

# Kosmologie und Astroteilchenphysik

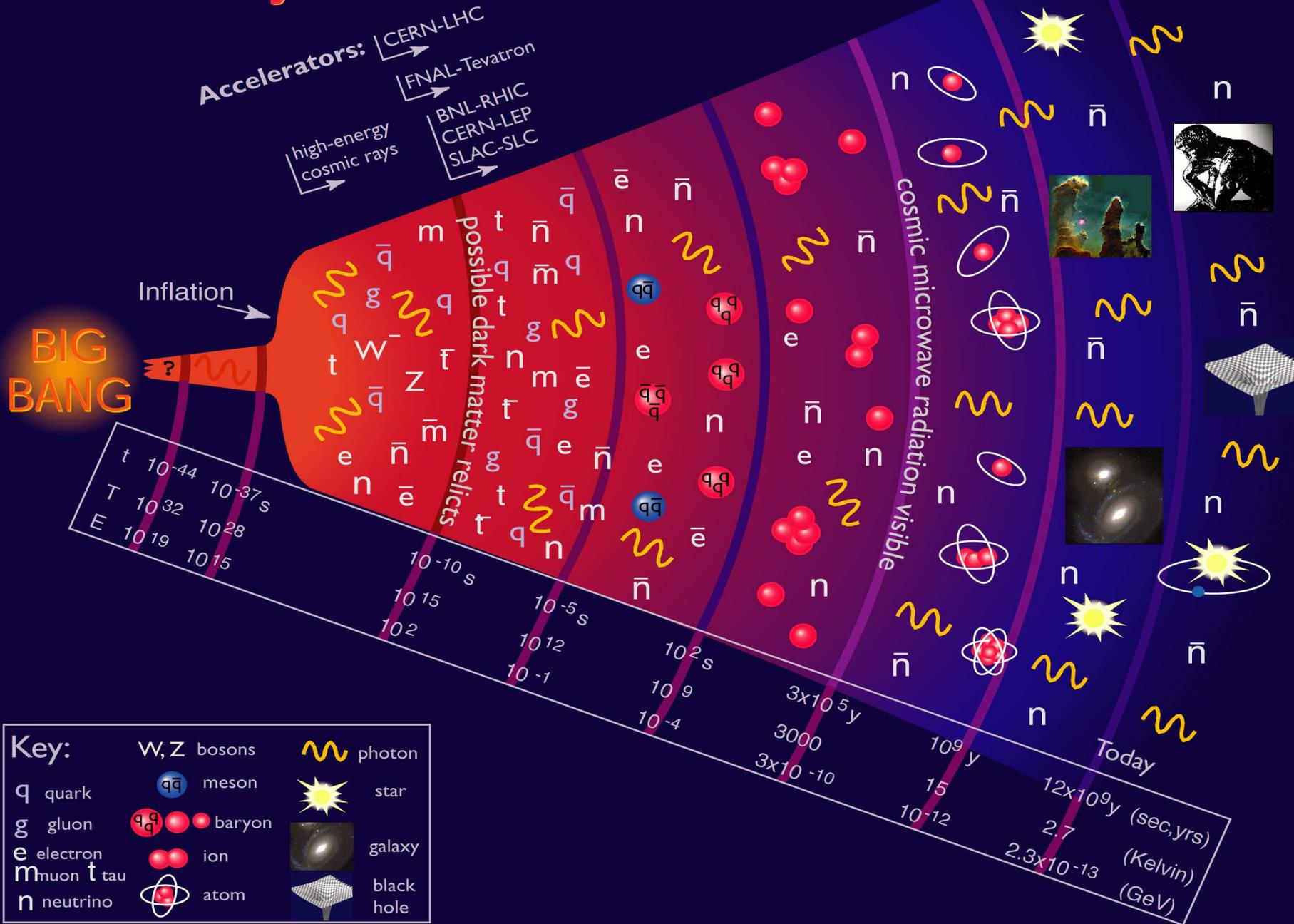
Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, Dr. Daniel Bemmerer

- Einführung in die Kosmologie
- Weltmodelle und kosmologische Inflation
- Thermische Geschichte des Universums
- Urknall-Nukleosynthese
- Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- Supernovae als kosmische Standardkerzen
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- **Altersbestimmung des Universums**
- **Fundamentale Physik und die Sonne (heute)**

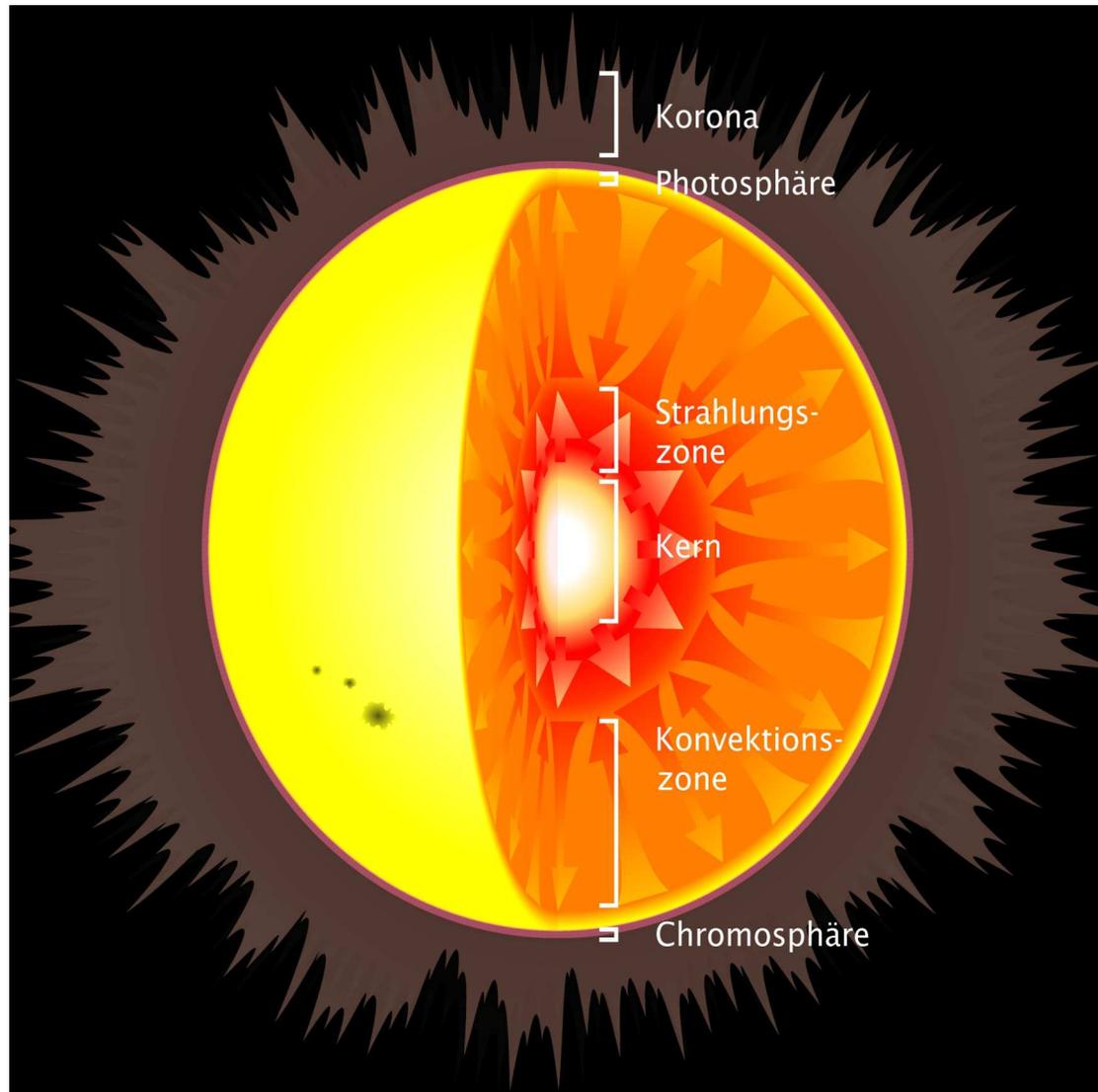
10. Vorlesung, 27.06.2011



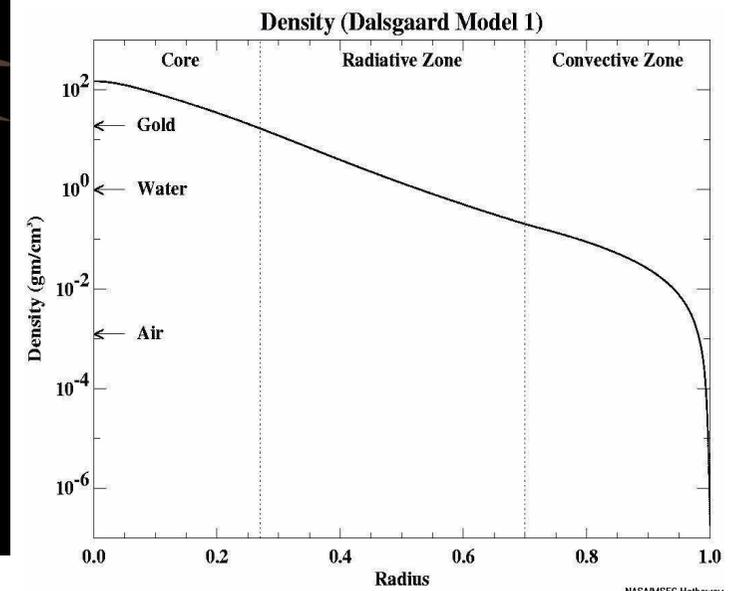
# History of the Universe



# Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



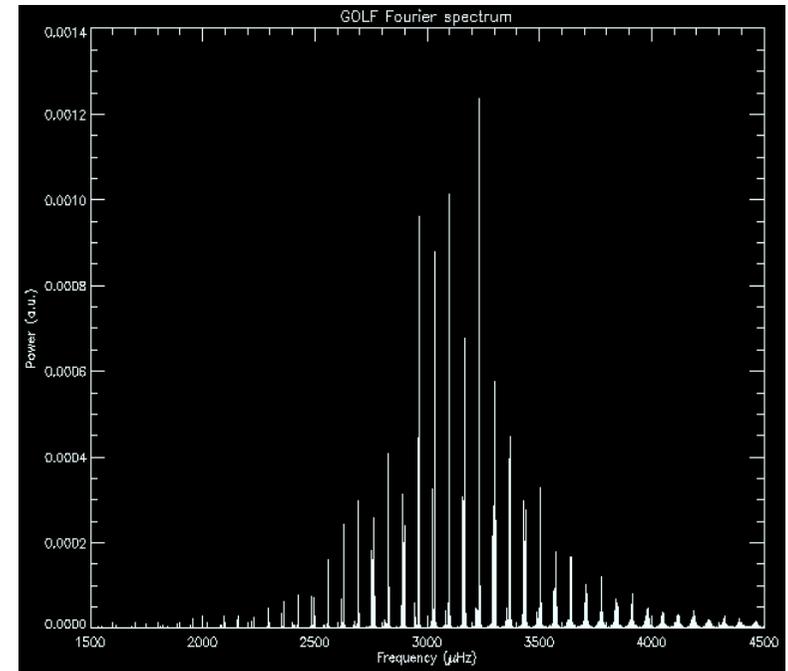
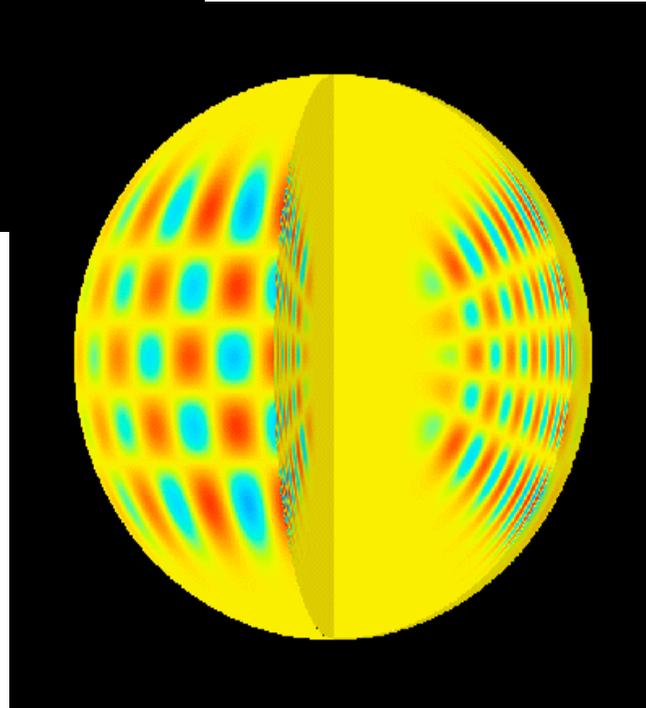
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre  
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone  
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern  
Neutrinos



# Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



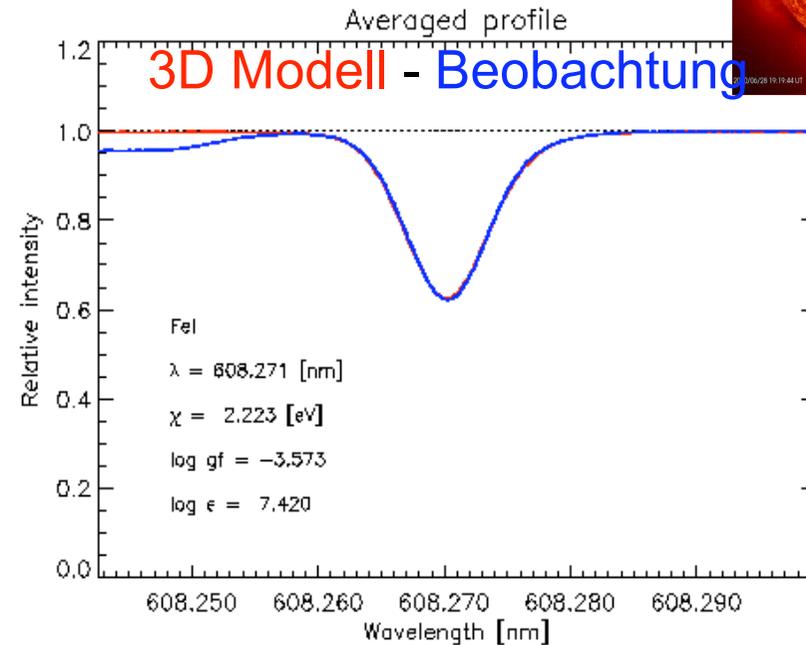
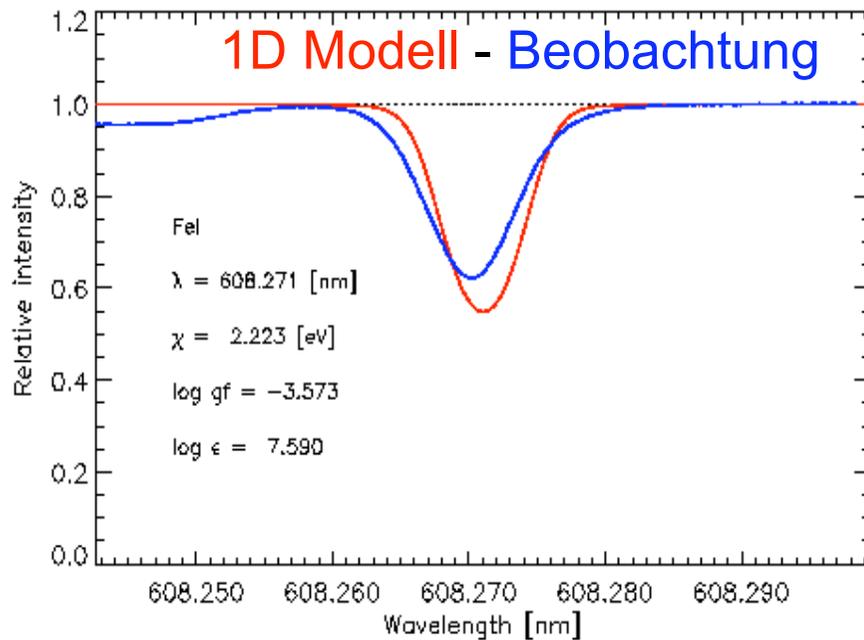
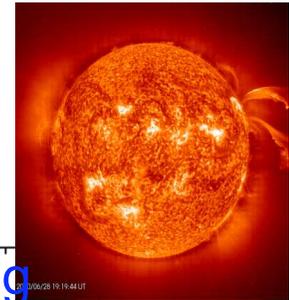
Satellit "SoHo"  
(Solar and Heliospheric Observatory)



Fourierspektrum des GOLF-Instruments auf SoHo

Computergenerierte stehende Wellen, p-mode ~3 mHz

# Daten zur Sonne (2): Elementhäufigkeiten aus der modellgestützten Interpretation der Fraunhofer-Linien



3-dimensionale Modelle der Photosphäre passen besser zur Beobachtung, liefern geringere Elementhäufigkeiten:

- 1D:** 2.29% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)
- 3D:** 1.78% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)

## Problem:

# Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

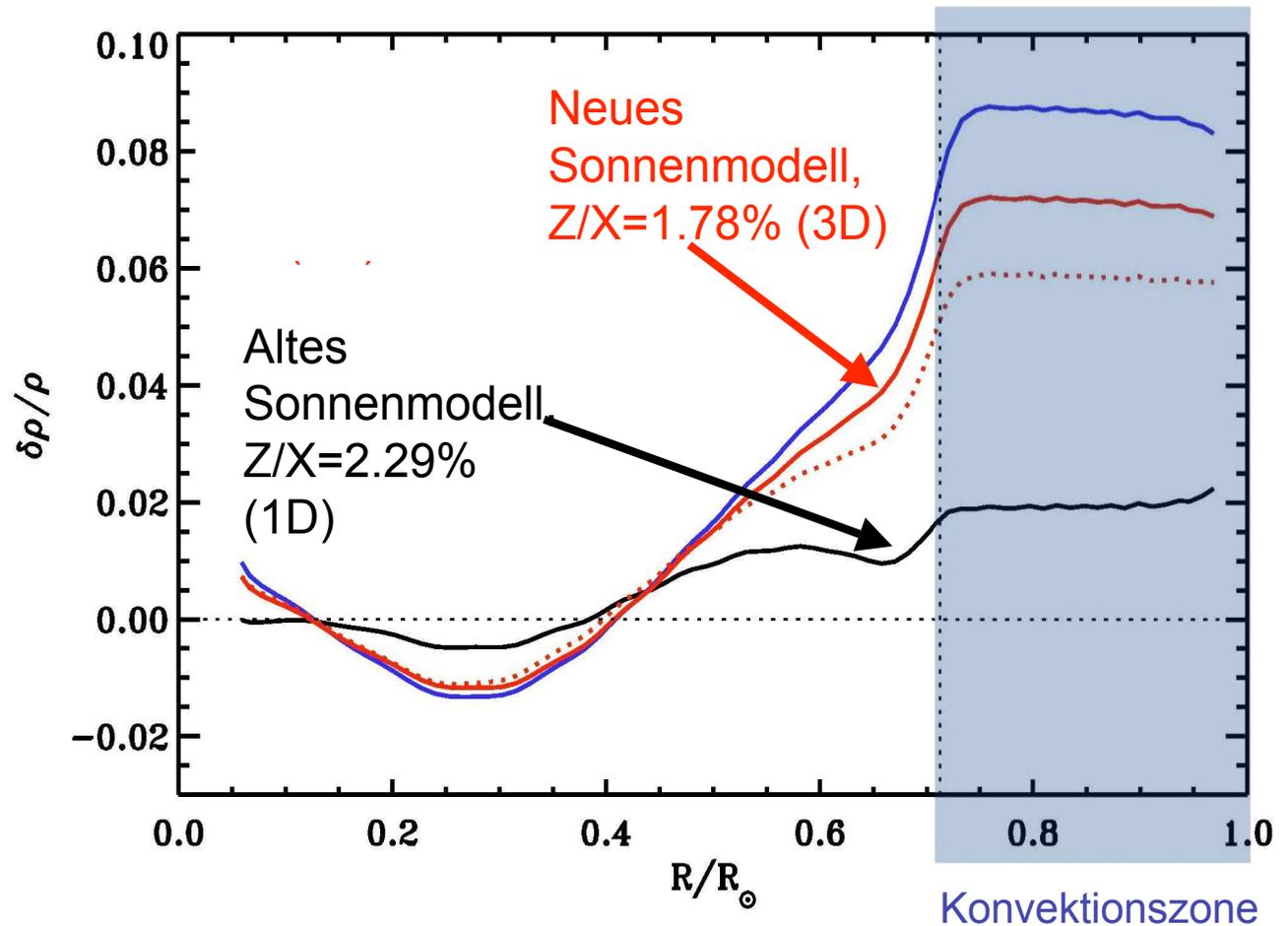
Unterschied zwischen Modell und Messung: Dichte  $\rho$  der Sonne

( $\delta\rho/\rho$  Abweichung der Wirklichkeit vom Modell)

Weitere

Widersprüche:

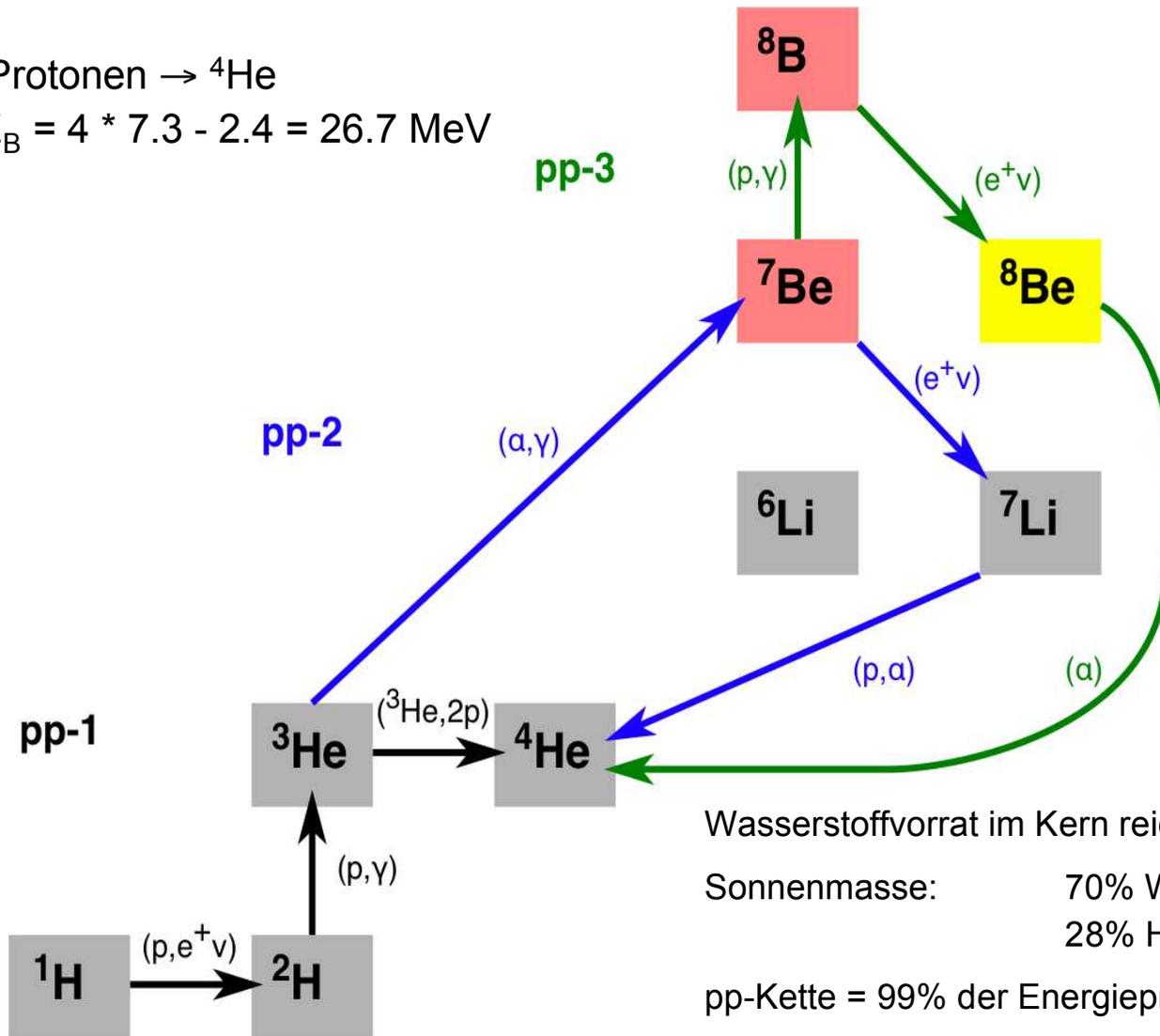
- Tiefe der Konvektionszone
- Helium-Häufigkeit



# Wasserstoffbrennen in Sternen (1): Proton-Proton-Kette (pp-Kette)

4 Protonen  $\rightarrow$   $^4\text{He}$

$$\Delta E_B = 4 * 7.3 - 2.4 = 26.7 \text{ MeV}$$



Wasserstoffvorrat im Kern reicht für  $10^{10}$  Jahre

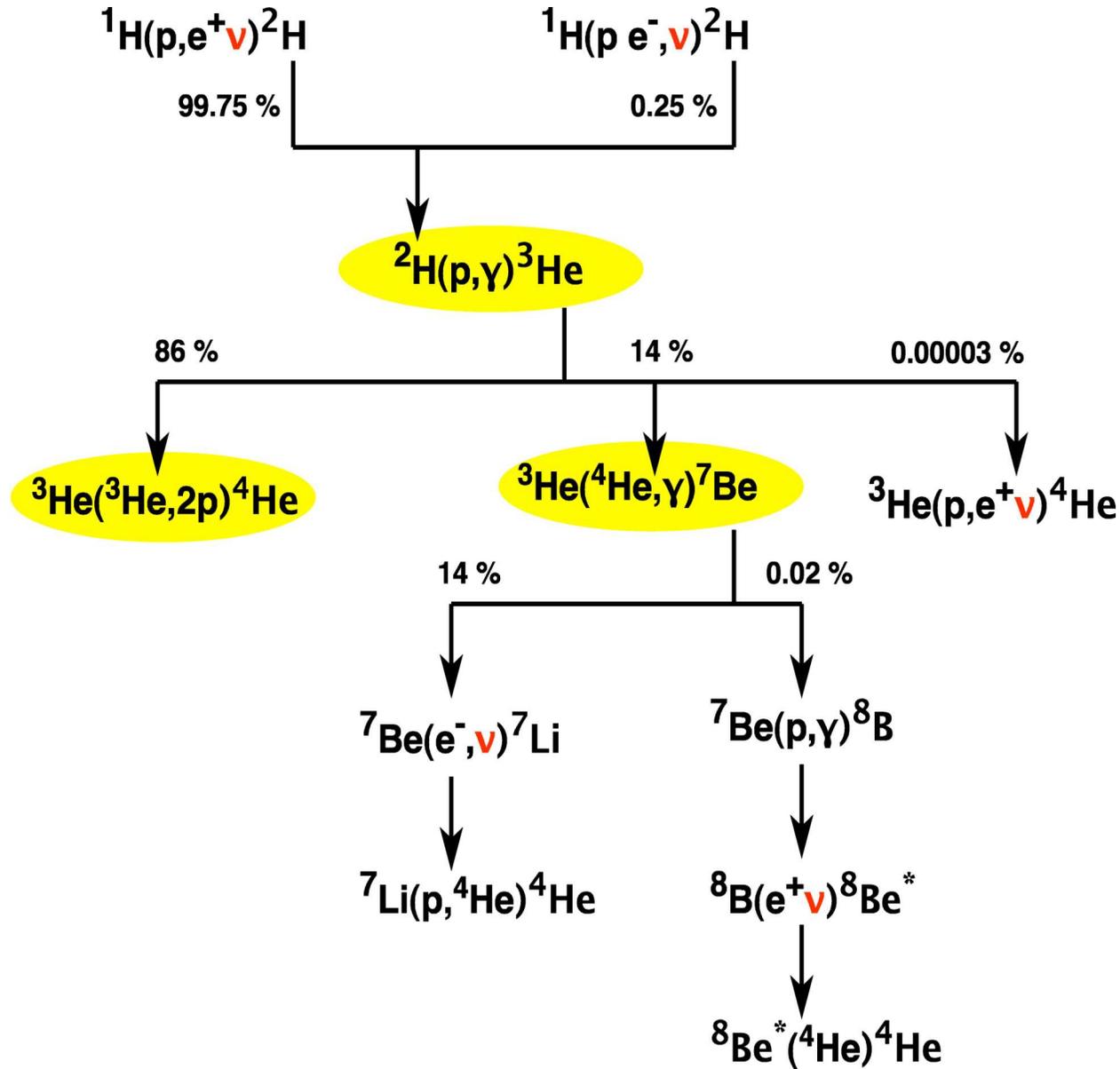
Sonnenmasse:

70% Wasserstoff

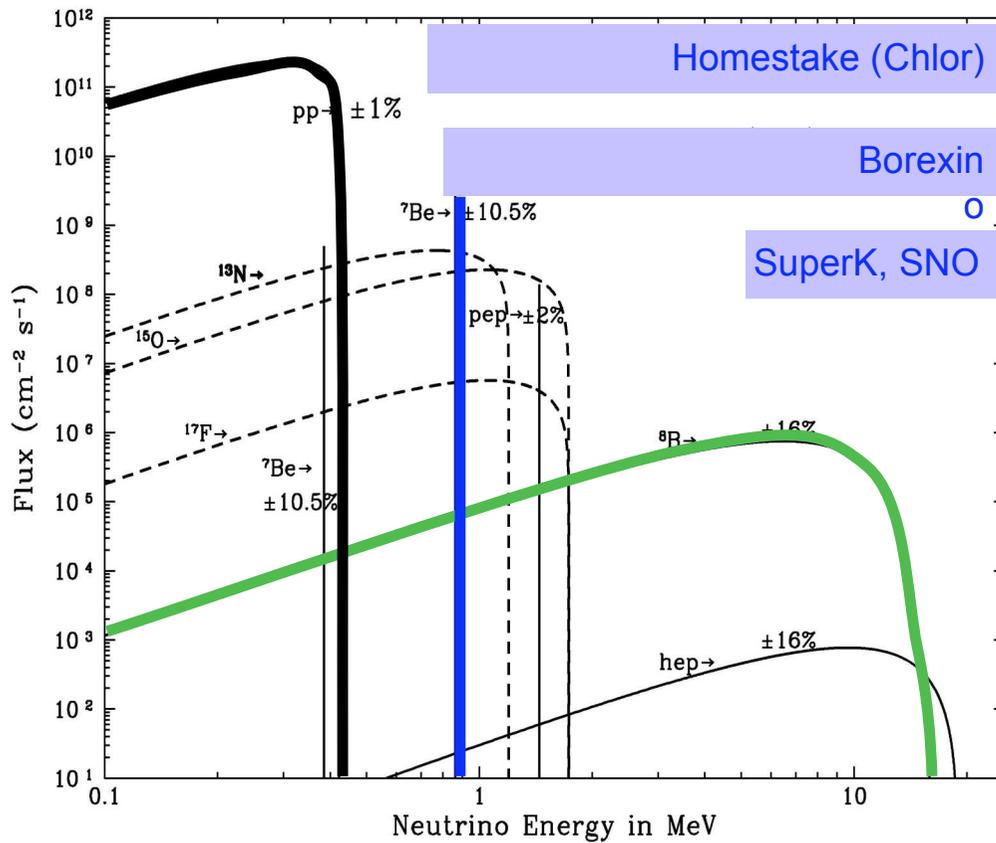
28% Helium (davon 25% primordial)

pp-Kette = 99% der Energieproduktion der Sonne

# Die drei Proton-Proton-Ketten (pp-Ketten)

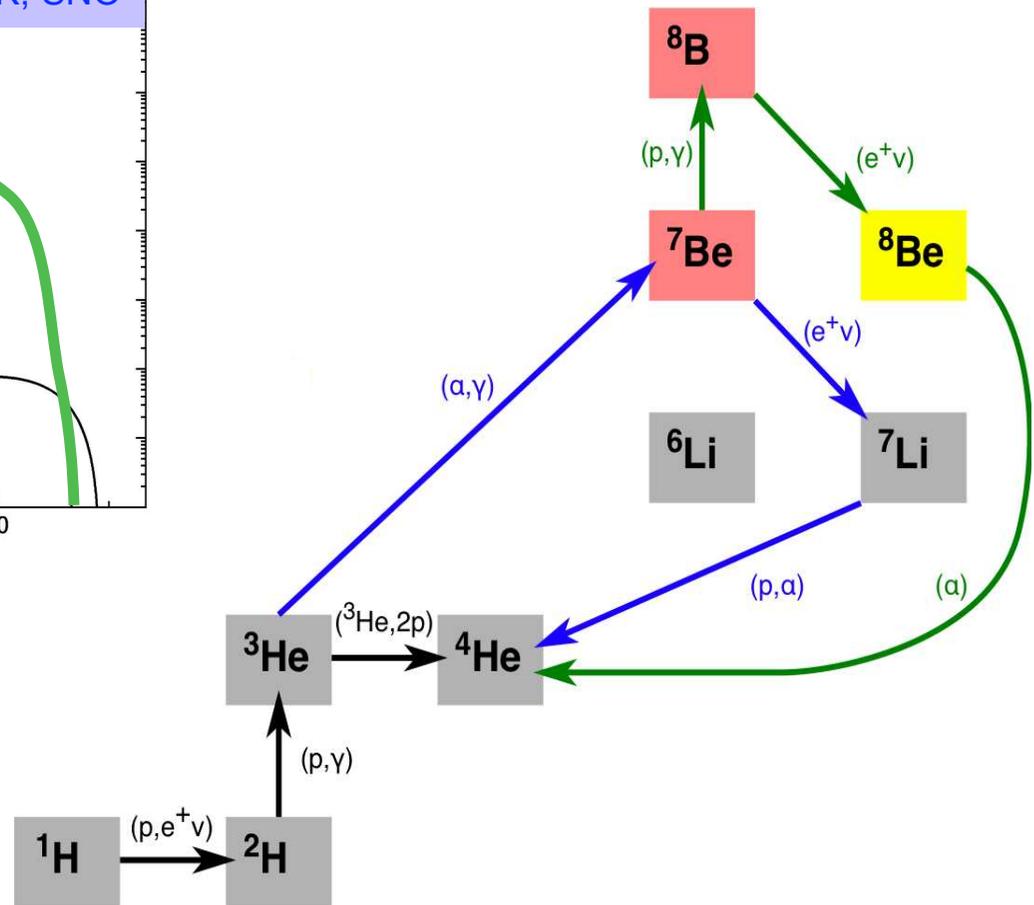


# Neutrinos aus der Proton-Proton-Kette (pp-Kette)



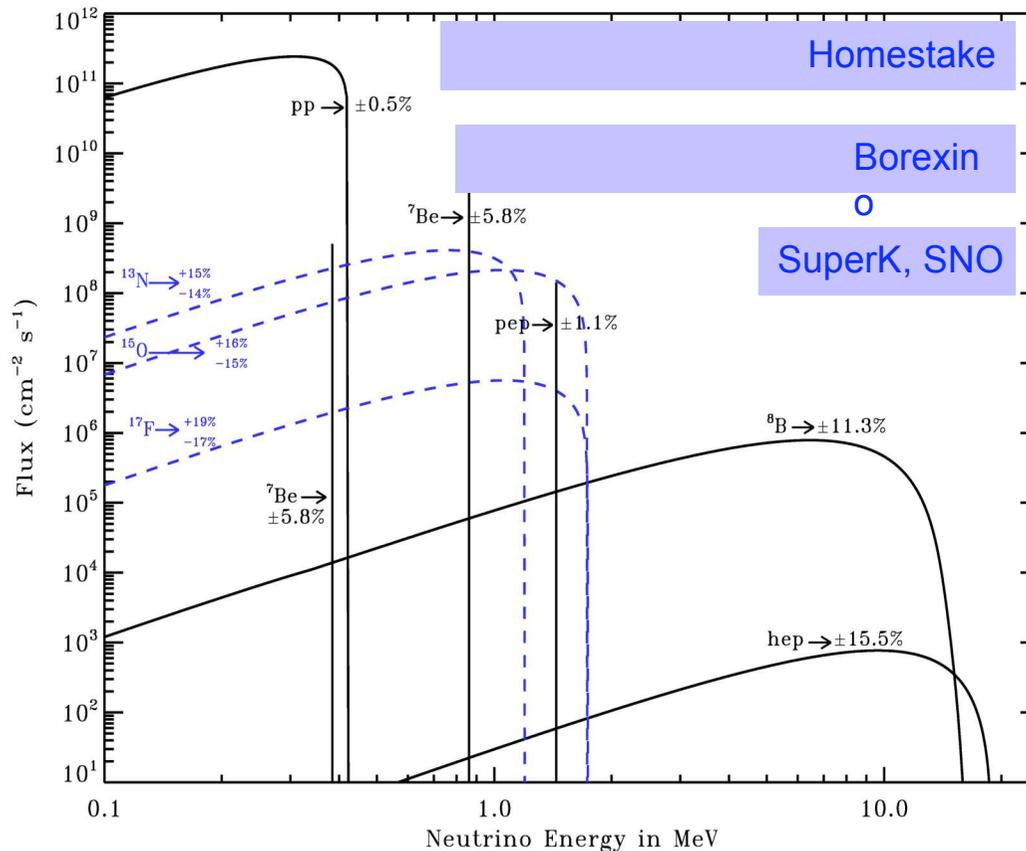
<b>pp-1</b>	<b>pp-2</b>	<b>pp-3</b>
<b>85%</b>	<b>15%</b>	<b>0.02%</b>

$$\frac{\partial \ln \Phi_{pp-1, pp-2}}{\partial \ln \sigma[{}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}]} = 0.85$$



# Neutrino-Vorhersagen des Standard-Sonnenmodells BPS08

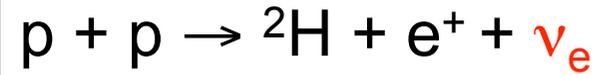
J. Bahcall (†2005), C. Peña-Garay, A. Serenelli 2008: Zwei Versionen des Sonnenmodells BPS08



- **BPS08(GS)**  
Alte (<2005) Elementhäufigkeiten  
Konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 5.94$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 2.15$
- **BPS08(AGS)**  
Neue (>2005) Elementhäufigkeiten  
Nicht konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.72$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 1.34$
- Experiment (SNO, Super-Kamiokande)  
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.91 \pm 0.17(\text{stat})$   
 $\Phi(^{15}\text{O})$  ... Borexino/SNO+ Detektoren

$^8\text{B}$ -Neutrino-Flüsse in  $10^6/(\text{cm}^2 \text{ s})$

# Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (1)

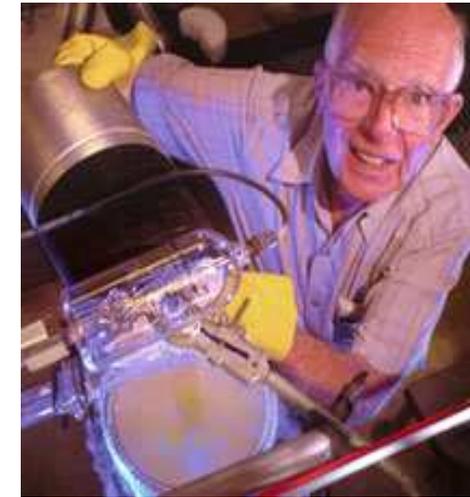


Homestake-Goldbergwerk (South Dakota / USA)

1500 m unter Tage

615 t Perchlorethylen ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ) als Detektor

${}^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-){}^{37}\text{Ar}$  Schwelle  $E_\nu > 814 \text{ keV}$



Ray Davis Jr.  
(Nobelpreis 2002)



Gemessen:  $2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$

1 SNU =  $10^{-36}$  Einfänge/( $e^- \text{ s}$ )



Sonnenmodell:  $8.5 \text{ SNU}$

“Solares Neutrino Problem”, 1972-2002

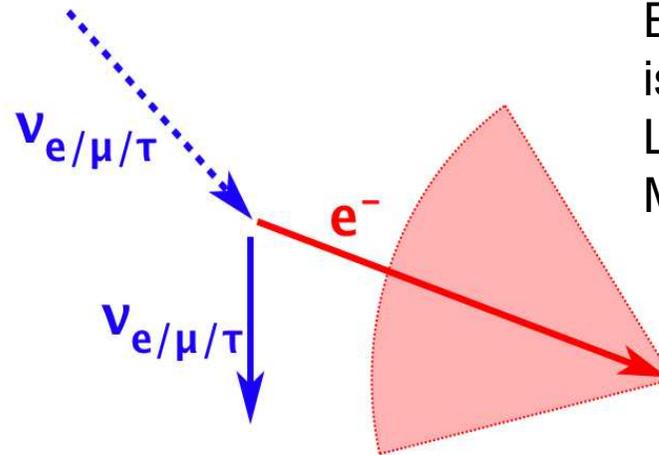
## Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (2)

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada):



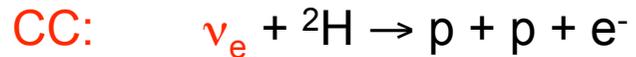
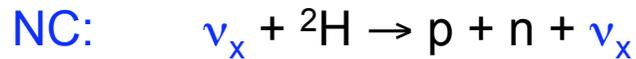
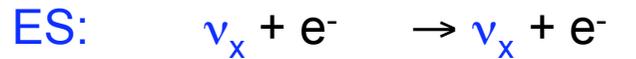
Schwerwasser-Tscherenkow-Zähler  
1000 t D<sub>2</sub>O , 2100 m unter Tage

Tscherenkow-Kegel eines  
Elektrons, das schneller  
ist als die  
Lichtgeschwindigkeit im  
Medium (n=1.33).



## Die Lösung des solaren Neutrino-Problems, 2002

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada) weist direkt auch solare  $\nu_\mu, \nu_\tau$  nach.  
Konzentration auf Neutrinos mit  $> 5$  MeV Energie (hauptsächlich aus  ${}^8\text{B}$ -Zerfall)



$$\Phi_{\text{ES}} = 2.39$$

$$\Phi_{\text{CC}} = 1.76$$

$$\Phi_{\text{NC}} = 5.09$$

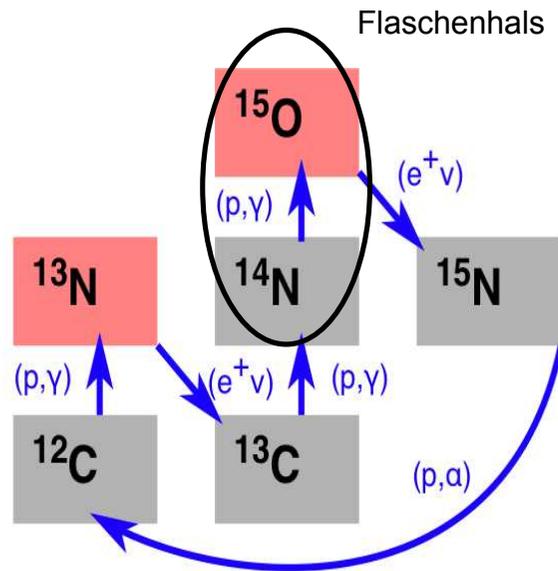
Umformung

Sonnenmodell: 4.72...5.94

$$\begin{aligned}\phi_e &= 1.76^{+0.05}_{-0.05}(\text{stat})^{+0.09}_{-0.09}(\text{syst}), \\ \phi_{\mu\tau} &= 3.41^{+0.45}_{-0.45}(\text{stat})^{+0.48}_{-0.45}(\text{syst}), \\ \Phi_e + \Phi_{\mu\tau} &= 5.17 \pm 0.67 \text{ (stat.+syst.)} \\ &\text{(Experiment, SNO)}\end{aligned}$$

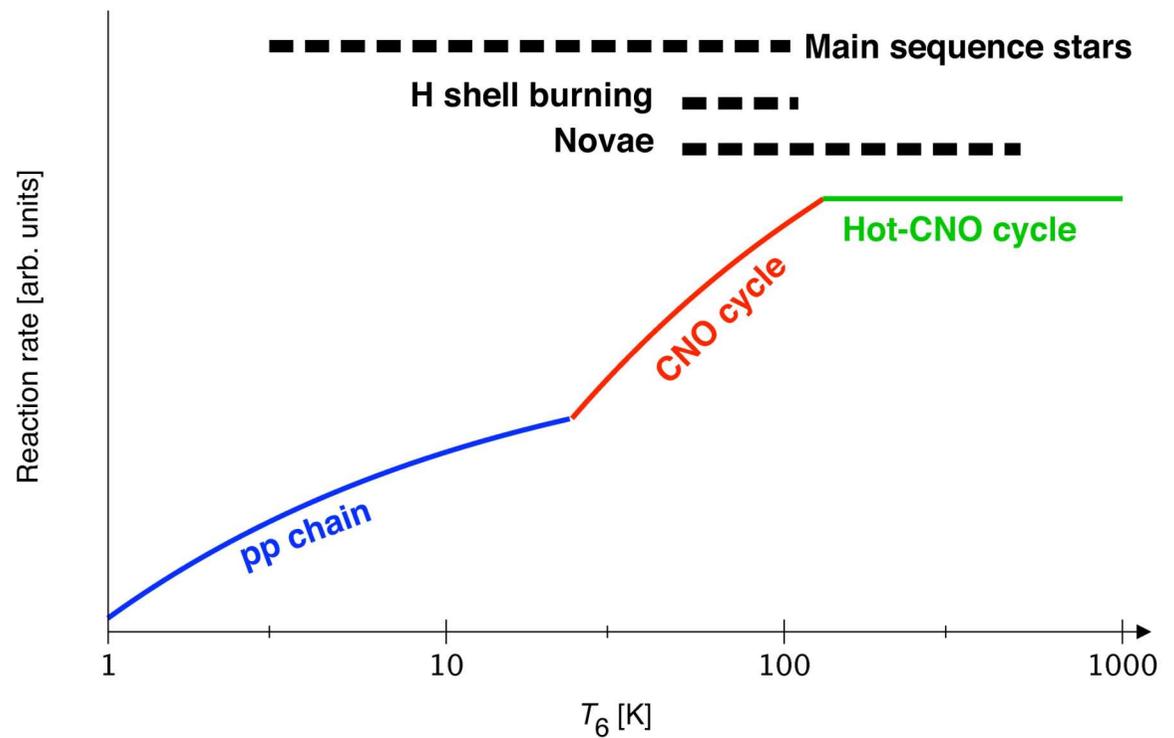
Neutrino-Flüsse in  $10^6/(\text{cm}^2 \text{ s})$

# Wasserstoffbrennen: Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)

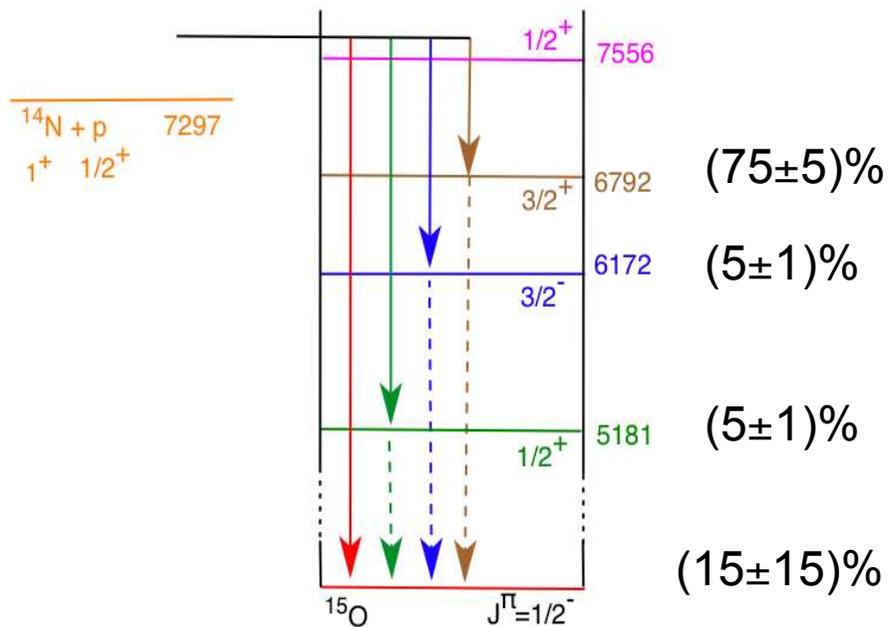


1938 postuliert

- Flaschenhals:  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$
- 0.8% der Energieproduktion der Sonne
- Bestimmung des Alters von Kugelsternhaufen

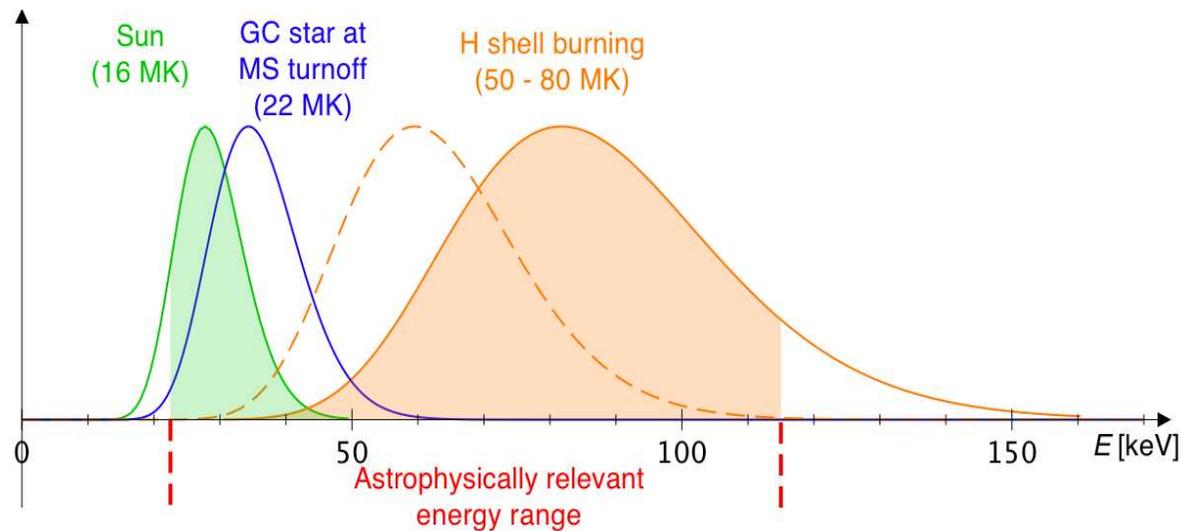


# $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ , wie sieht es im Detail aus?

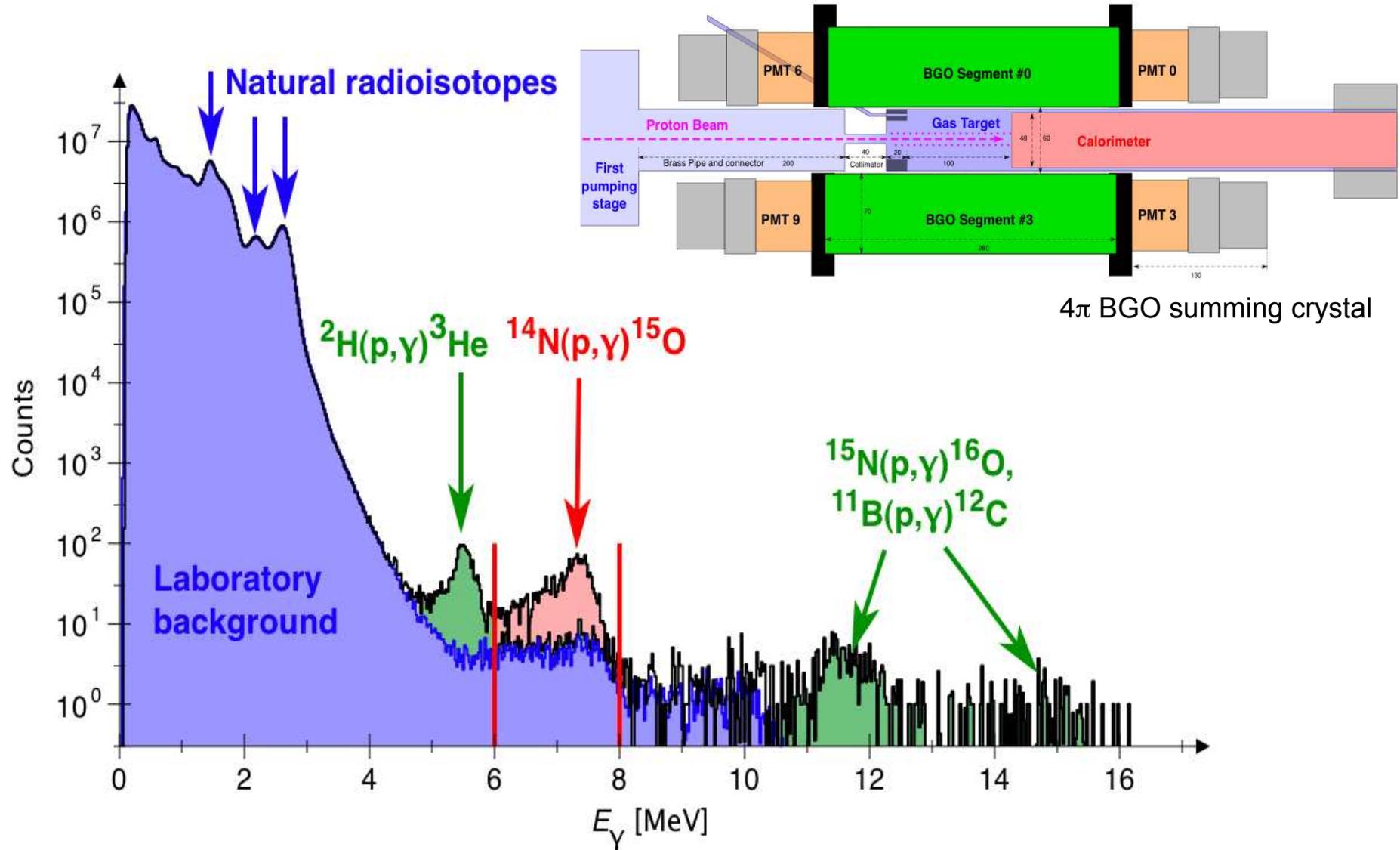


Zwei mögliche Ansätze für Experimente

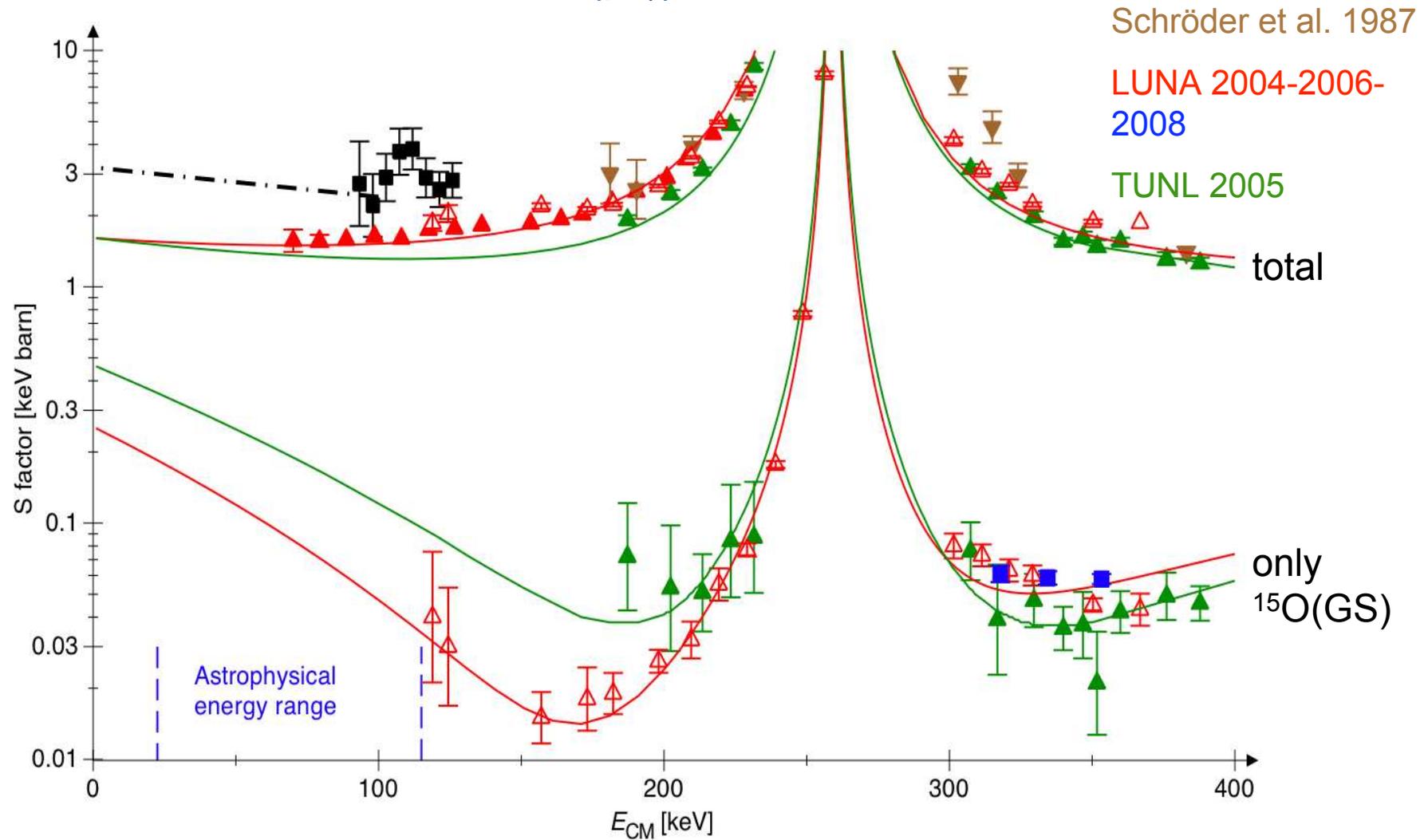
1. Untersuche Einfang in jeden Level im Einzelnen, dann extrapoliere.
2. Untersuche alle Levels gleichzeitig in einem Summendetektor, aber verzichte (gezwungenermaßen) auf die Extrapolation



# $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ , Messung aller Übergänge mit einem Summendetektor



# Gesamter S-Faktor von $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$

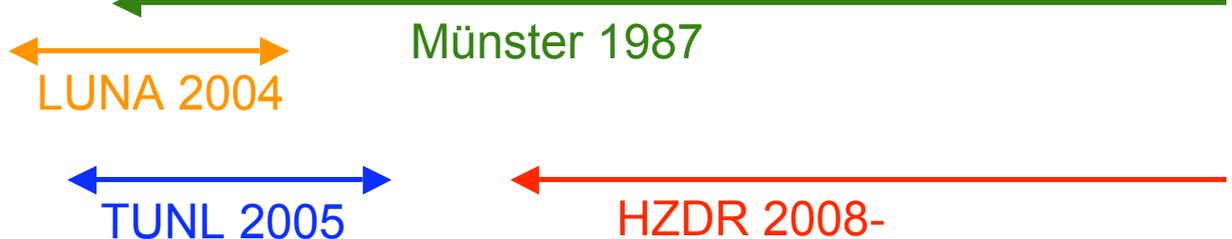
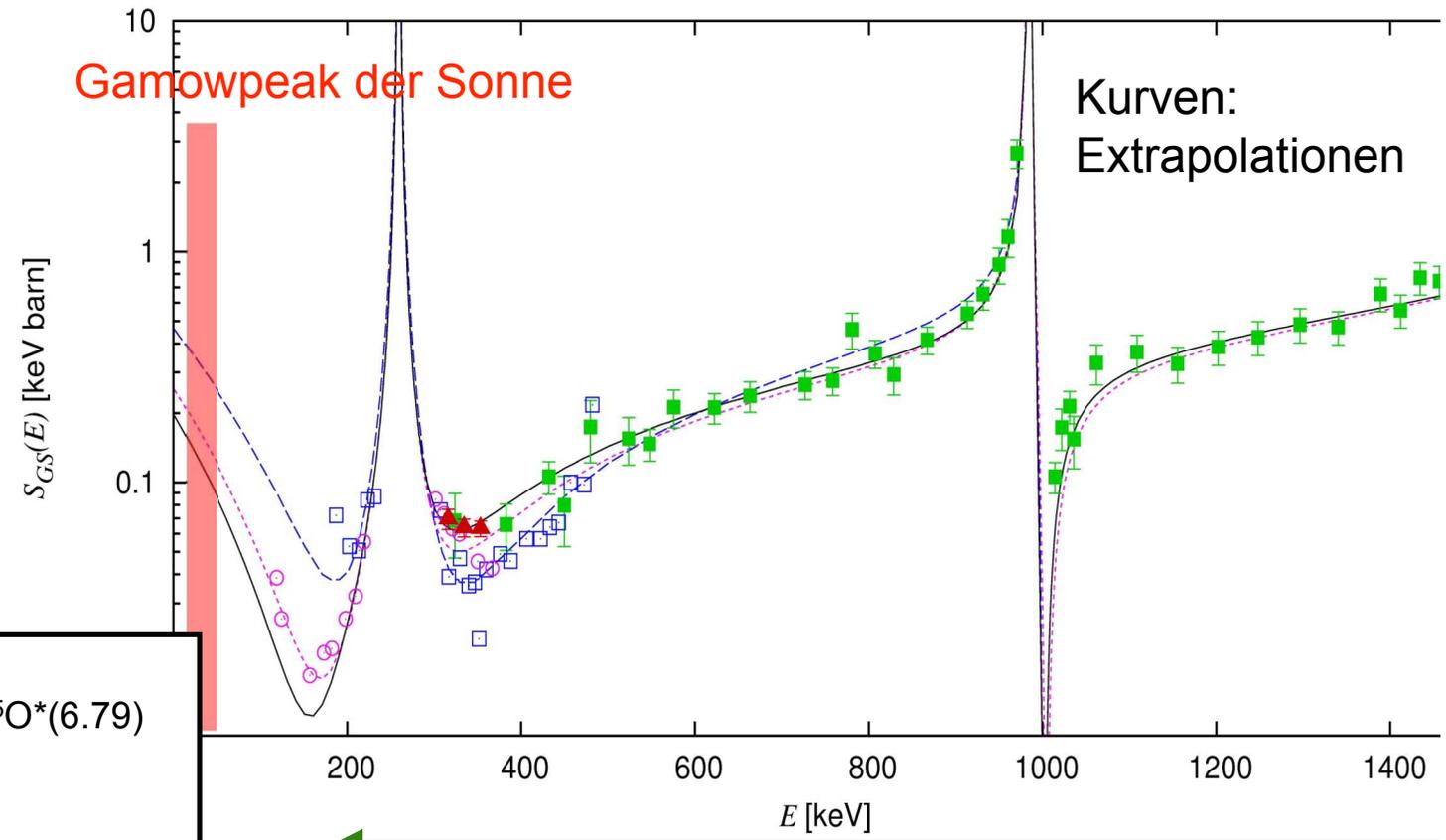


# Die $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ -Reaktion: Einfang in angeregte Zustände von $^{15}\text{O}$

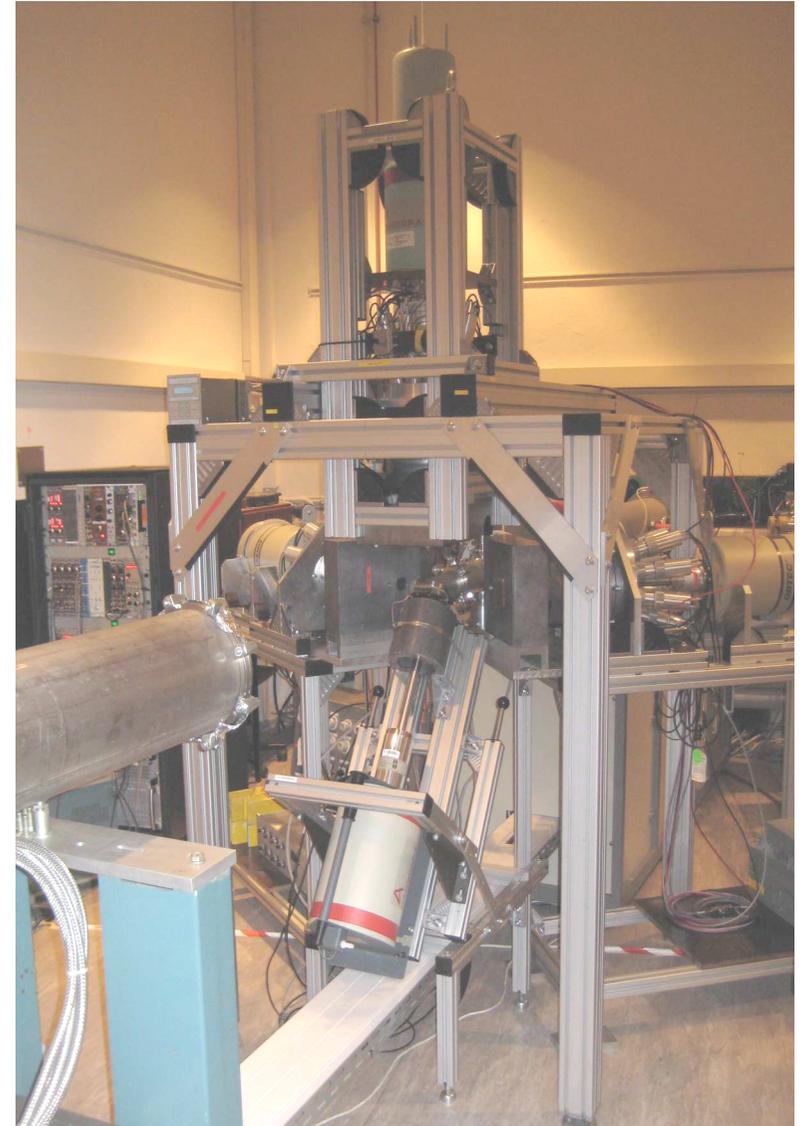
$Q$ [keV]	$E$ [keV]	$E_x$ [keV]	$J^\pi$
7297	987	8284	$3/2^+$
	259	7556	$1/2^+$
$^{14}\text{N} + p$		7276	$7/2^+$
		6859	$5/2^+$
		6791	$3/2^+$
		6172	$3/2^-$
		5241	$5/2^+$
		5181	$1/2^+$
			$1/2^-$

$^{15}\text{O}$

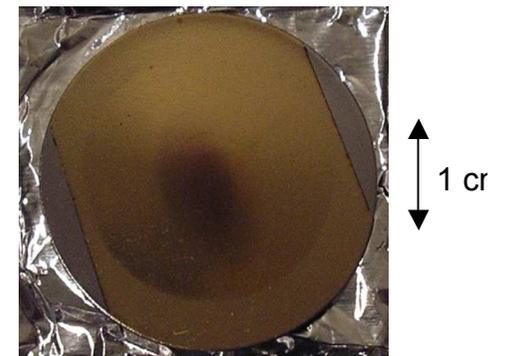
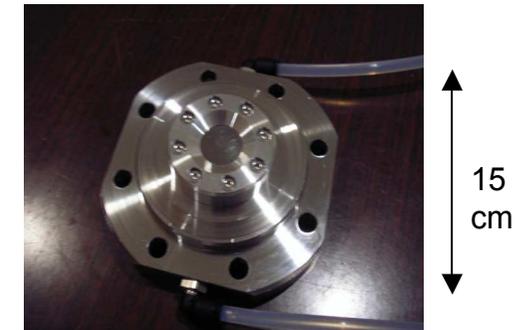
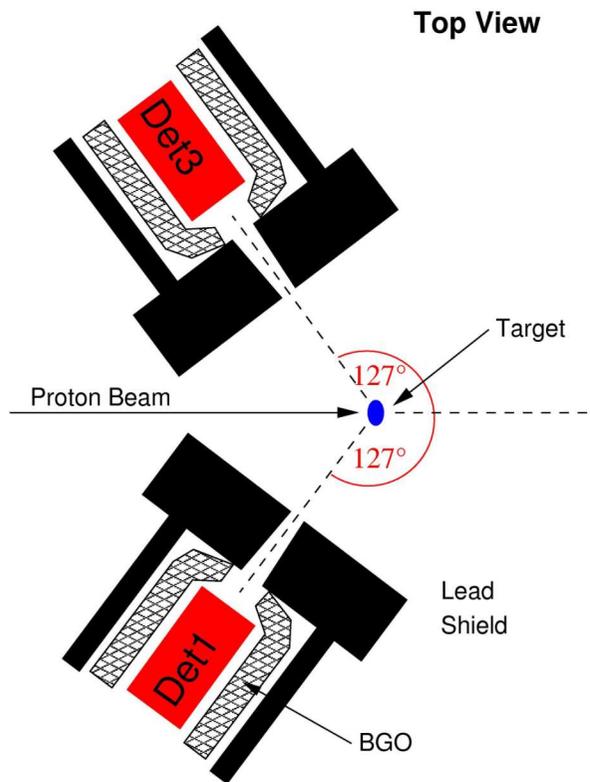
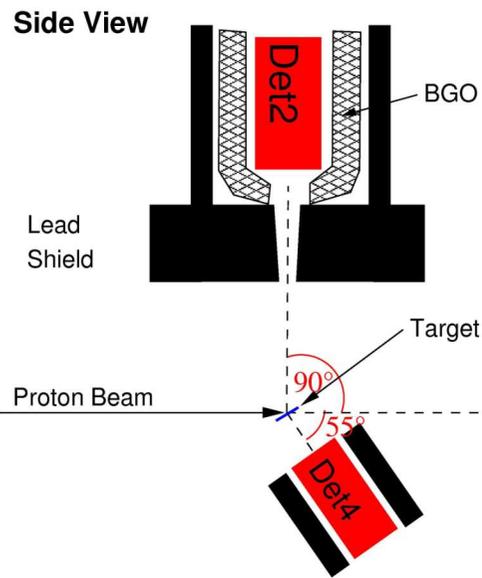
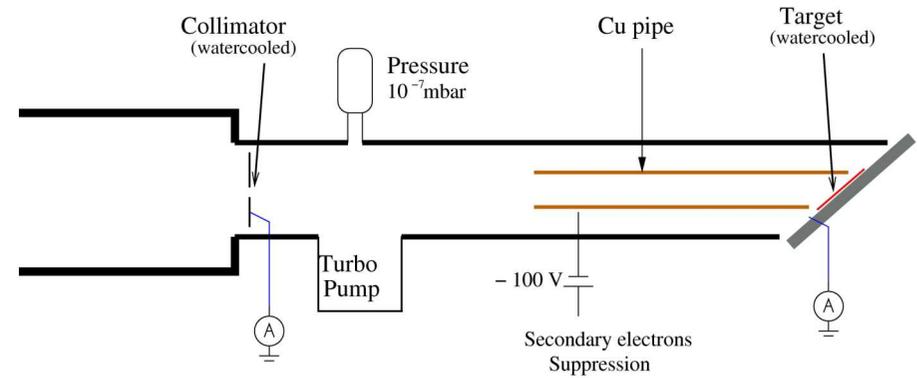
- Wichtige Niveaux**
- $E = -0.504$  MeV,  $^{15}\text{O}^*(6.79)$
  - $E = 0.259$  MeV
  - $E = 0.987$  MeV
  - $E = 2.187$  MeV
  - "background pole"



# Versuchsaufbau am HZDR Tandetron, Dresden



# Detektoren und Targets



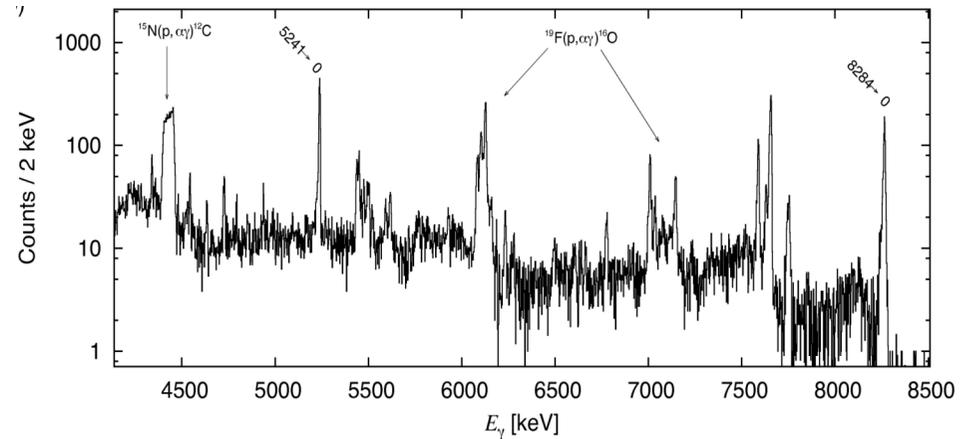
# Resonanzstärken $\omega\gamma$ in den $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ - und $^{15}\text{N}(p,\alpha\gamma)^{12}\text{C}$ -Reaktionen

278 keV

Normierungspunkt:

$$\omega\gamma = (13.1 \pm 0.6) \text{ meV}$$

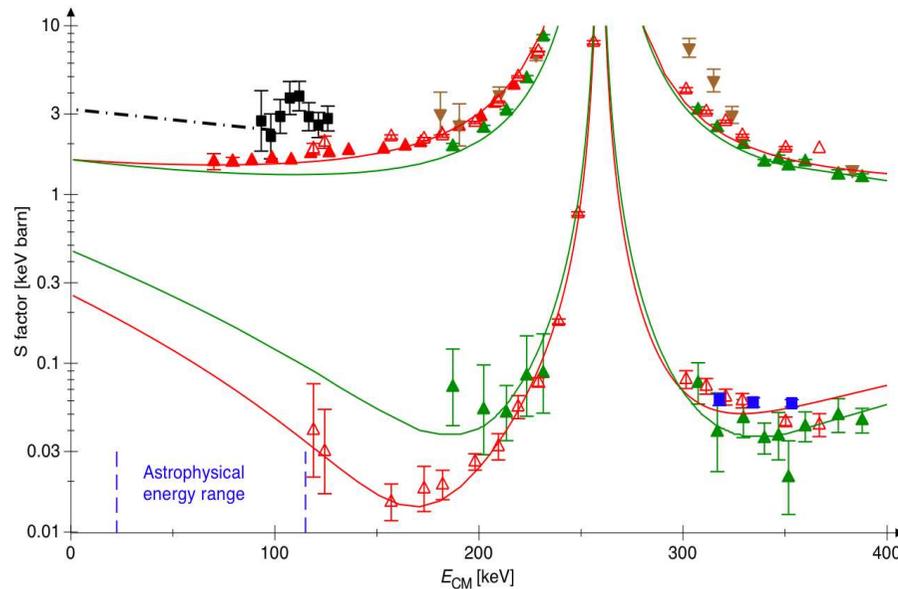
$$Y = \frac{\lambda^2}{2} \frac{1}{SP_{\text{eff}}} \omega\gamma$$



Reaction	Literature [23, 52]		Present		Literature
	$E_p$ [keV]	$\Gamma_{\text{lab}}$ [keV]	$\omega\gamma_n/\omega\gamma_{278}$	$\omega\gamma$ [eV]	
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$	278	1.12 <sup>a</sup>	$\stackrel{\text{Def}}{=} 1$	—	$0.0131 \pm 0.0006^b$
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$	1058	3.8 <sup>c</sup>	$27.8 \pm 0.9$	$0.364 \pm 0.020$	$0.31 \pm 0.04$ [25]
$^{15}\text{N}(p,\alpha\gamma)^{12}\text{C}$	430	0.1	$(1.73 \pm 0.07) \cdot 10^3$	$22.7 \pm 1.4$	$21.1 \pm 1.4$ [46]
$^{15}\text{N}(p,\alpha\gamma)^{12}\text{C}$	897	1.57	$(2.77 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$362 \pm 20$	$293 \pm 38$ [63]

→ M. Marta et al., Phys. Rev. C (2010)

# Auswirkungen des niedrigeren $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ -Wirkungsquerschnitts



$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  Wirkungsquerschnitt halbiert!

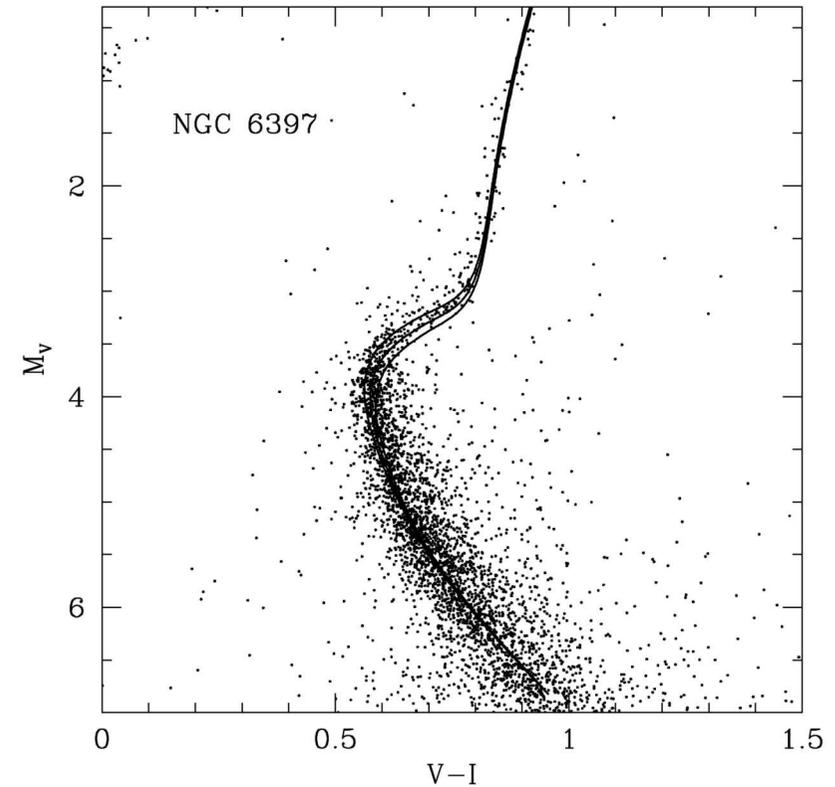
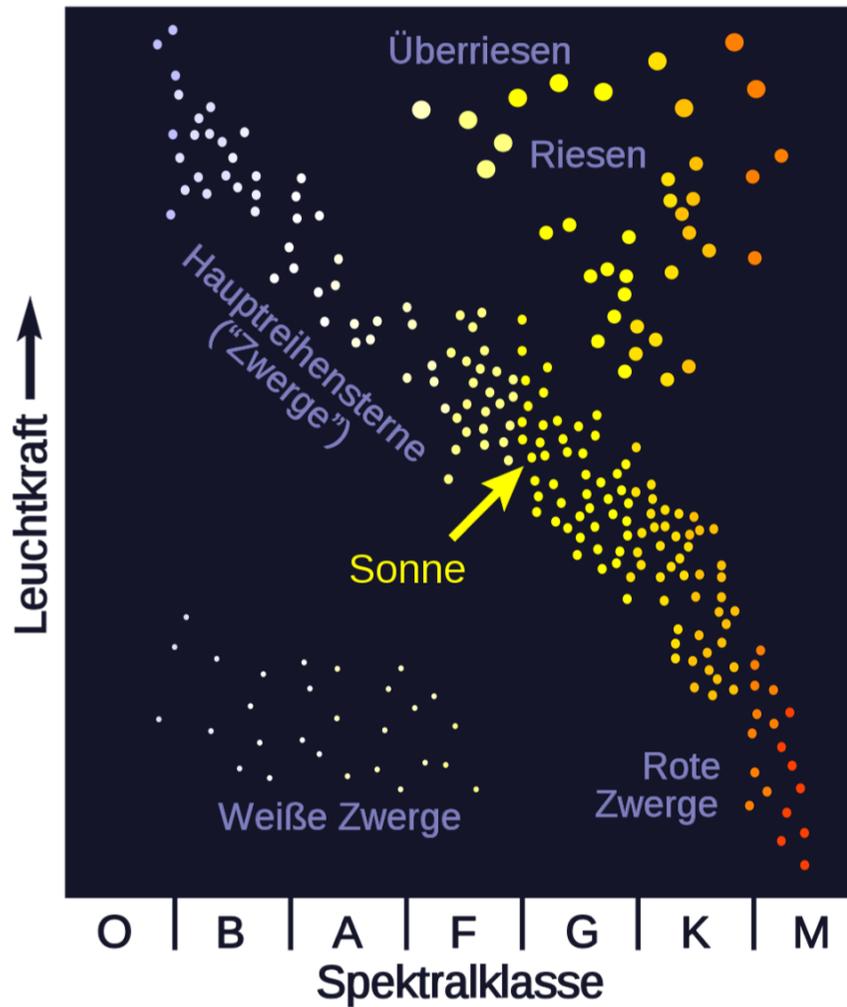
- A. Formicola et al., Phys. Lett. B 591, 61 (2004)
- A. Lemut et al., Phys. Lett. B 634, 483 (2006)
- M. Marta et al., Phys. Rev. C 78, 022802 (R) (2008)

$S(0) = 3.2$  keV barn (1998)

→  $1.72 \pm 0.12$  keV barn (2009)

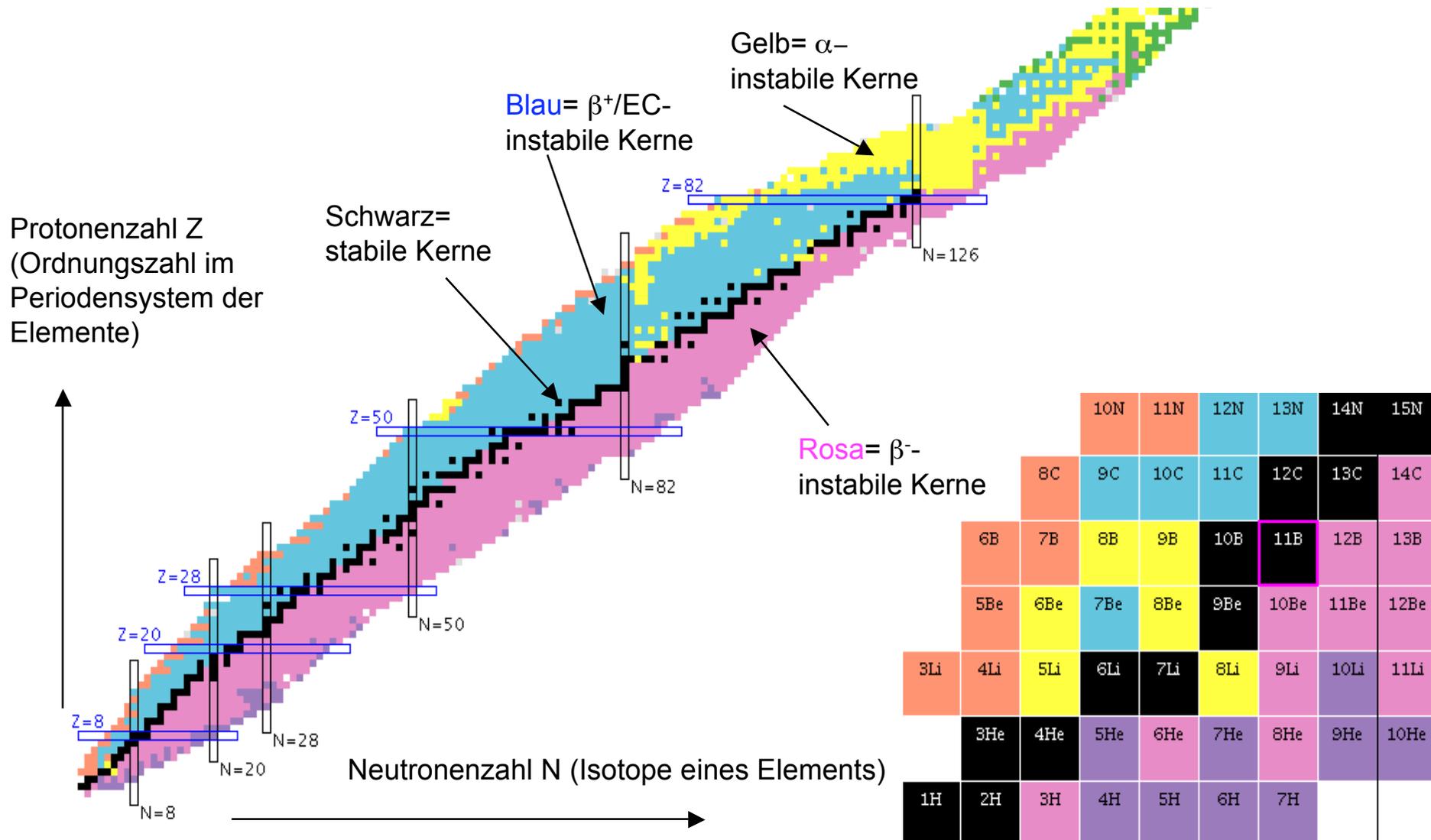
1. Unabhängige untere Schranke für das Alter des Universums:  $14 \pm 2$  Ga.
2. Bessere Reproduktion der Kohlenstoffhäufigkeiten in Roten Riesen.
3. Es ist möglich, den Stickstoffgehalt im Kern der Sonne über die emittierten CNO-Neutrinos zu bestimmen.

# Altersbestimmung sehr alter Sterne (in Kugelsternhaufen)



→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe

# Nuklidkarte



## Zusammenfassung

- Aufbau der Sonne
- Hydrostatisches Wasserstoffbrennen
  - Proton-Proton-Kette
  - Bethe-Weizsäcker-Zyklus
- Neutrinos aus der Sonne

