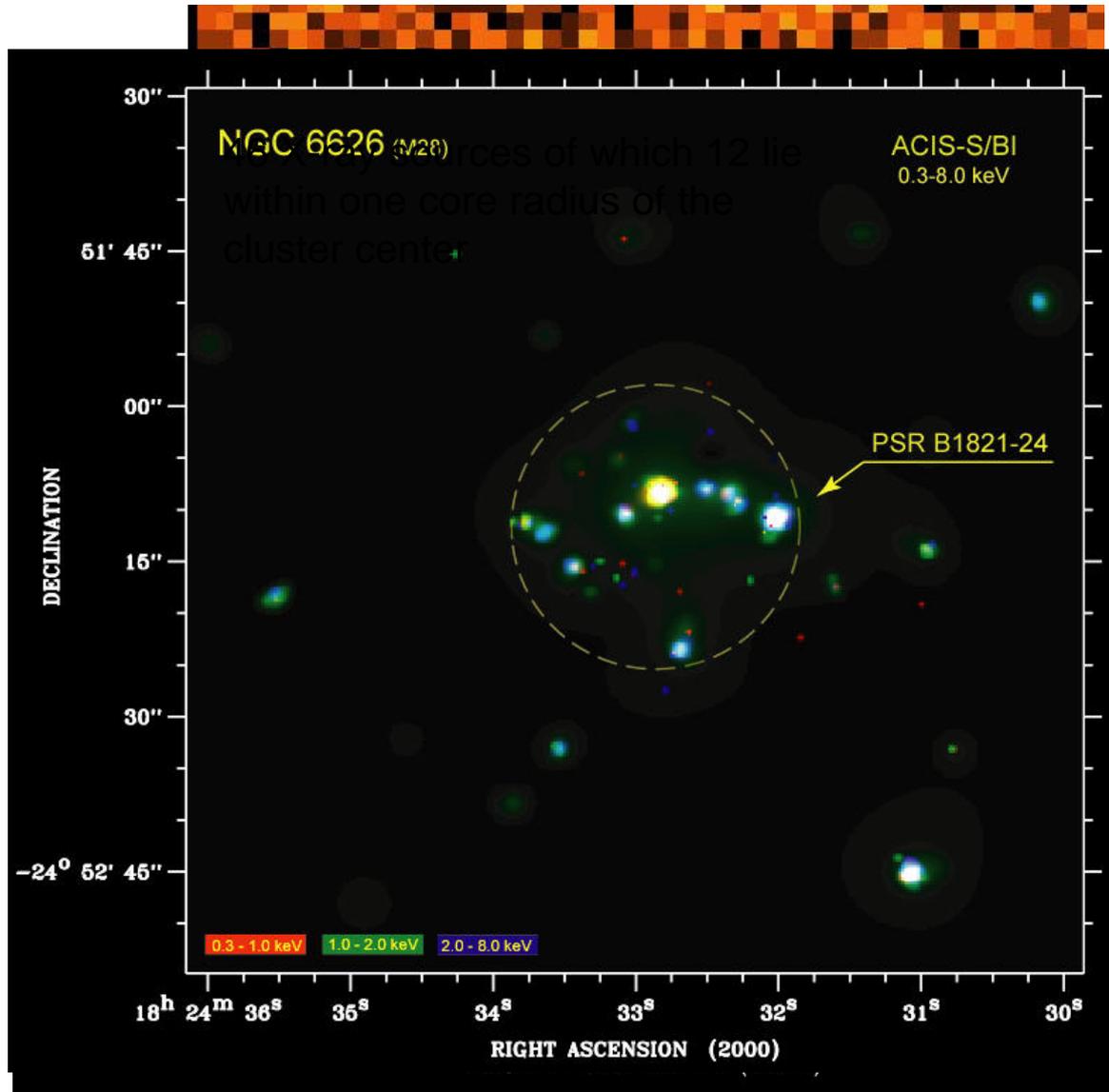
Sound eines jeden
einzelnen ms-Pulsars
in 47TUC



Sound aller
ms-Pulsare in 47TUC



Millisekundenpulsare in Kugelsternhaufen

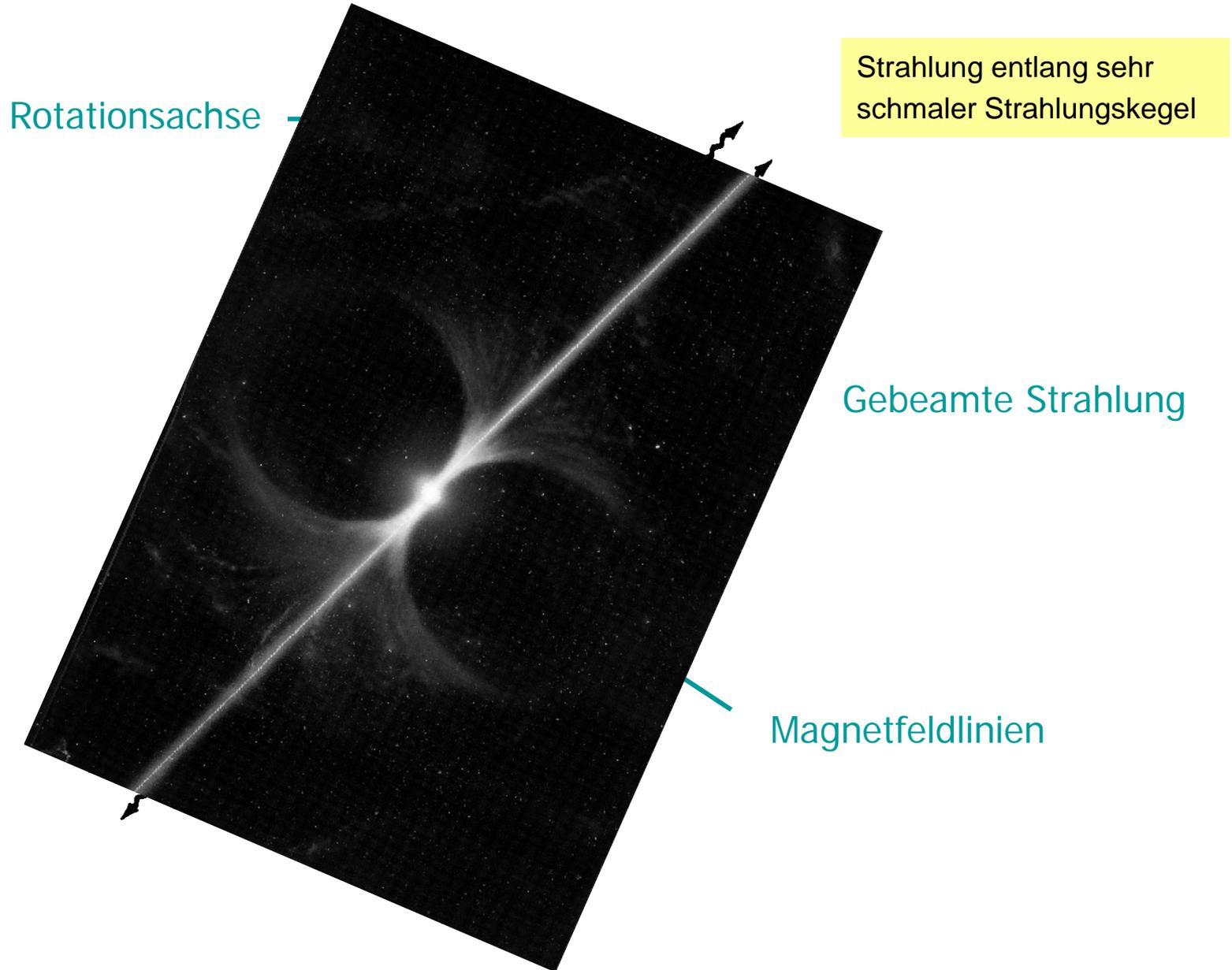


Der Crab-Pulsar im Krebs-Supernovaüberrest: (SN 1054)

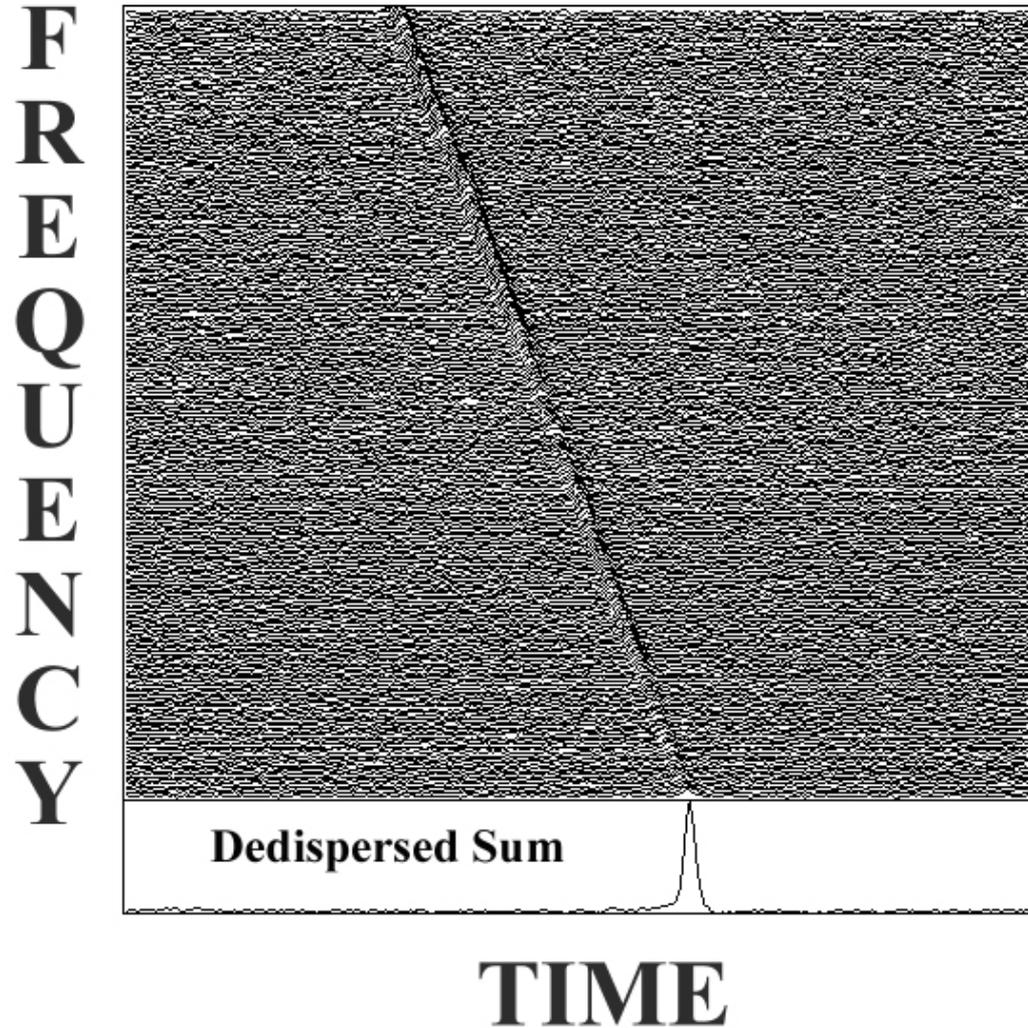


Krebs-Nebel mit Pulsar: (Radio, optisch, Röntgen)

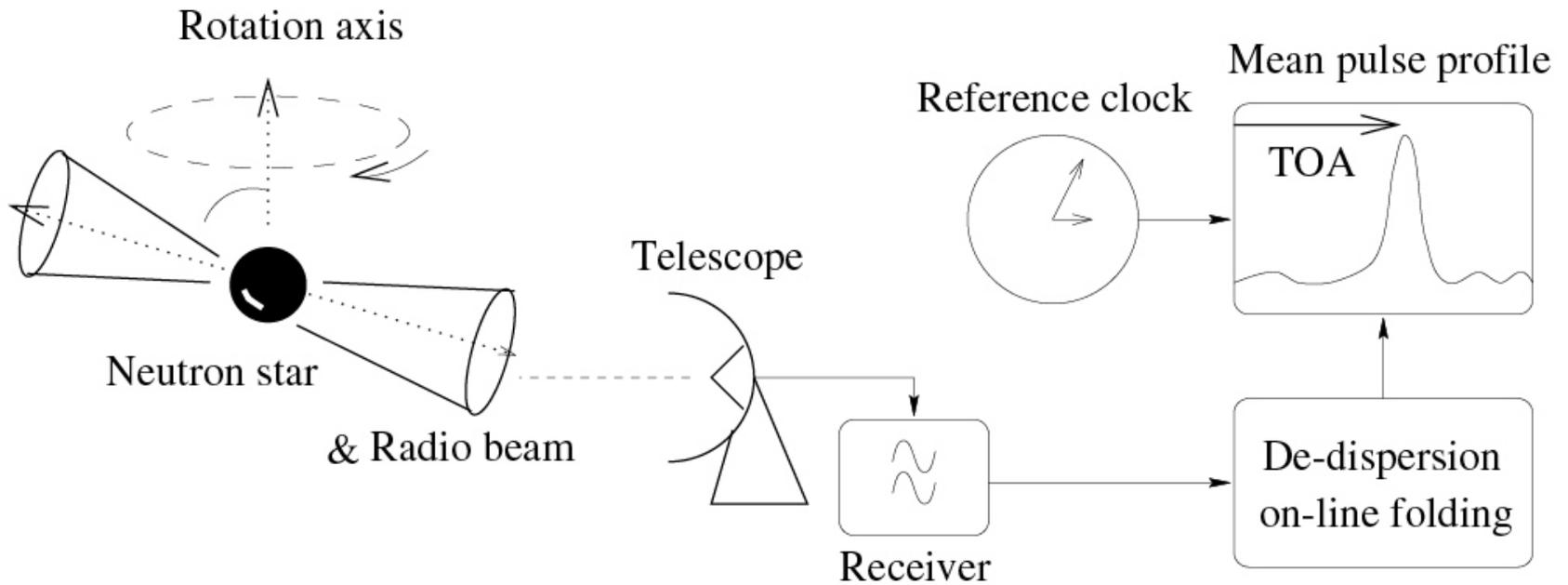
Neutronensterne sind als Pulsare beobachtbar



Zur Dispersion des interstellaren Mediums



Pulsar-Timing (TOA Messungen)



Barizentrumskorrektur der Pulsankunftszeiten (TOA)

