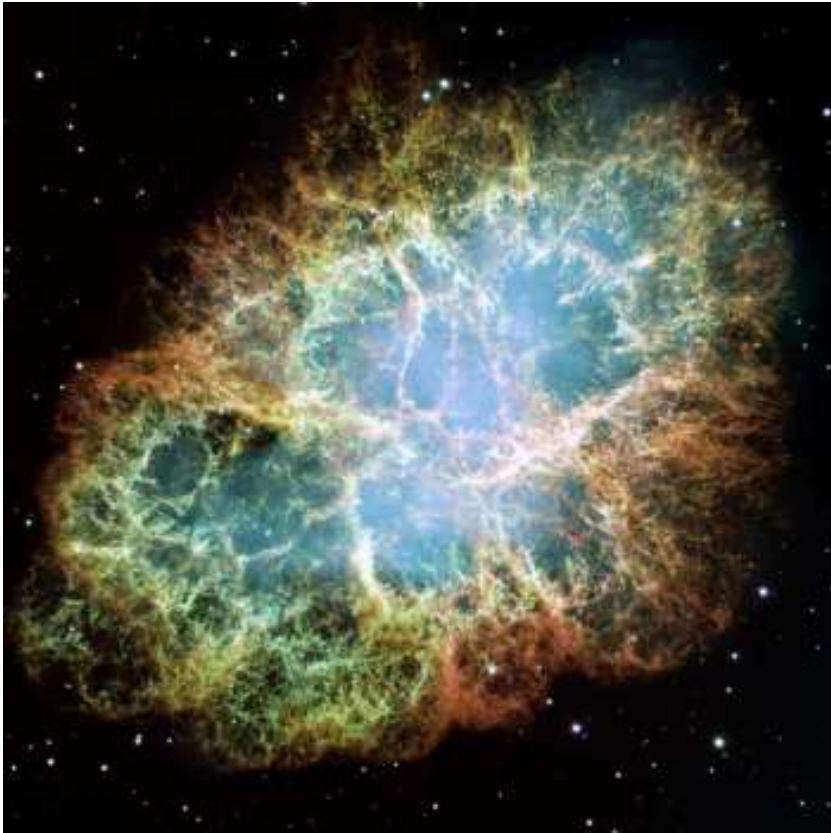


# Neutronensterne – Überlegungen und Materialien für Unterricht und Lehre

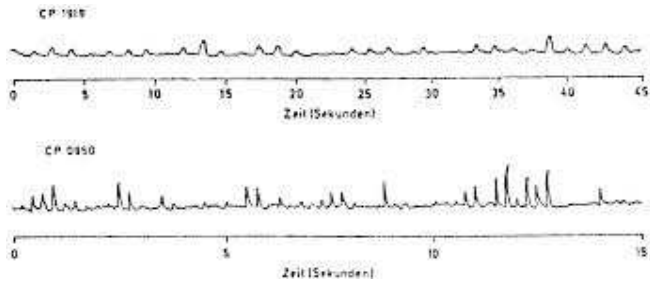
[http://www.physik.uni-siegen.de/didaktik/materialien\\_offen/fortbildungen/](http://www.physik.uni-siegen.de/didaktik/materialien_offen/fortbildungen/)

Oliver Schwarz  
Institut für Didaktik der Physik /  
Universitätssternwarte  
Universität Siegen

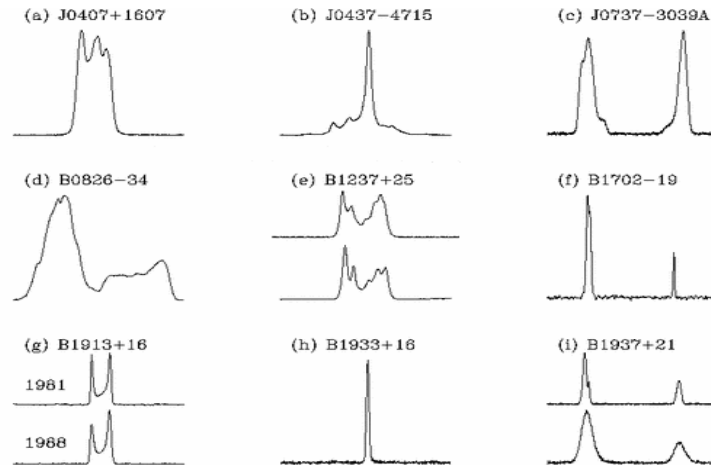




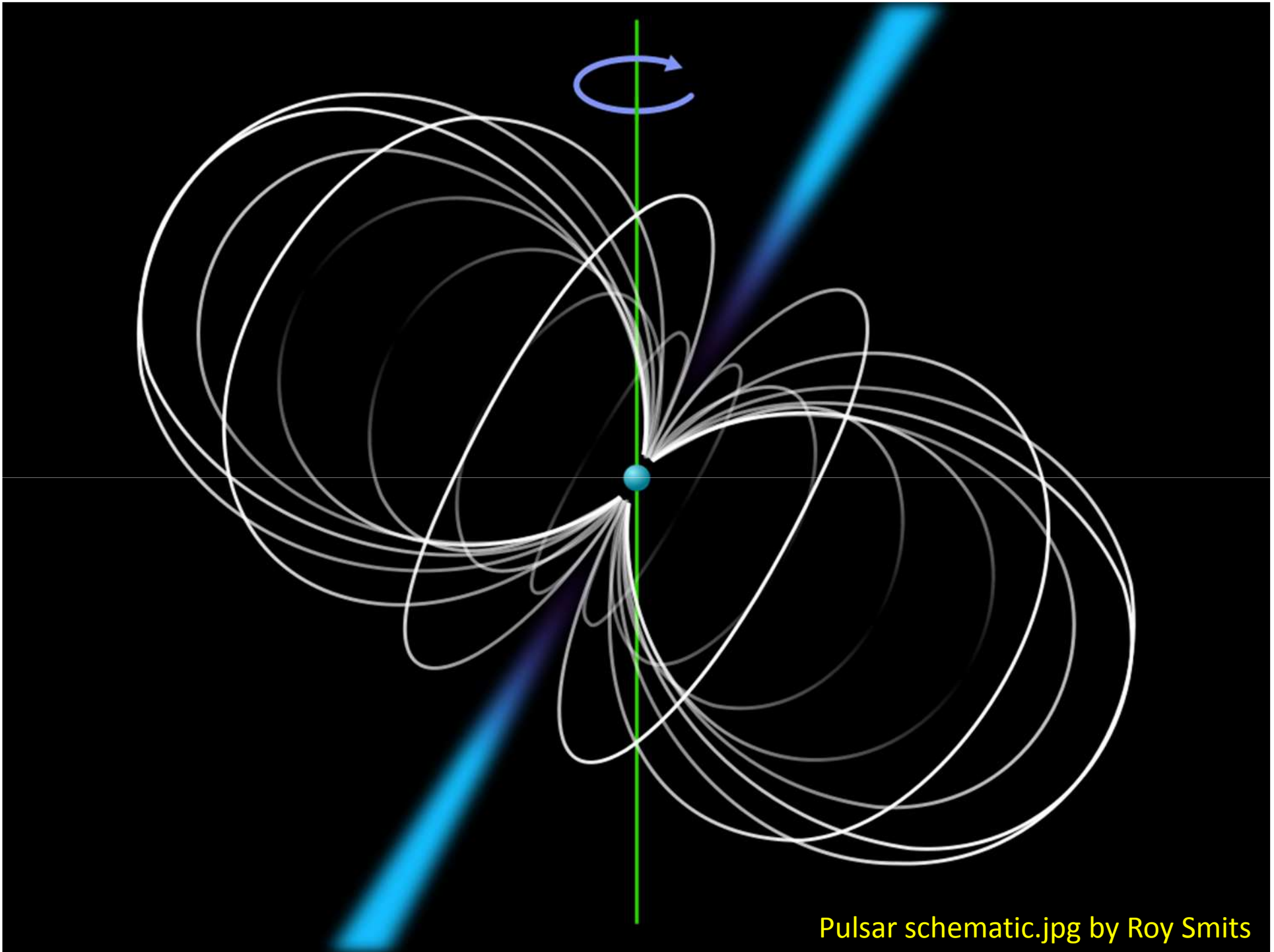
NASA/HST/ASU/J. Hester et al.  
X-Ray: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.



Quelle: Handbook of Pulsar Astronomy



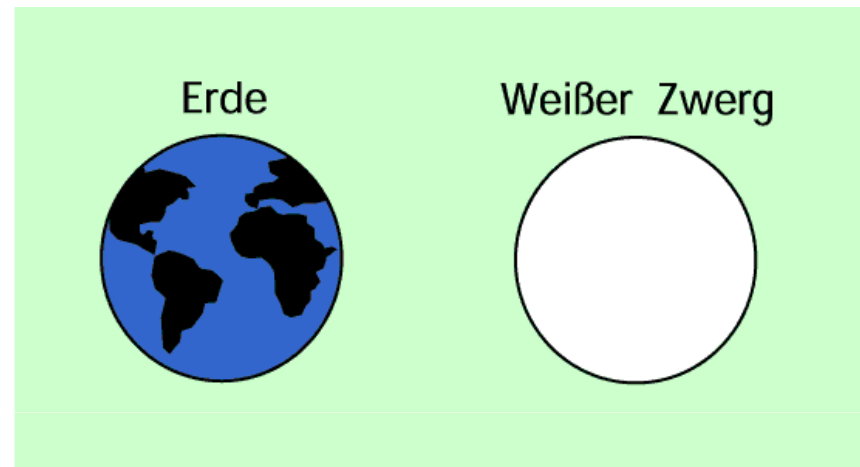
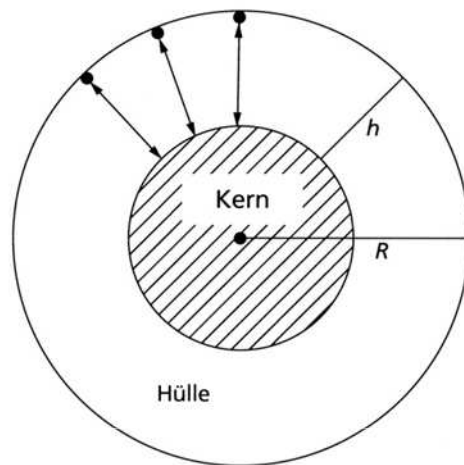
„Ein **Neutronenstern** ist ein astronomisches Objekt mit einer extrem hohen Dichte (?) und einem typischen Durchmesser von etwa 20 km (?) bei einer Masse von etwa 1,44 bis 3 Sonnenmassen(???). Er steht am Ende seiner Sternentwicklung und stellt damit das Endstadium eines Sterns einer bestimmten Massenklasse dar. Er besteht aus einer besonderen Materieform von Neutronen, die im Zentrum eine Dichte von etwa  $10^{11} \text{ kg/cm}^3$ <sup>[1]</sup> bis zu  $2,5 \cdot 10^{12} \text{ kg/cm}^3$ <sup>[2]</sup> aufweist (??? ???). Das heißt, ein Kubikzentimeter dieser Art von Materie hat etwa die Masse eines Eisenwürfels von 700 m Kantenlänge. Dies entspricht der Größenordnung der Dichte von Atomkernen.<sup>[3]</sup> Neben dieser Neutronenmaterie könnte im Zentrum auch ein Kern aus einem Quark-Gluon-Plasma vorliegen. Ein solches hypothetisches Gebilde wird Quarkstern genannt (???). Neutronensterne zählen nicht nur wegen ihrer Dichte, sondern auch wegen anderer physikalischer Größen wie etwa der Stärke ihres Magnetfeldes (???) oder ihrer Temperatur zu den interessantesten bisher bekannten kosmischen Objekten.“ (Zitat Wiki)



Pulsar schematic.jpg by Roy Smits

- Klassische Verständniswege zum Neutronenstern (Einige Grundeigenschaften werden plausibel gemacht)
- Warum sich Neutronensterne bilden können (Virialsatz, etwas Kernphysik, inverser Beta-Zerfall)
- Ein Beispiel für die „elektromagnetische Botschaft“ von Neutronensternen

# Es ist keine Schwingung eines Weißen Zwerges!



$M=1M_{\text{Sonne}}$ ,  $G$ : Grav.-konstante

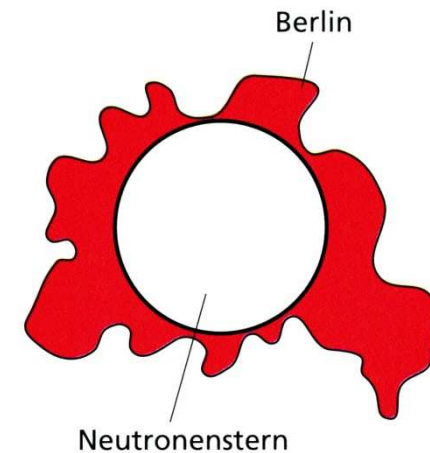
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cong 2\pi \sqrt{\frac{R \cdot R^2}{G \cdot M}} \cong \sqrt{\frac{1}{G\rho}}$$

T/s	$\rho/\text{kgm}^3$	R/km
0,1	$10^{12}$	$10^3$ (Weißer Zwerg?)
0,002	$10^{15}$	$10^2$ (kein Weißer Zwerg!)

- Schwingung – unverträglich mit nur einer Objektklasse
- Weitere Gründe: Schwingungstheorie Weißer Zwerge  $T \cong 1$
- Periodendauer nimmt mit der Zeit ab!  
Vergleiche mit Formel für eine Schwingung
- ...

# Eine Eigendrehung und was folgt daraus?

- $M=M_{\text{sonne}}, T=1,4 \times 10^{-3} \text{ s}$
  - $\frac{2\pi R}{T} < c \rightarrow R < \frac{cT}{2\pi} \rightarrow R \cong 70 \text{ km}$
  - Kräftegleichgewicht:  $m \frac{v^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}$
- $$R = \left( \frac{GMT^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \rightarrow R \cong 20 \text{ km}$$
- Dichte:  $\rho \cong \frac{M}{R^3} = 10^{14} - 10^{15} \text{ kg m}^{-3}$





# Was bedeutet dieser kleine Radius?

H-Atome zu Kugeln formen:

$$V = \frac{M}{m_p} (10^{-10} m)^3 \rightarrow R = 10^6 km$$

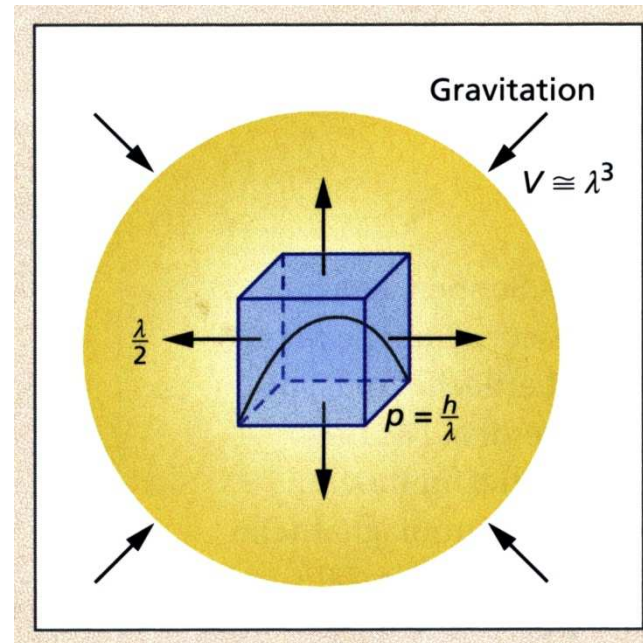
Anschauliche Annäherung an  
den Entartungsdruck –  
Voraussetzung: hohe Dichten!  
m Neutronenmasse!

$$\lambda = \frac{h}{mc}$$

$$N = \frac{M}{m}$$

$$V = \frac{1}{8} \left( \frac{h}{mc} \right)^3 \frac{M}{m}$$

$$D \cong 10 km$$

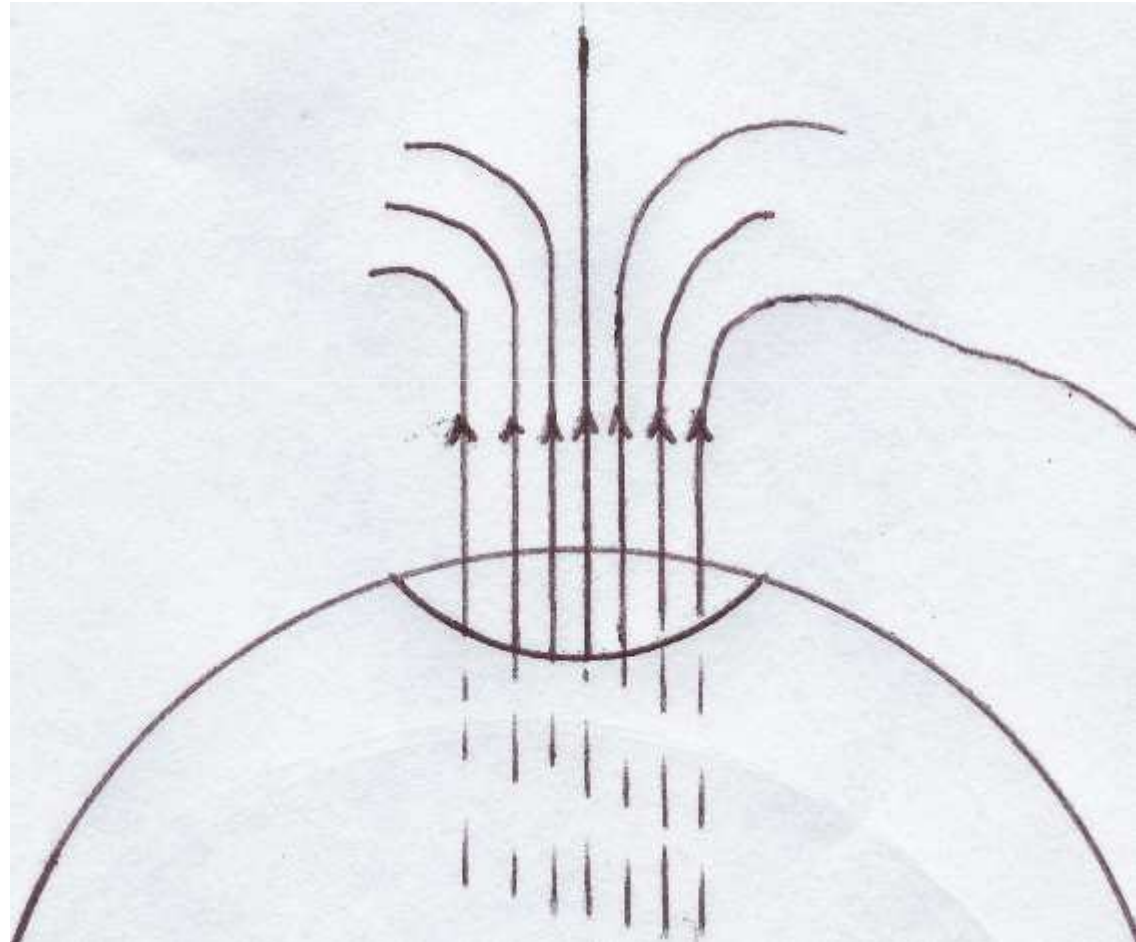


# Neutronensterne besitzen extrem starke Magnetfelder

$$\Phi = BA$$

für  $\vec{B}$  pa.  $\vec{A}$  und  
magn. Feld  
homogen

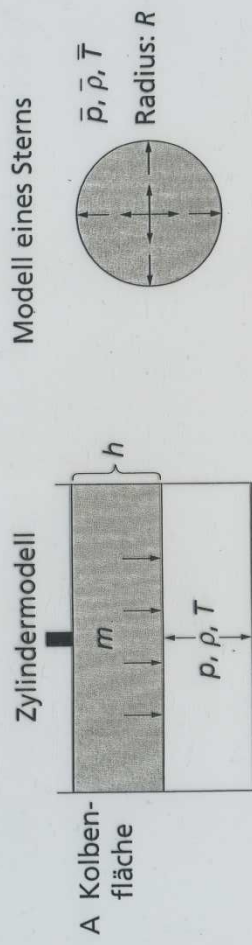
$B = 10^8 \text{ T}$   
(und mehr)



# Warum können sich solche Objekte überhaupt bilden?

- Sternentwicklung und das Verhalten von Objekten, die durch Gravitation geformt werden (Kugeln im All)
- Beta-Zerfall und inverser Beta-Zerfall

## Physikalische Modellierung eines Sterns

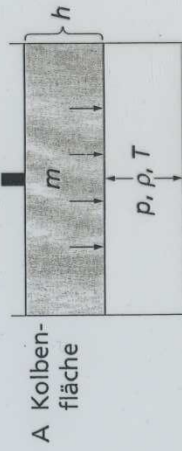


Beide physikalischen Systeme werden durch ähnliche physikalische Größen gekennzeichnet. Es können analoge Größen betrachtet werden.

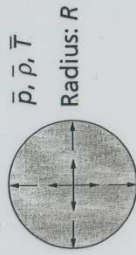
$$\begin{array}{l}
 \rho, \rho, T \quad \Rightarrow \quad \bar{\rho}, \bar{\rho}, \bar{T} \\
 \bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi \cdot R^3} \sim \frac{M}{R^3} \quad (1) \\
 \bar{g} = G \cdot \frac{M}{R^2} \sim \frac{M}{R^2} \quad (2) \\
 h \quad \Rightarrow \quad R
 \end{array}$$

## Das statische Verhalten der Modelle

Zylindermodell



Modell eines Sterns



Der Kolben verharrt in Ruhe, wenn der durch seine Gewichtskraft erzeugte Druck (Schweredruck) durch den Druck des Gases kompensiert wird.

$$p_g = p_s$$

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

$$p_s = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{m \cdot g \cdot h}{A \cdot h} = \frac{m \cdot g \cdot h}{V}$$

$$p_s = \rho \cdot g \cdot h$$

$\Rightarrow \bar{p}_s = \bar{\rho} \cdot g \cdot h$  und mit (1) und (2):

$$\bar{p}_s \sim \frac{M}{R^3} \cdot \frac{M}{R^2} \cdot R$$

$$\bar{p}_s \sim \frac{M^2}{R^4} \quad (3)$$

Gesetz des idealen Gases

$$p_g \cdot V = m \cdot R_g \cdot T \quad (R_g: \text{Gaskonstante})$$

$$p_g = \frac{m \cdot R_g \cdot T}{V} = \rho_g \cdot R_g \cdot T \Rightarrow \bar{p}_g = \bar{\rho} \cdot R_g \cdot \bar{T} \Rightarrow \bar{T} \sim \frac{\bar{p}}{\rho} \sim \frac{M^2}{R^4} \cdot \frac{R^3}{M}$$

$$\Rightarrow \bar{T} \sim \frac{M}{R} \quad (4)$$

(LANESCHES GEsETZ)

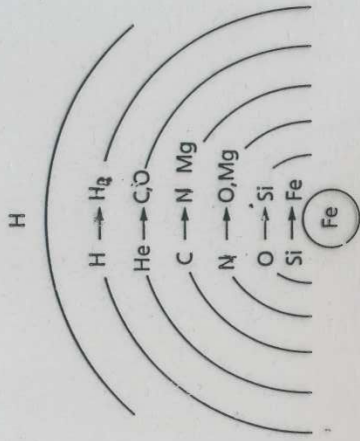
Es folgt:

Damit der Kolben in Ruhe verharrt, muß das Gas die Temperatur  $T = p_g / \rho_g \cdot R_g$  besitzen.

Die mittlere Temperatur des Sterns beträgt:

$$\bar{T} = \frac{\bar{p}_g}{\rho_g R_g}$$

Der Stern ist stabil, wenn in jedem inneren Punkt der nach innen gerichtete Schweredruck durch den Druck des Sterns kompensiert wird.



„Eisenspitze“

Supernova

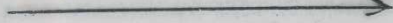
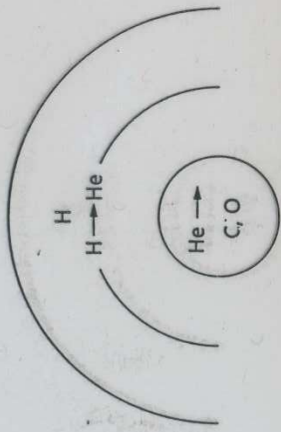


$$\frac{1}{2}$$

$$t = (GP) \approx 1s$$

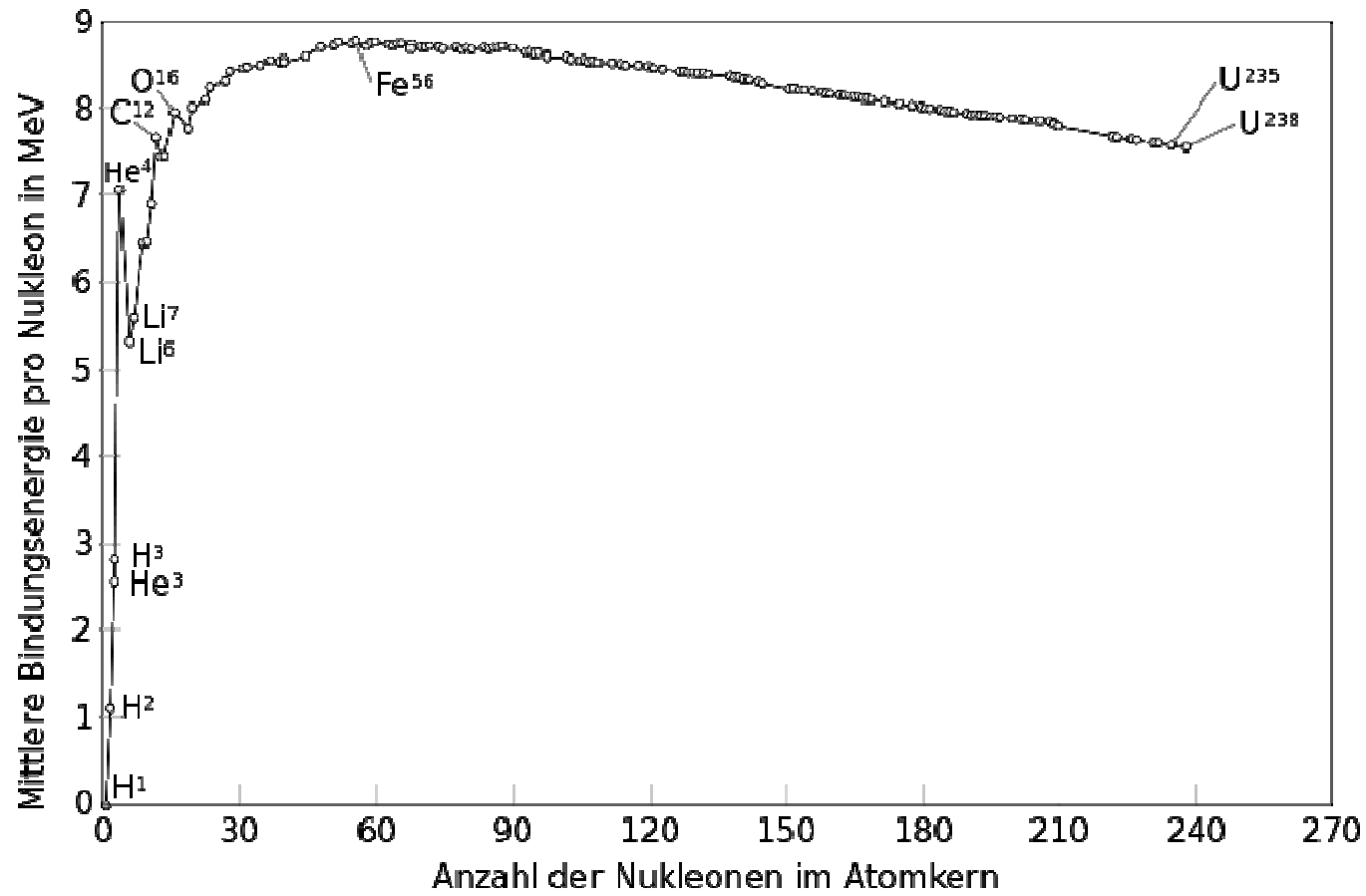


Neutronensterne



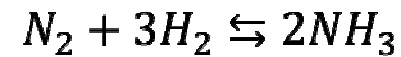
Weiße Zwerge

# Bindungsenergie pro Nukleon

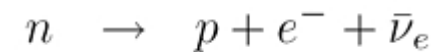


# Gleichgewichtsreaktionen in der Teilchenphysik

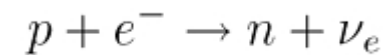
Im Chemieunterricht bestens bekannt (z.B.  
Ammoniaksynthese)



Im Physikunterricht: Beta-Zerfall

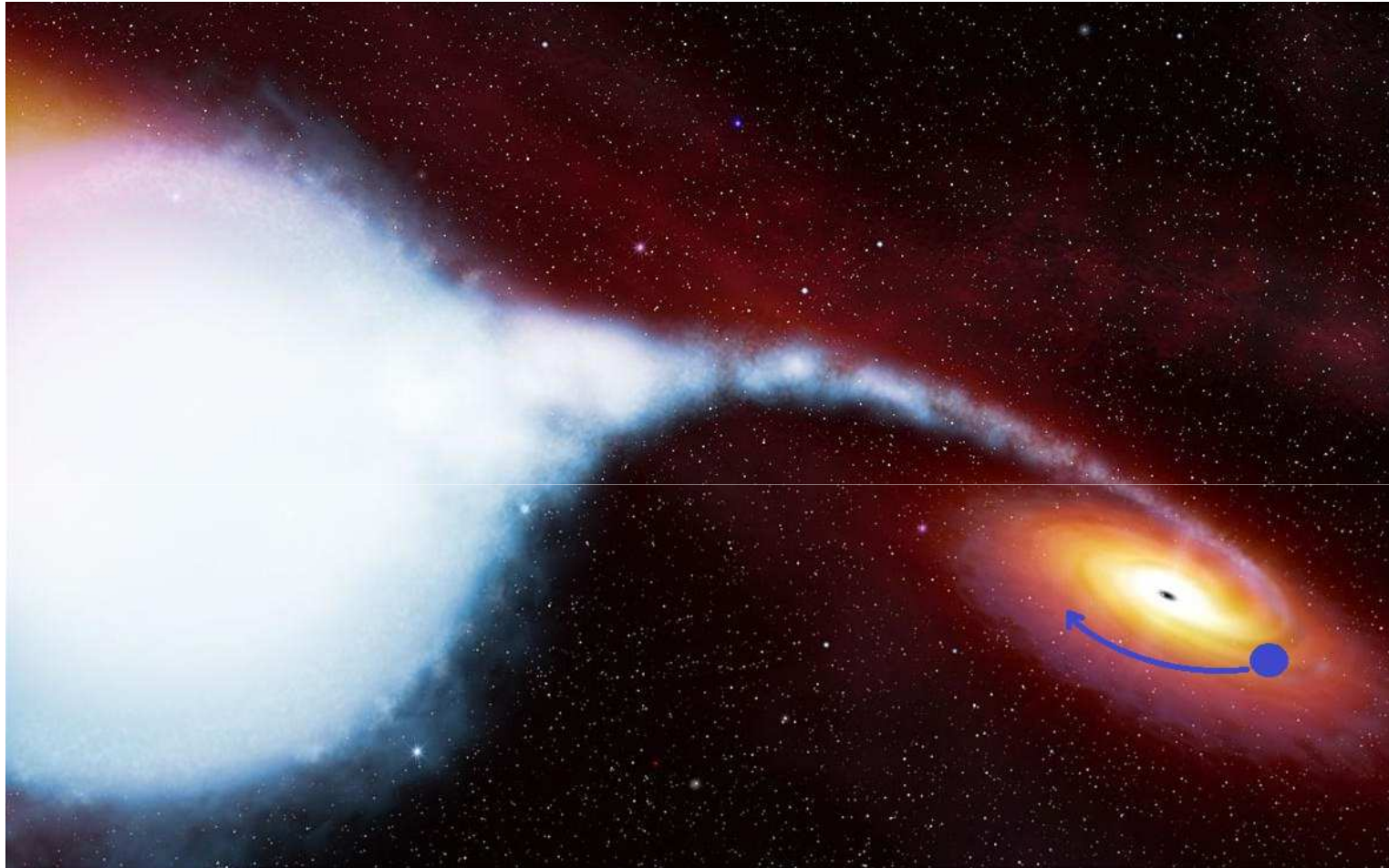


Inverser Beta-Zerfall



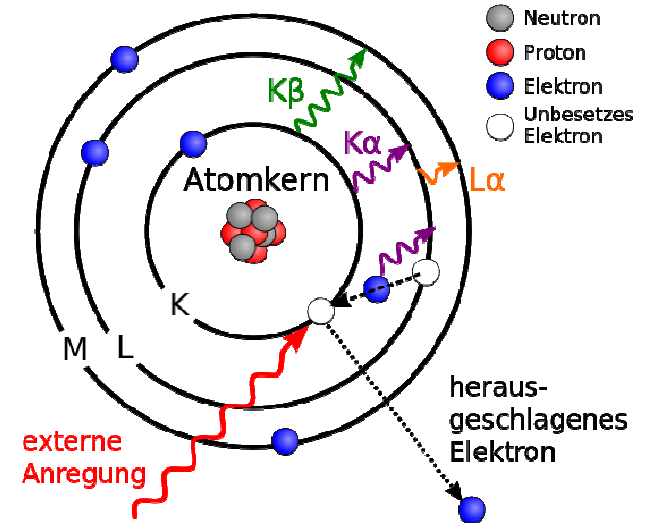
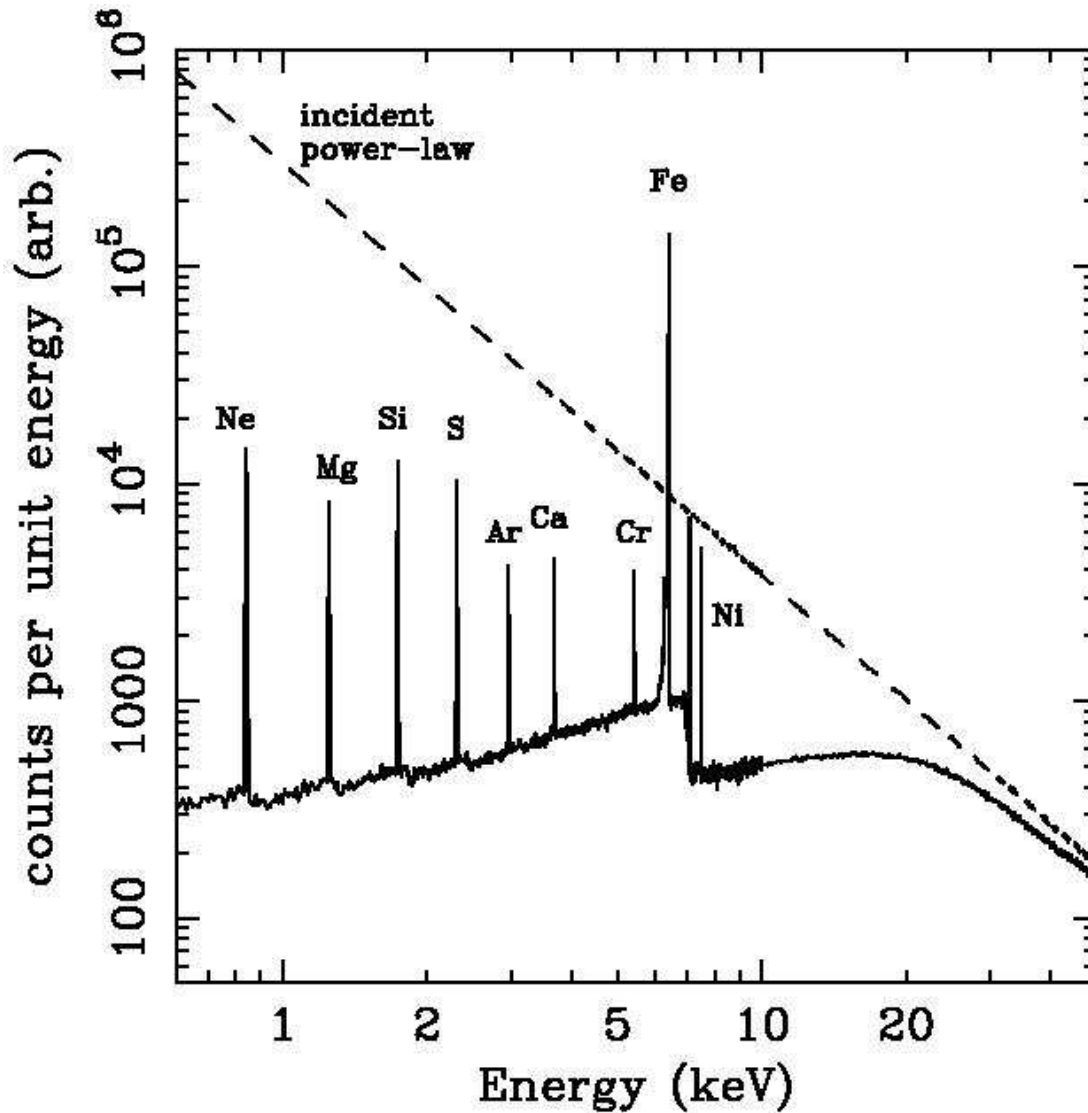


# Die Information steckt im „Licht“



Klassischer Dopplereffekt – SRT (Beaming) – ART (Gravitationsrotverschiebung)

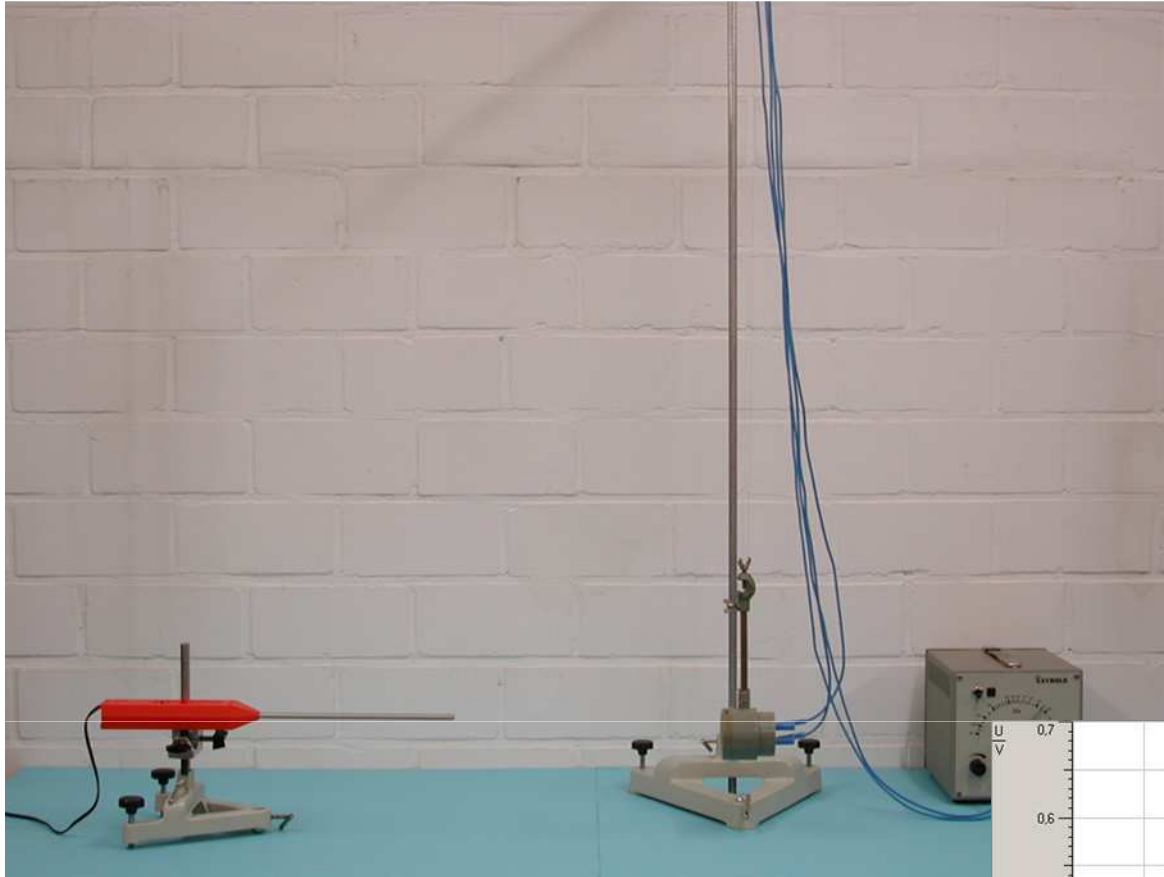
# K-alpha Eisenlinie in Akkretionsscheiben



Stichwörter für die Schule:  
 Röntgenstrahlung,  
 Röntgenröhre,  
 Bremspektrum,  
 charakteristisches Spektrum

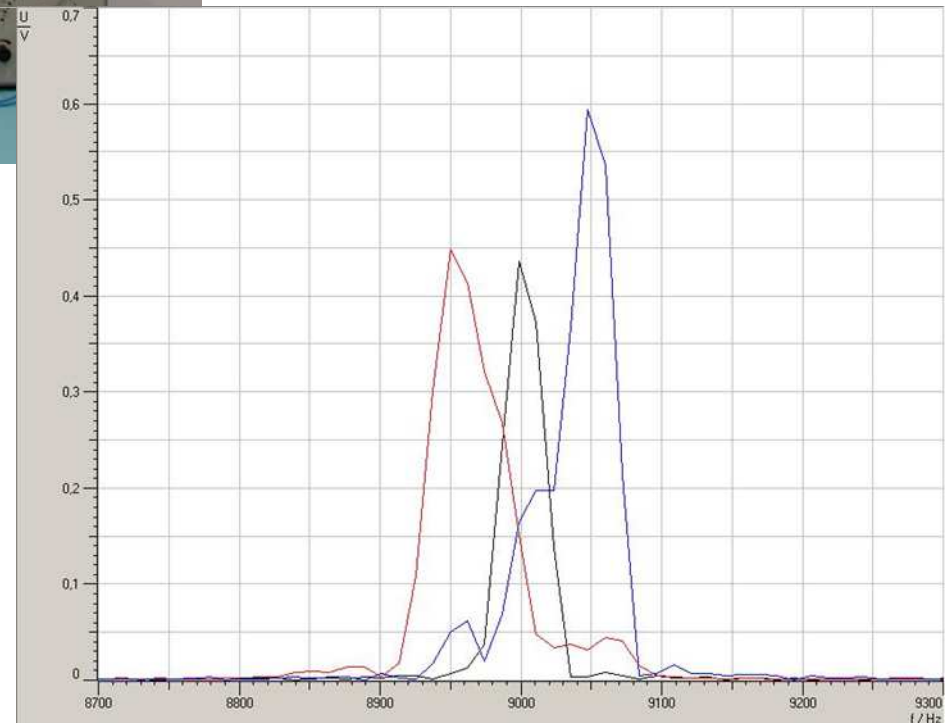
<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Fabian4/Figures/figure1.jpeg>

The basics of the broad iron line

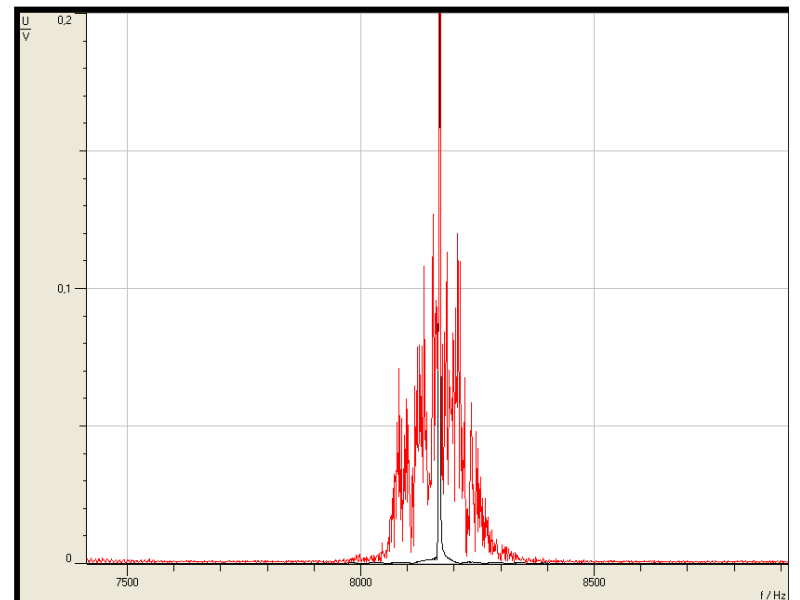
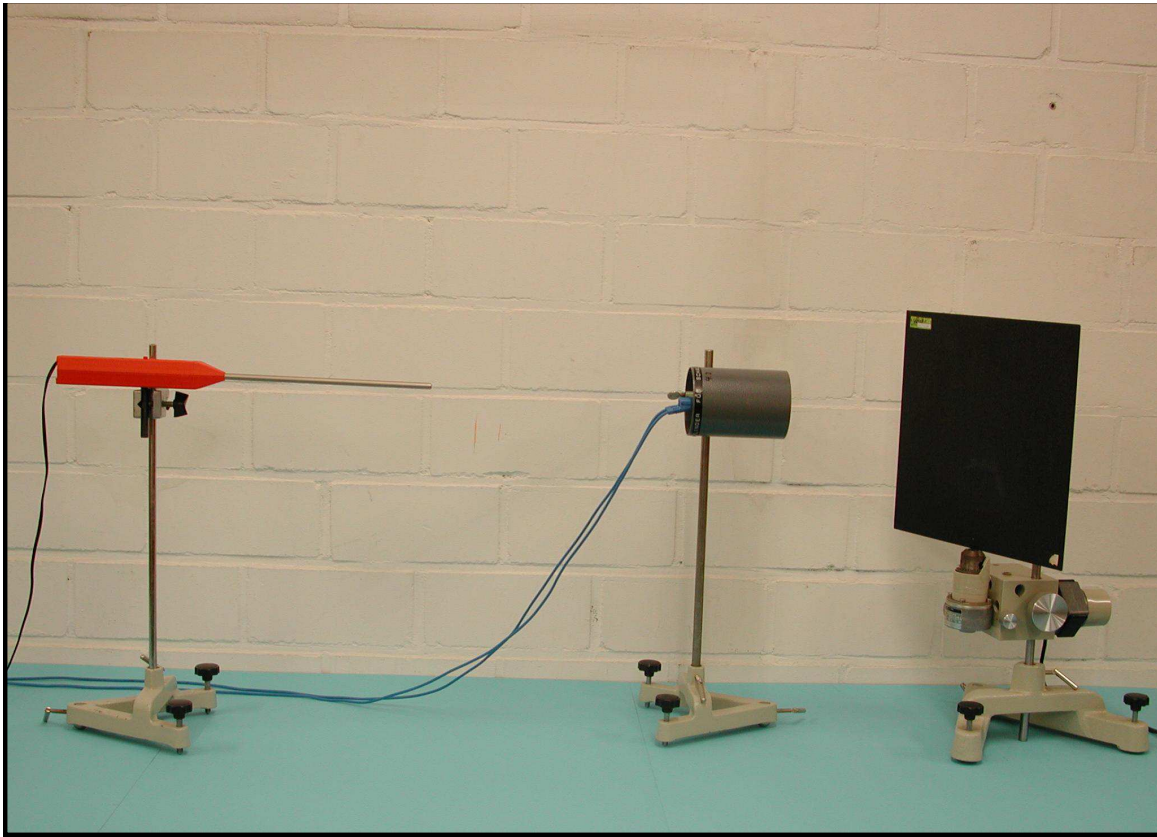


Klassisch -  
Messung in Ruhe und  
entweder beim Hin- oder  
beim Herbewegen

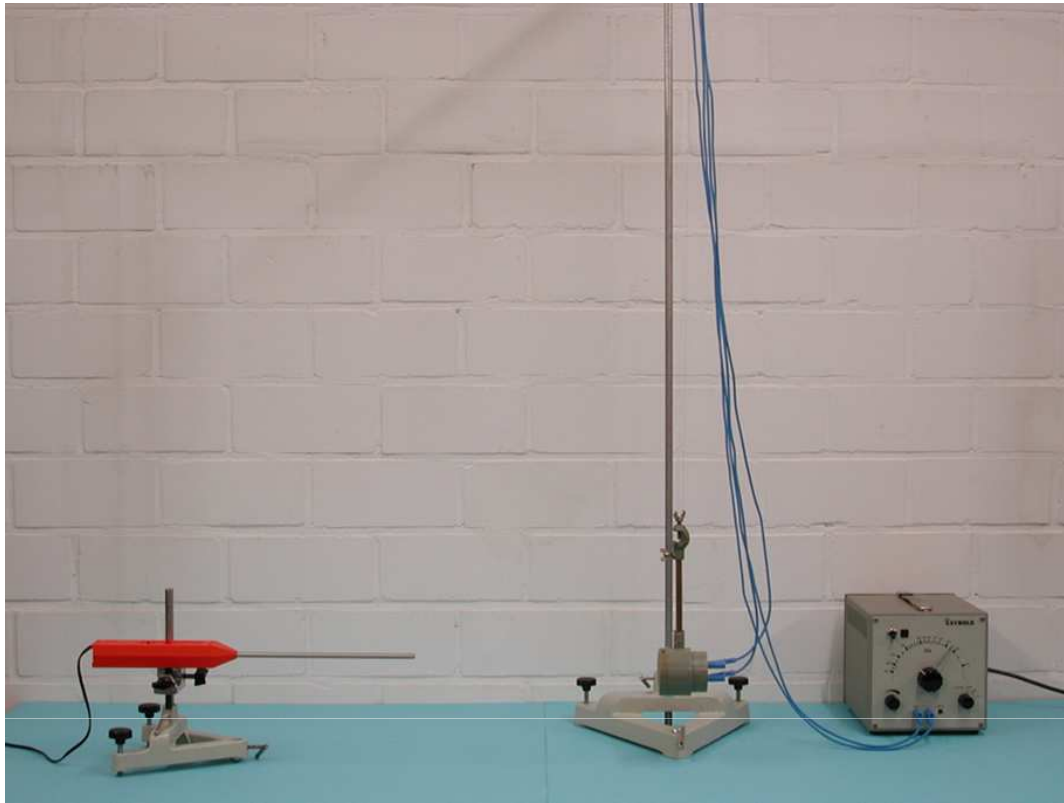
P. Vogt, O. Schwarz, A. Walther, Doppler-Messungen am  
Mikrofonpendel, Praxis der Naturwissenschaften, Physik,  
3/53, 2004, S. 8-10



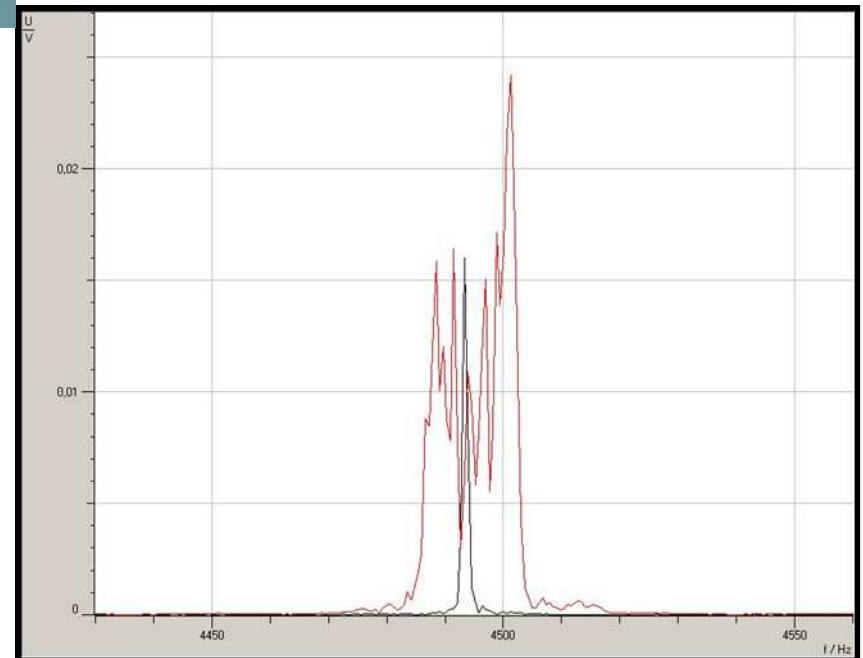
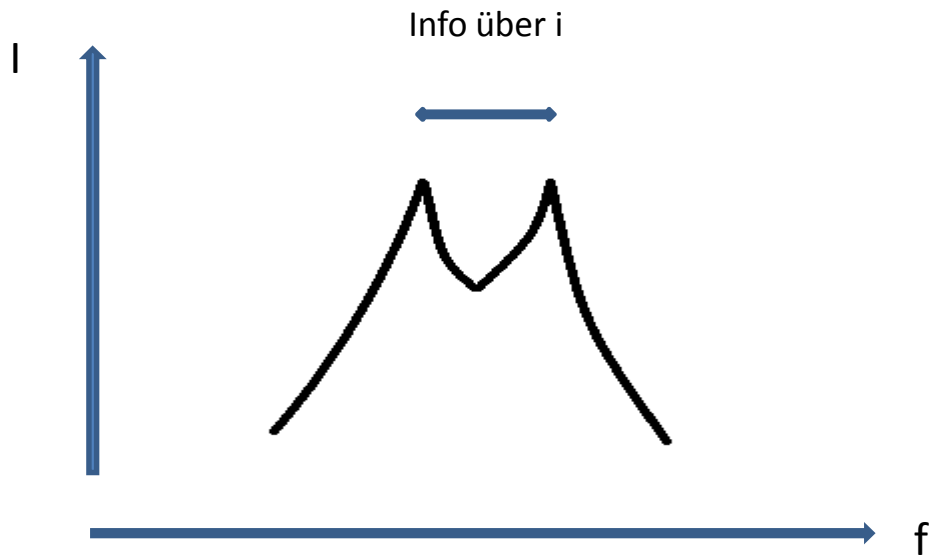
Klassische  
Dopplerverbreiterung







Idealisieren Kreisbewegung  
als Pendelbewegung -  
Messung über die gesamte  
Pendelperiode hinweg, die  
schwarze Linie ist die  
Ruhelinie.

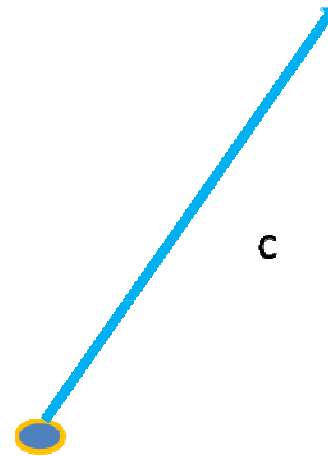


# SRT – kinematische Effekte der schnellen Bewegung



System S'

v ist fast c



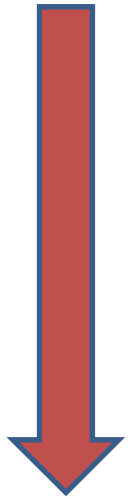
System S

Resultat: Die Strahlung wird in Bewegungsrichtung gebündelt.

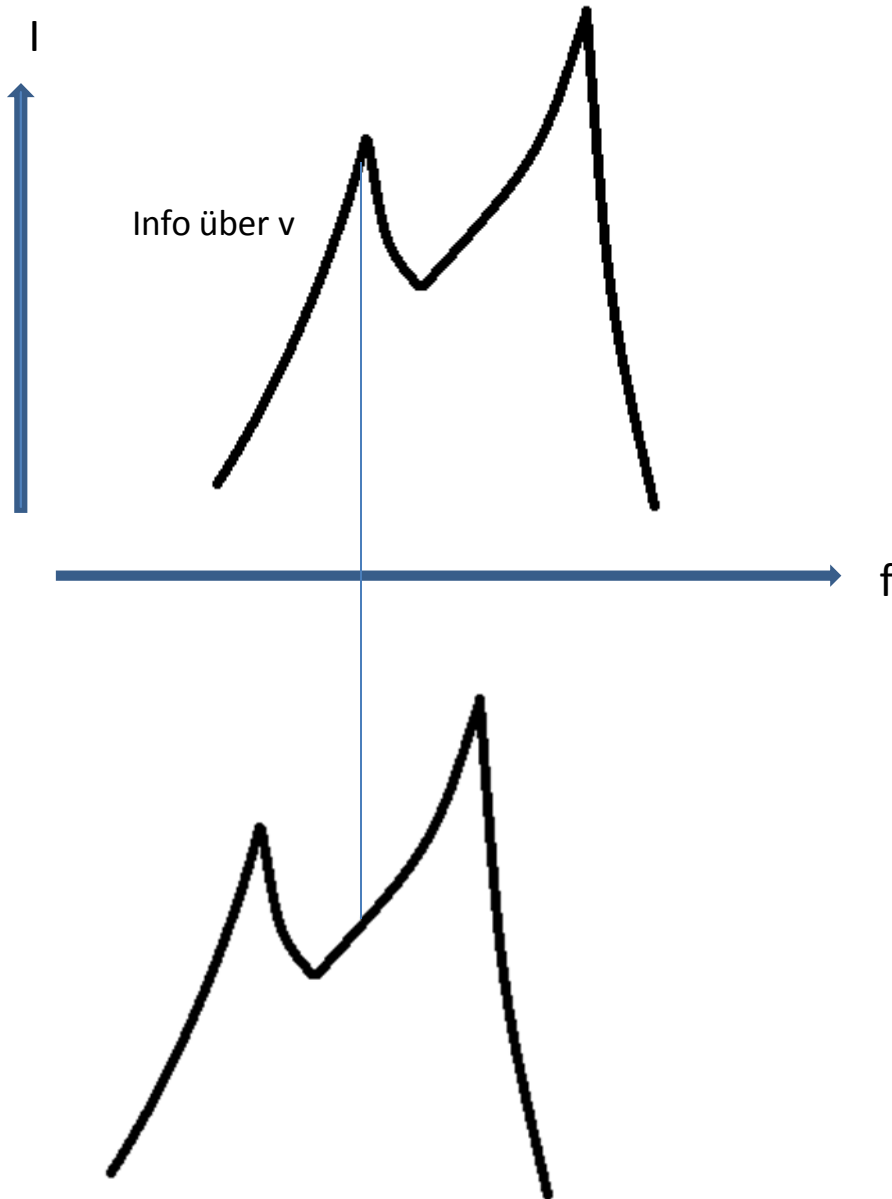
$$u_x = \frac{u_x' + v}{1 + \frac{u_x' \cdot v}{c^2}} = v$$

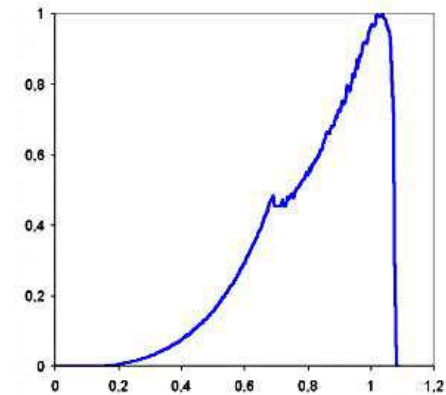
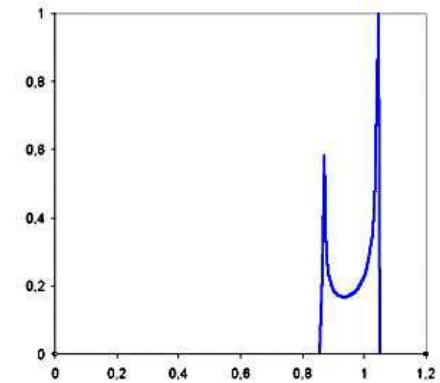
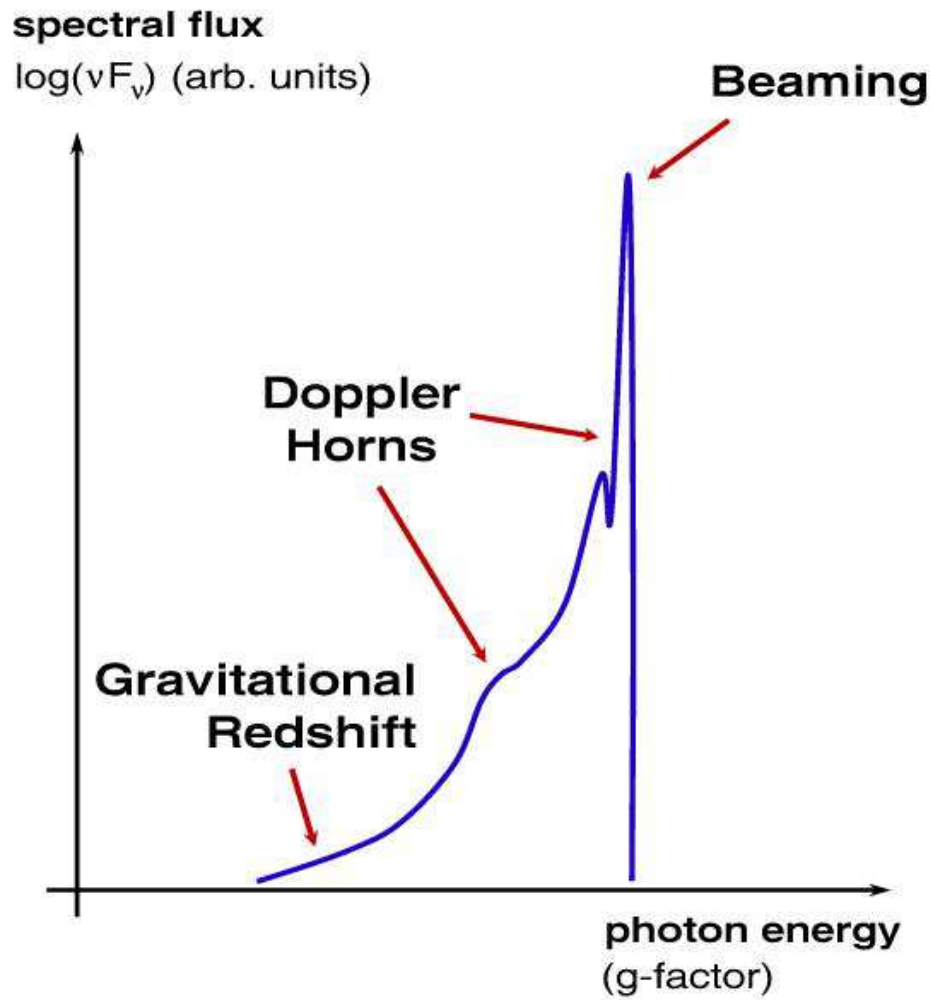
$$u_y = \frac{u_y' \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + \frac{u_x' \cdot v}{c^2}}$$

Beaming prinzipiell -  
hinzu kommt der  
relativistische  
Dopplereffekt



Übergang zu  
Effekten der  
ART – ja, aber  
so einfach nur  
prinzipiell!!!

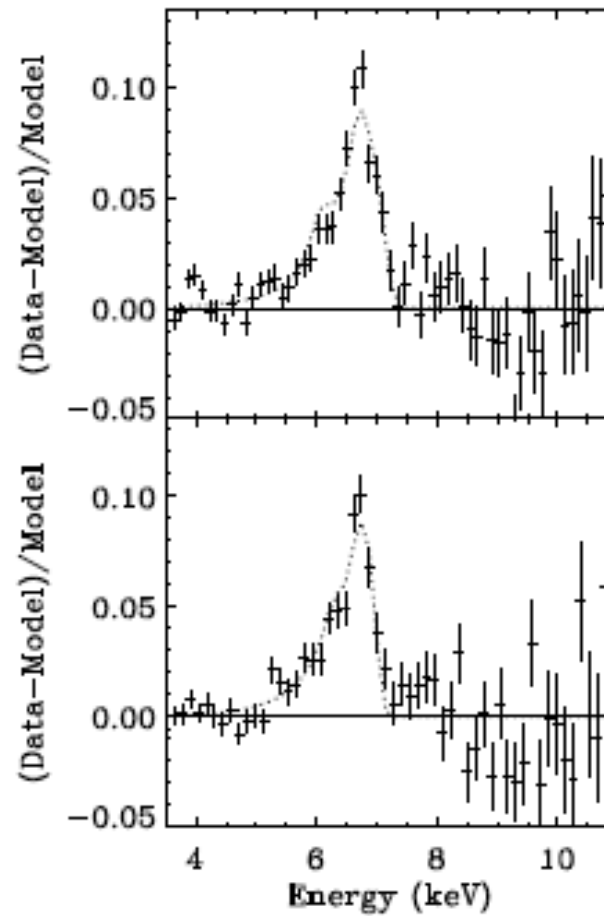




A. Müller; heute da????,  
[https://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro\\_ppt.html](https://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro_ppt.html)

$$g = \lambda_0 / \lambda_{\text{beob}}$$





Sudip Bhattacharyya

Tod E. Strohmayer

arXiv:0708.3648v1 [astro-ph] 27 Aug 2007

Evidence of a Broad Relativistic Iron Line from the Neutron  
Star Low-Mass X-ray Binary Serpens X-1