Astroteilchenphysik und Kosmologie

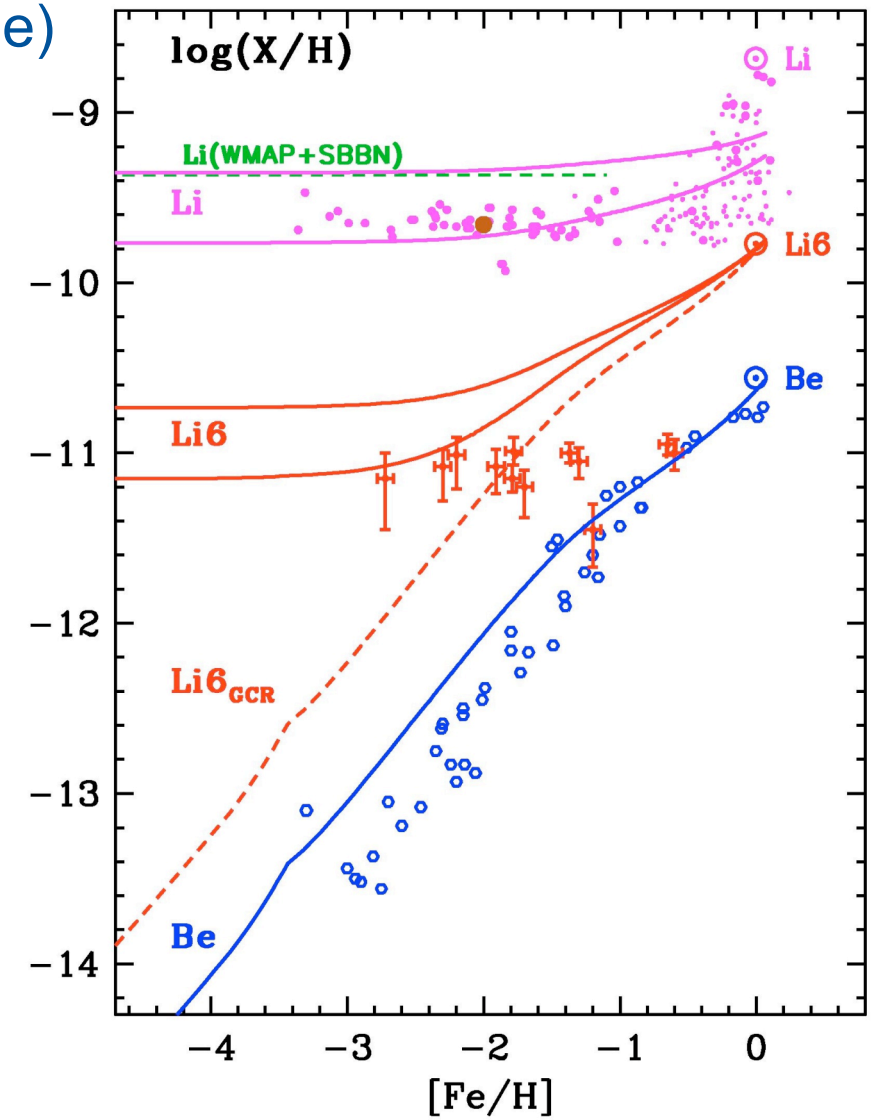
Prof. Dr. B. Kämpfer und Dr. D. Bemmerer

- Kernphysikalische Grundbegriffe zur Elemententstehung
- Entstehung chemischer Elemente im Urknall und durch kosmische Strahlen
- **Teilchenphysik in Sternen (heute und nächstes Mal)**
- **Boten aus dem All: Neutrinos** von Supernovae und **aus der Sonne** (**heute**)
- Kosmische Teilchenbeschleuniger – schneller als der CERN-LHC
- Urknall und kosmologische Inflation
- Dunkel-Energie und Dunkel-Materie als wichtig(st)e Materieformen im Universum
- Kosmische Teilchen und das Standardmodell
- Weltmodelle und Alternativen

5. Vorlesung, TU Dresden 10.05.2010

Zusammenfassung der 4. VL (letzte Woche)

- Entstehung der Elemente Be und B durch Spallation
- Thermonukleare Reaktionsrate



Heute

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

Nuklidkarte

Gelb= α–
instabile Kerne

Blau= β^+/EC-
instabile Kerne

Schwarz=
stabile Kerne

Protonenzahl Z
(Ordnungszahl im
Periodensystem der
Elemente)

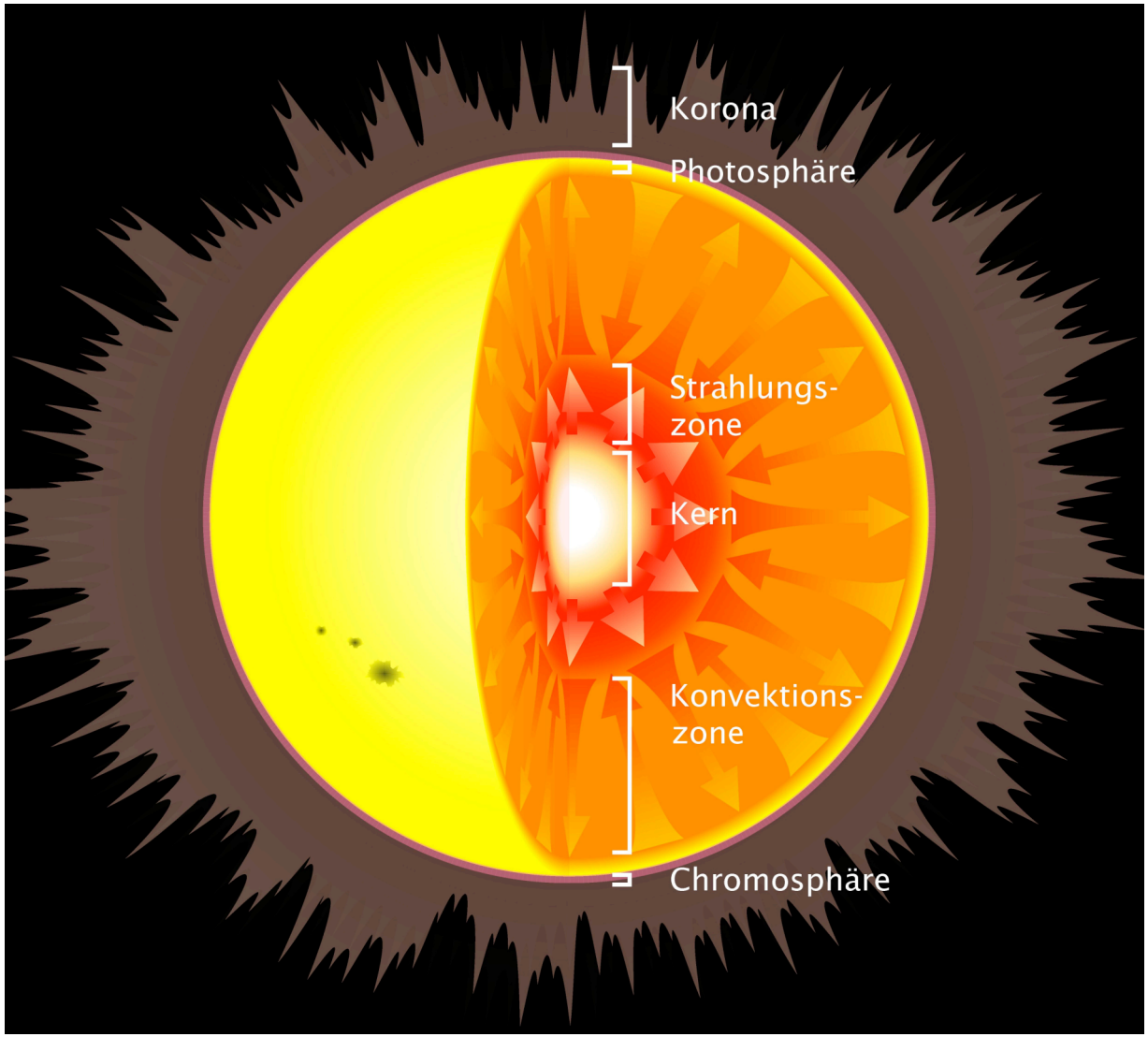
Rosa= β^--
instabile Kerne

Z=82
N=126
Z=50
N=82
Z=28
N=50
Z=20
N=28
Z=8
N=20
N=8

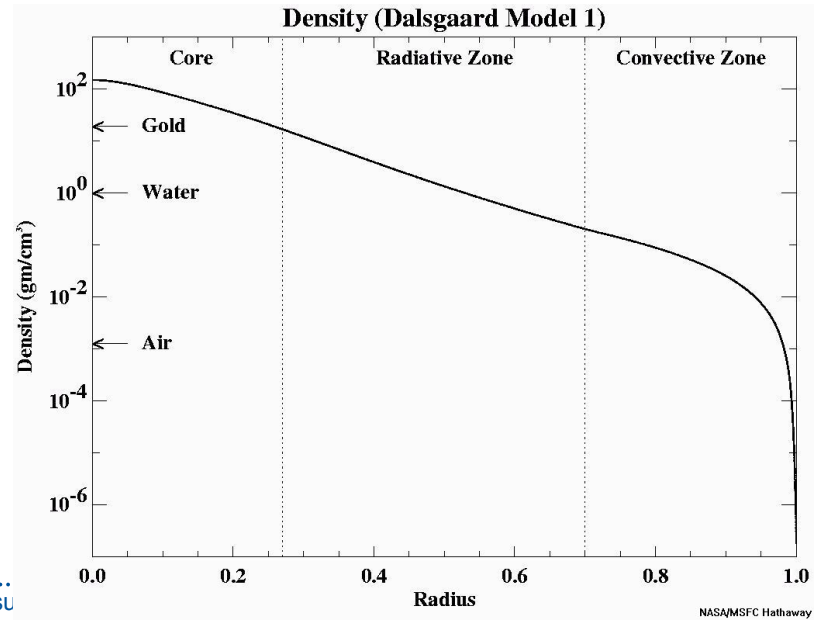
Neutronenzahl N (Isotope eines Elements)

			10N	11N	12N	13N	14N	15N
		8C	9C	10C	11C	12C	13C	14C
	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B	13B
	5Be	6Be	7Be	8Be	9Be	10Be	11Be	12Be
3Li	4Li	5Li	6Li	7Li	8Li	9Li	10Li	11Li
	3He	4He	5He	6He	7He	8He	9He	10He
1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H		

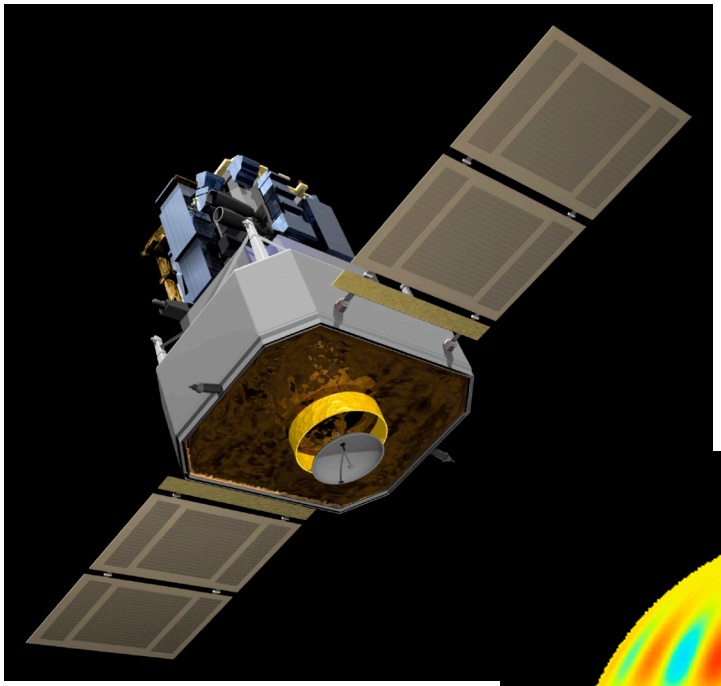
Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



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

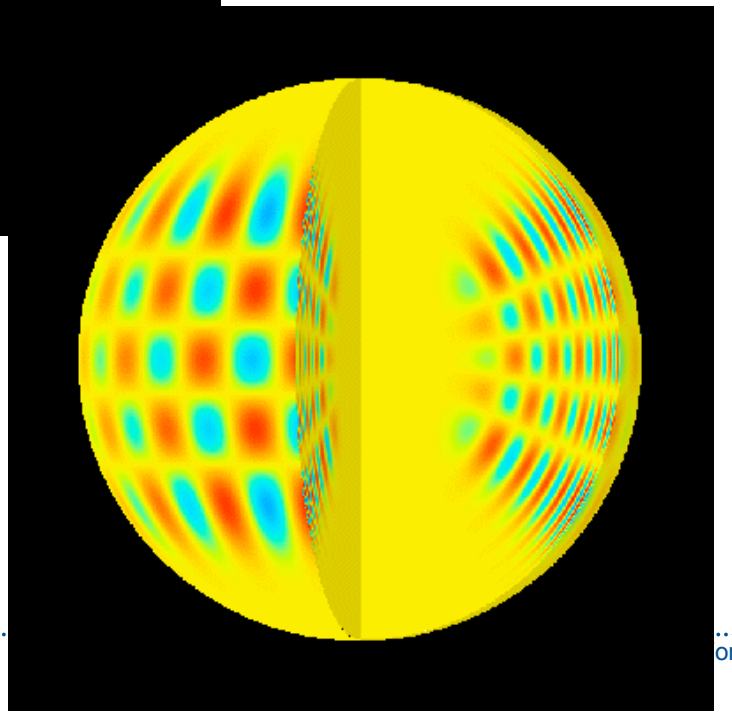


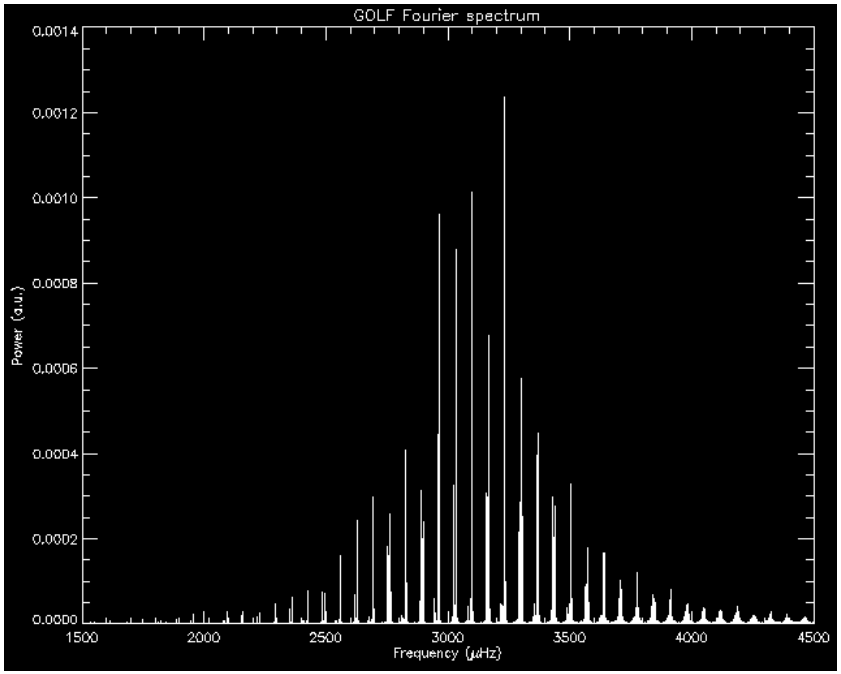
Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



Satellit “SoHo”

(Solar and Heliospheric Observatory)



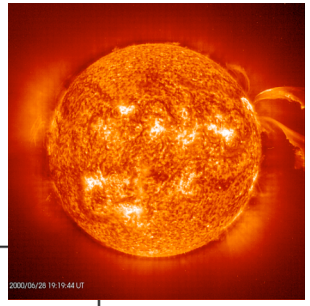


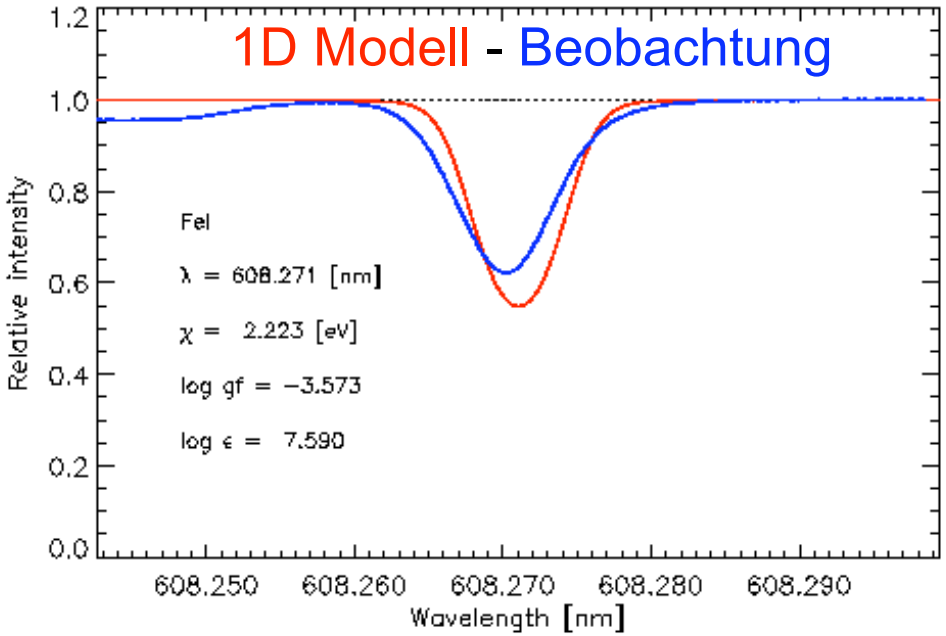
Fourierspektrum des GOLF-Instruments auf SoHo

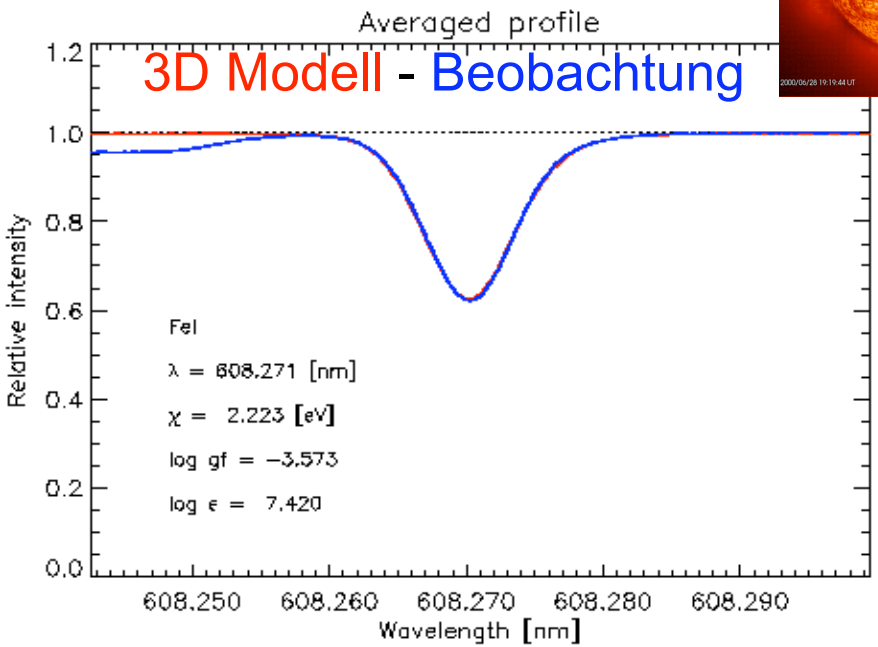
Computergenerierte stehende Wellen, p-mode ~3 mHz

Daten zur Sonne (2): Elementhäufigkeiten

aus der modellgestützten Interpretation der Fraunhofer-Linien







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

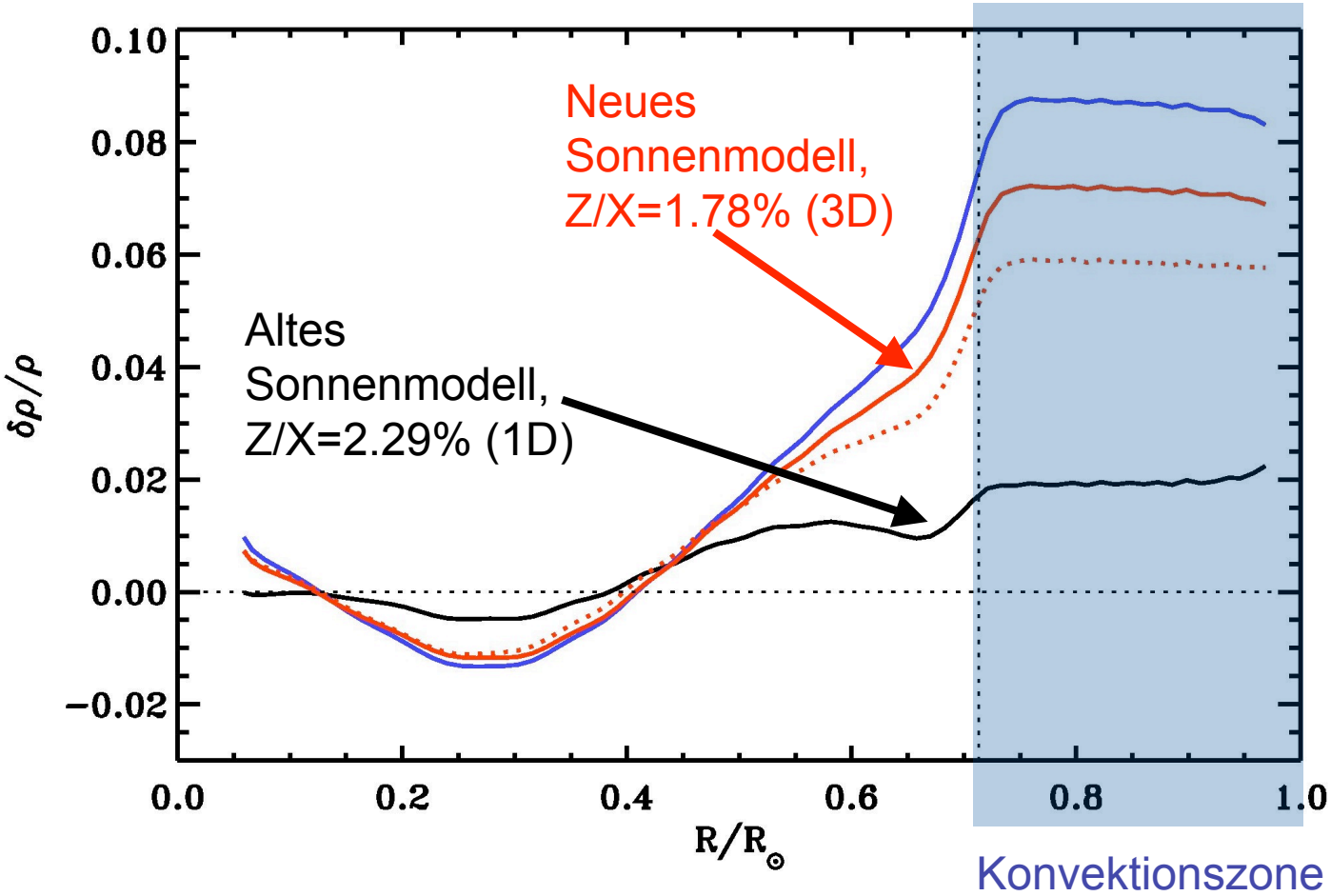
1D: 2.29% der Sonnenmasse sind “Metalle” (Li...U)

3D: 1.78% der Sonnenmasse sind “Metalle” (Li...U)

Problem:
Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

Unterschied zwischen Modell und Messung: Dichte ρ der Sonne

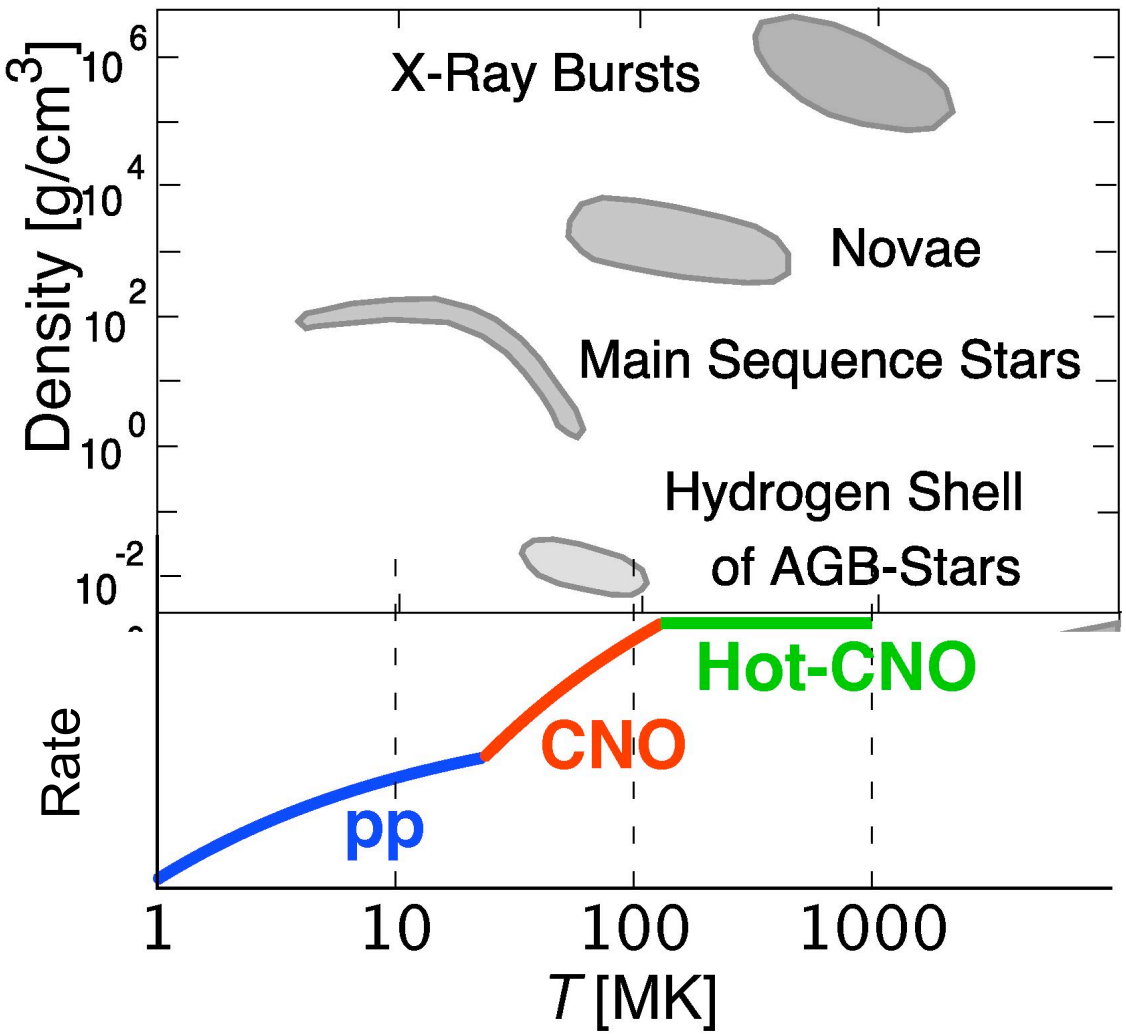
($\delta\rho/\rho$ Abweichung der Wirklichkeit vom Modell)



Weitere Widersprüche:

- Tiefe der Konvektionszone
- Helium-Häufigkeit

Wasserstoffbrennen in Sternen: pp-Kette, CNO-Zyklus, heißer CNO-Zyklus



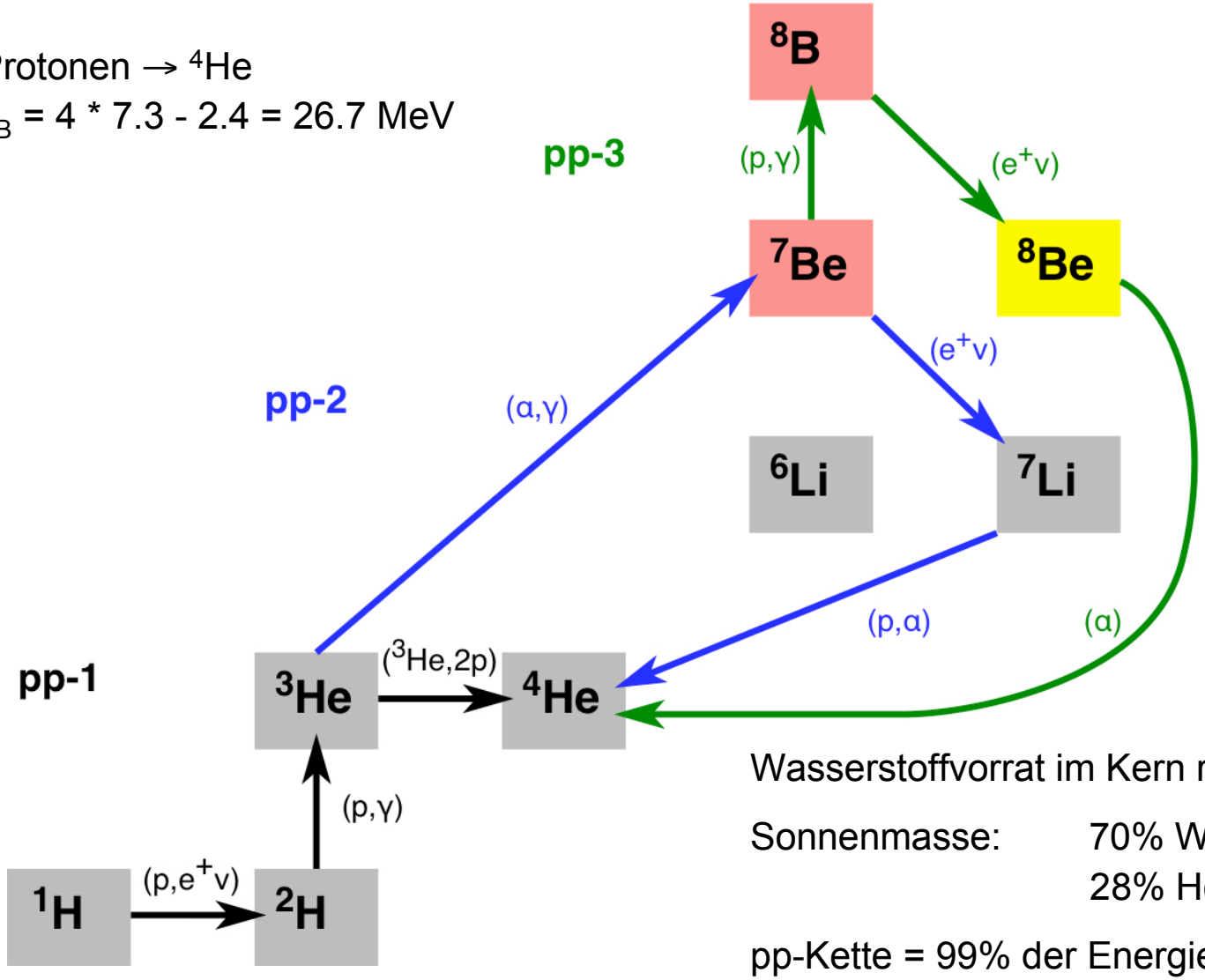
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$

$^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$

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

4 Protonen → ^{4}He

ΔE_B = 4 * 7.3 - 2.4 = 26.7 MeV

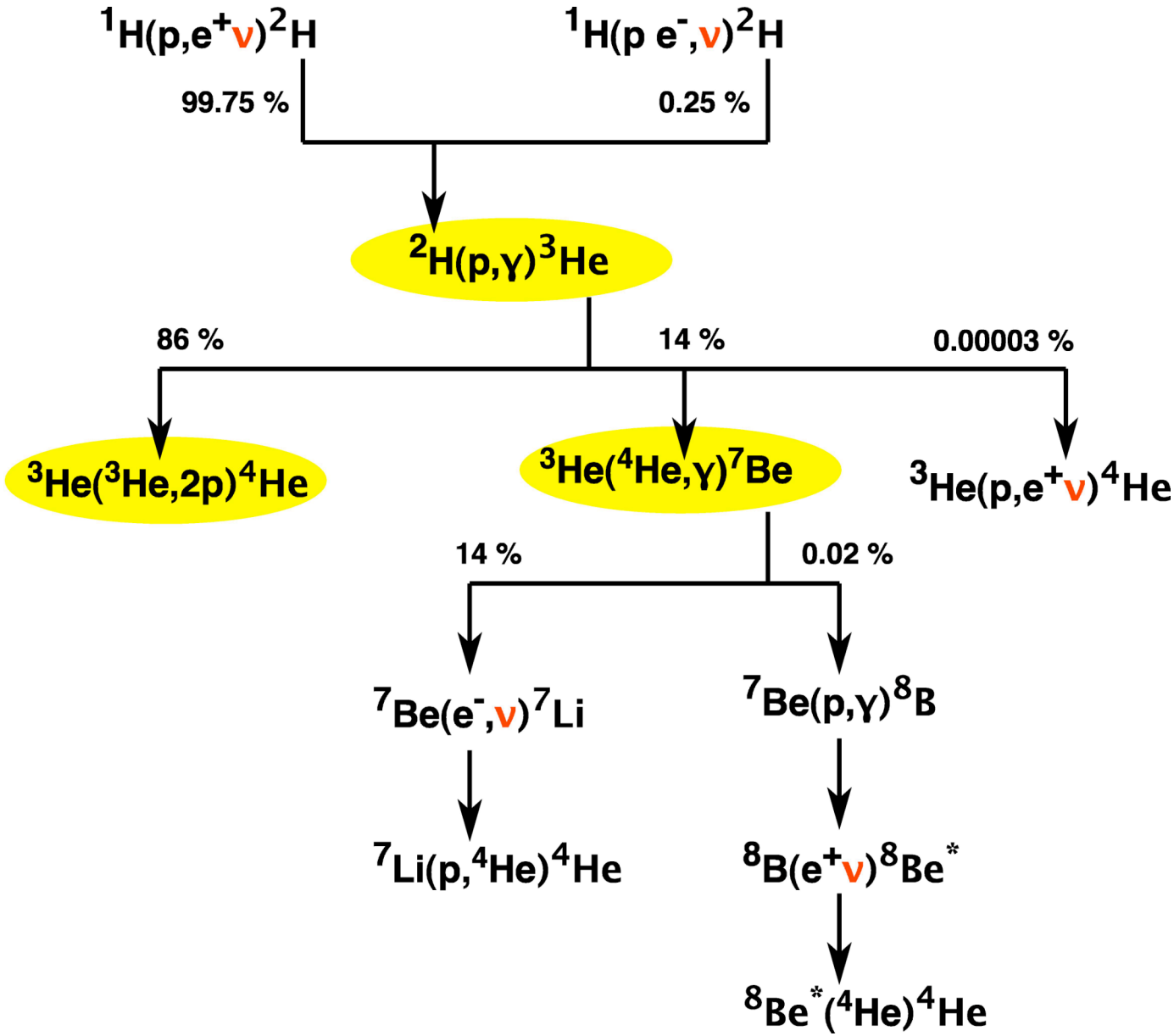


Wasserstoffvorrat im Kern reicht für 10^{10} Jahre

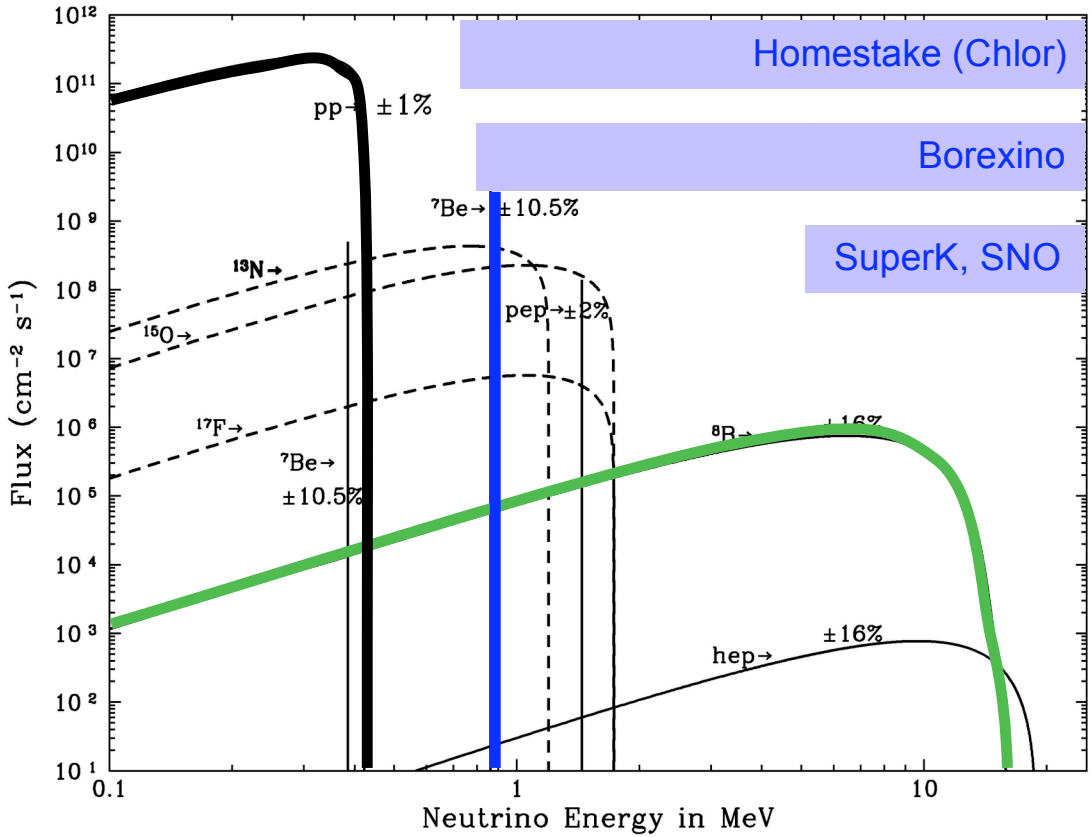
Sonnenmasse: 70% Wasserstoff
28% Helium (davon 25% primordial)

pp-Kette = 99% der Energieproduktion der Sonne

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

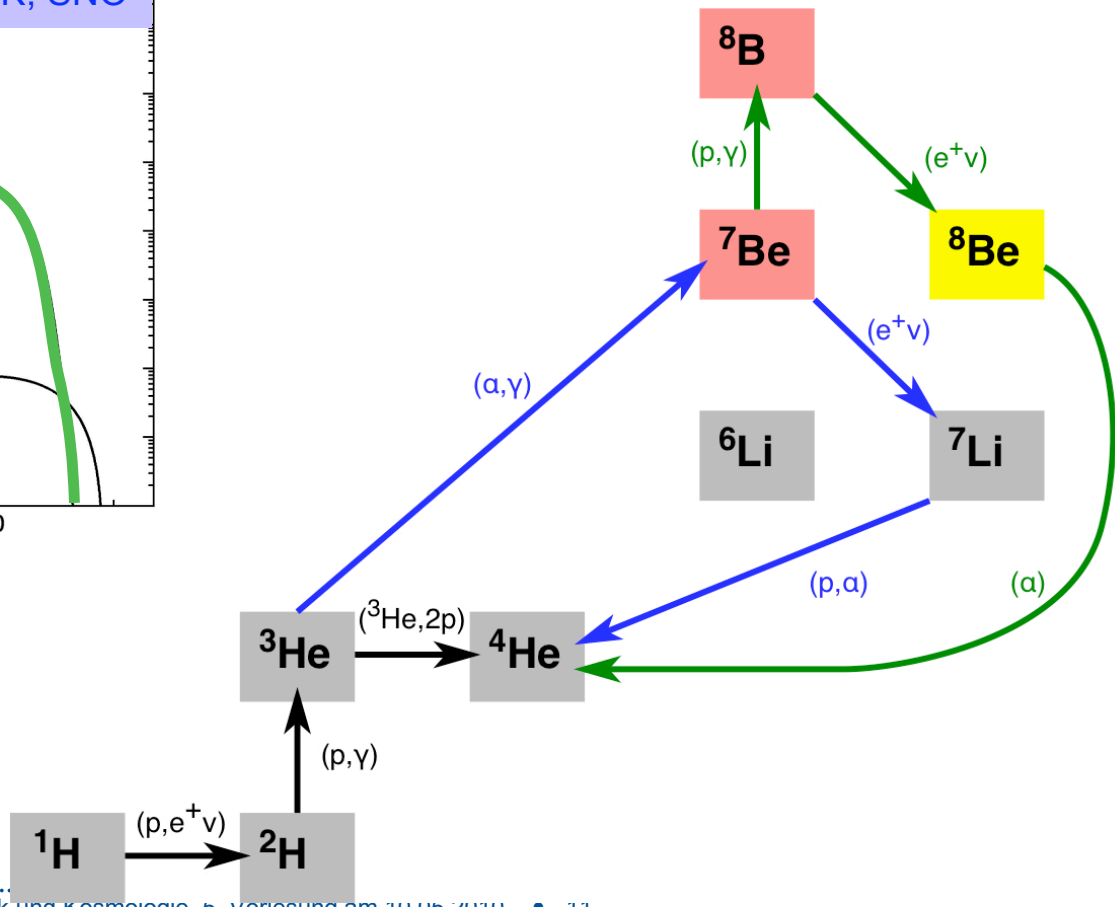


Neutrinos aus der Proton-Proton-Kette (pp-Kette)



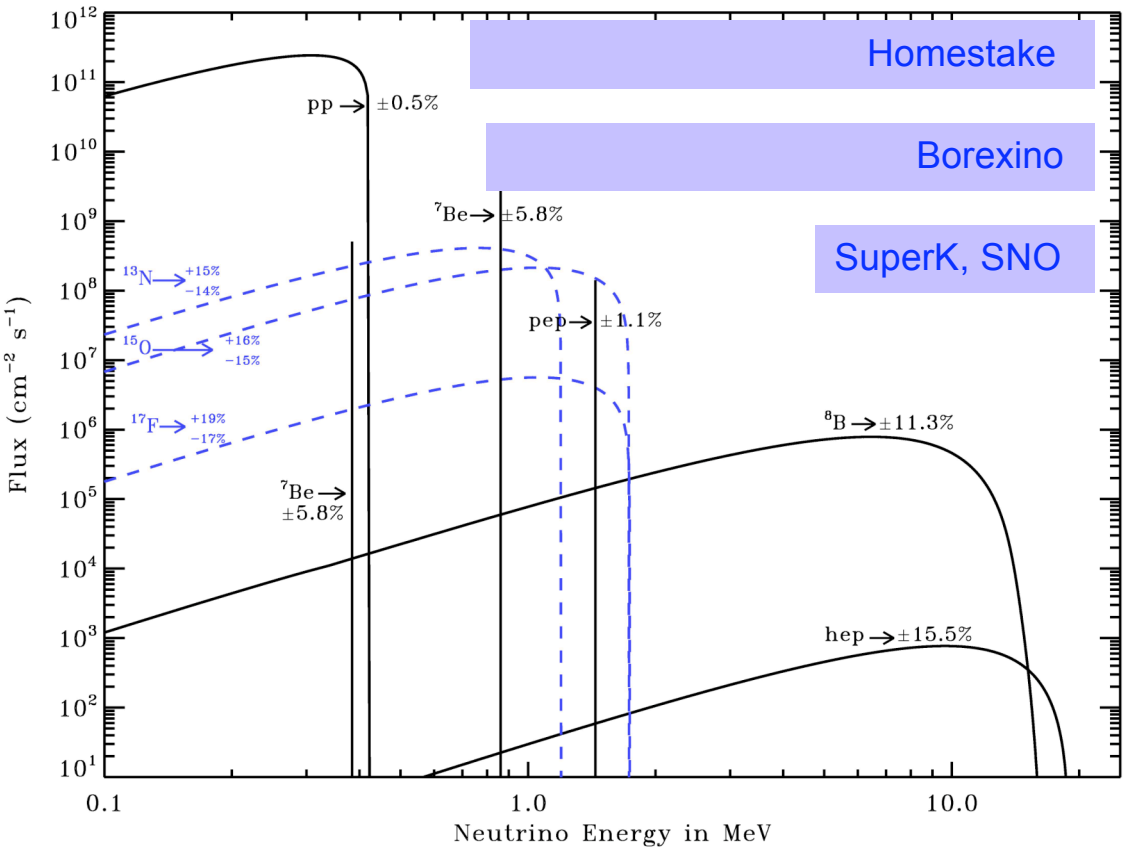
pp-1	pp-2	pp-3
85%	15%	0.02%

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



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

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

Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (1)

$$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_e$$

Ray Davis Jr.
(Nobelpreis 2002)

Homestake-Goldbergwerk (South Dakota / USA)
1500 m unter Tage
615 t Perchlorethylen (C_2Cl_4) als Detektor

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

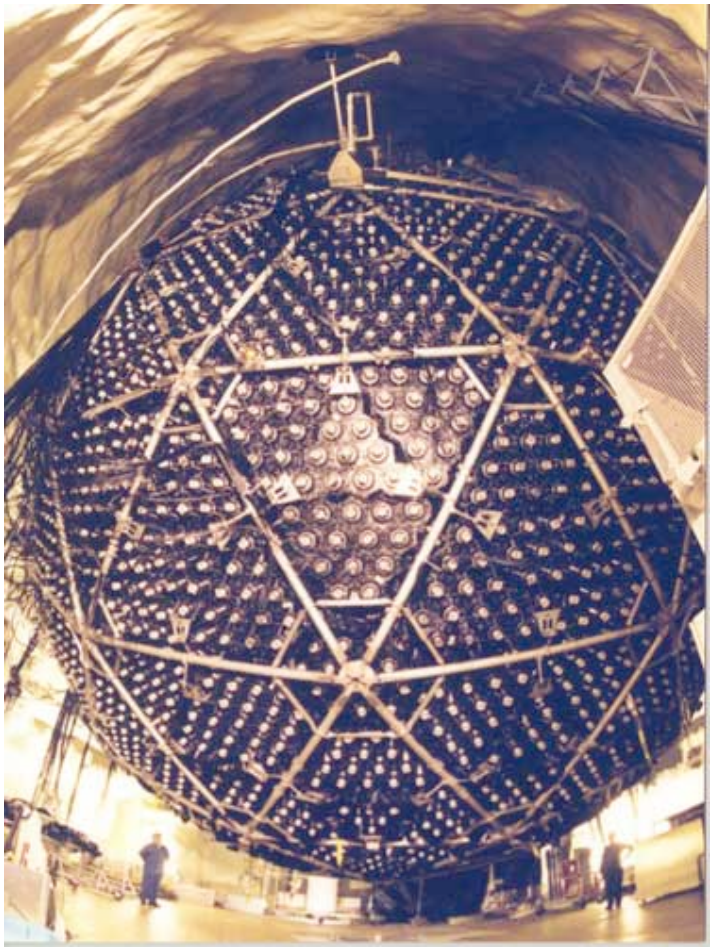
Gemessen: 2.56±0.23 SNU 1 SNU = 10^{-36} Einfänge/(e^- s)

Sonnenmodell: 8.5 SNU

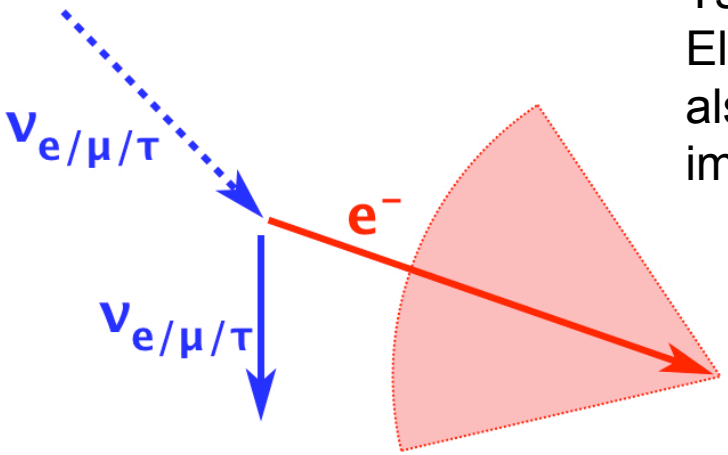
“Solares Neutrinoproblem”, 1972-2002

Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (2)

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada):



Schwerwasser-Tscherenkow-Zähler
1000 t D_2O , 2100 m unter Tage



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

ES = Elastic scattering:	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
NC = neutral current:	$\nu_x + {}^2H \rightarrow p + n + \nu_x$
CC = charged current:	$\nu_e + {}^2H \rightarrow p + p + e^-$

Die Lösung des solaren Neutrino-Problems, 2002

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada) weist direkt auch solare ν_μ, ν_τ nach.
Konzentration auf Neutrinos mit > 5 MeV Energie (hauptsächlich aus ^{8}B-Zerfall)

ES:	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	Φ_{ES}
NC:	$\nu_x + {}^2H \rightarrow p + n + \nu_x$	Φ_{CC}
CC:	$\nu_e + {}^2H \rightarrow p + p + e^-$	Φ_{NC}

Umformung

$$\phi_e = 1.76^{+0.05}_{-0.05}(\text{stat})^{+0.09}_{-0.09}(\text{syst}),$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45}(\text{stat})^{+0.48}_{-0.45}(\text{syst}),$$

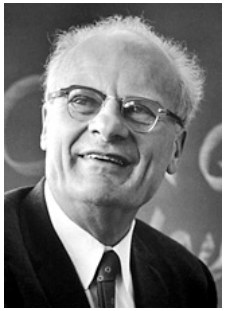
$\Phi_e + \Phi_{\mu\tau} = 5.17 \pm 0.67$ (stat.+syst.)

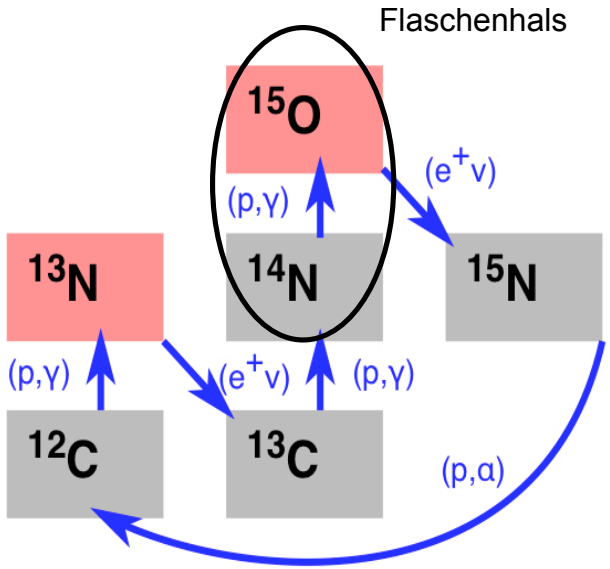
(Experiment, SNO)

Sonnenmodell: 4.72...5.94

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

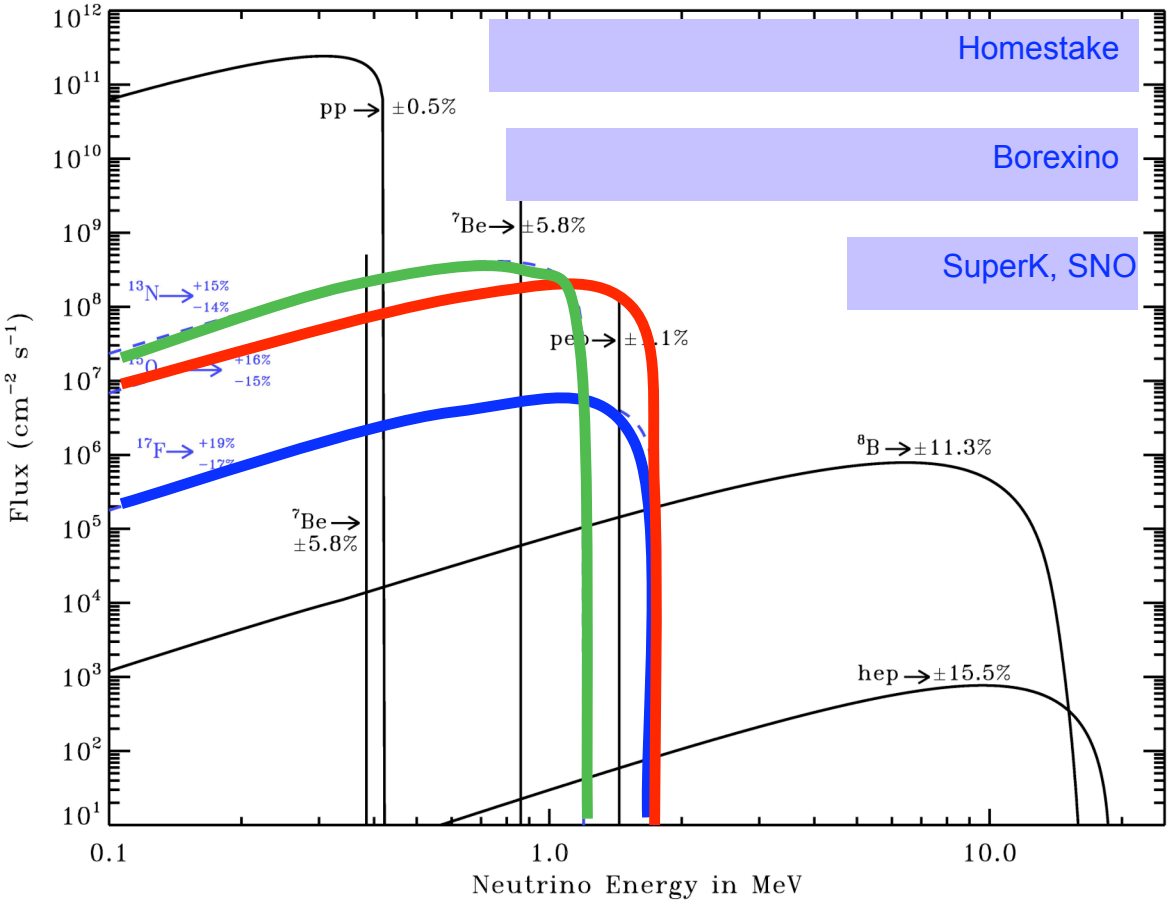
Wasserstoffbrennen (2): Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)



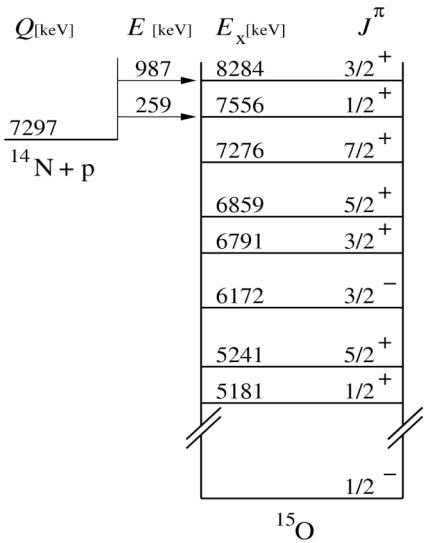


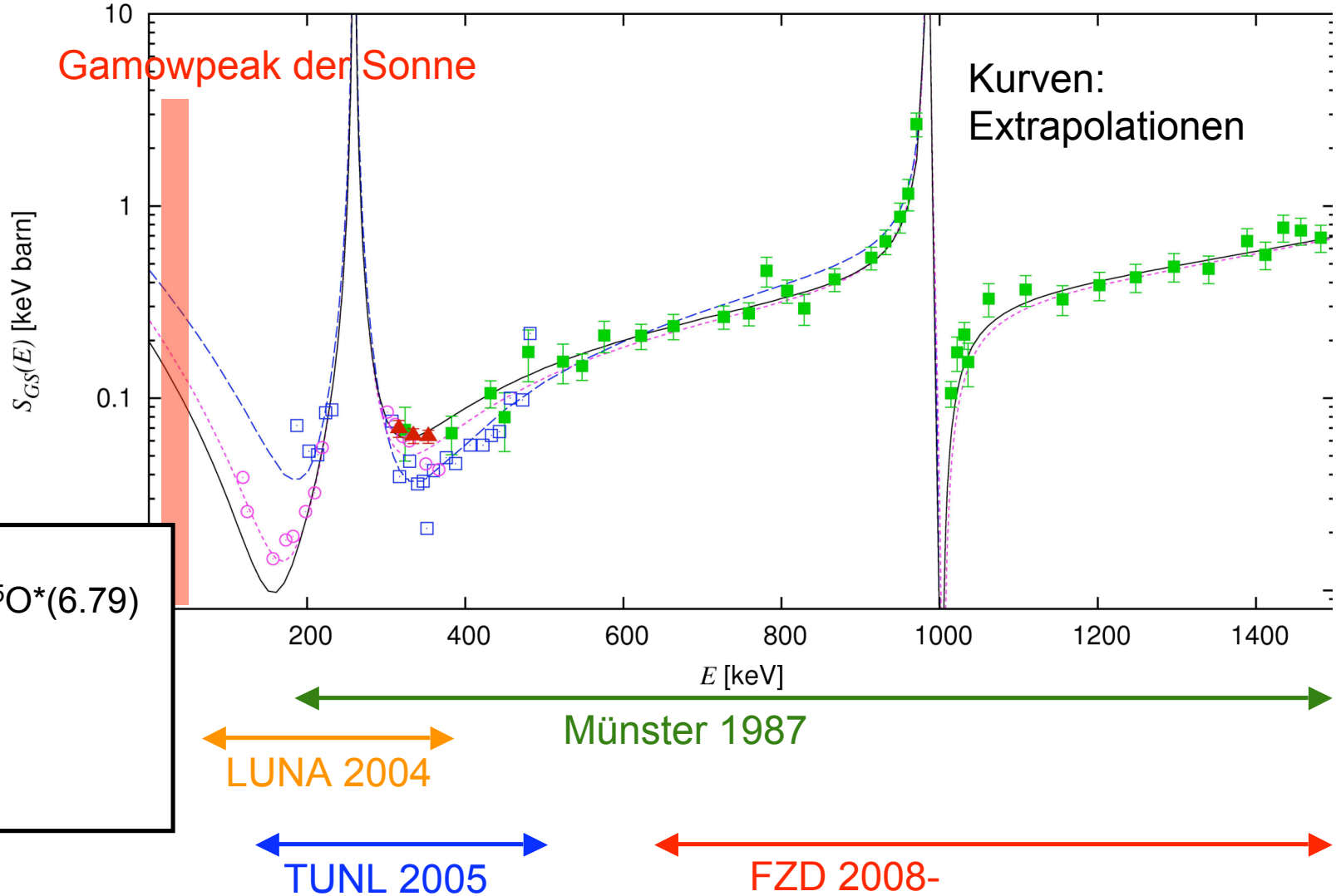
1938 postuliert

- Flaschenhals: $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$
- 0.8% der Energieproduktion der Sonne
- CNO-Neutrinofluss wird bald messbar (Borexino, SNO+)
- Direkt abhängig von C- und N-Häufigkeit im Sonnenkern



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

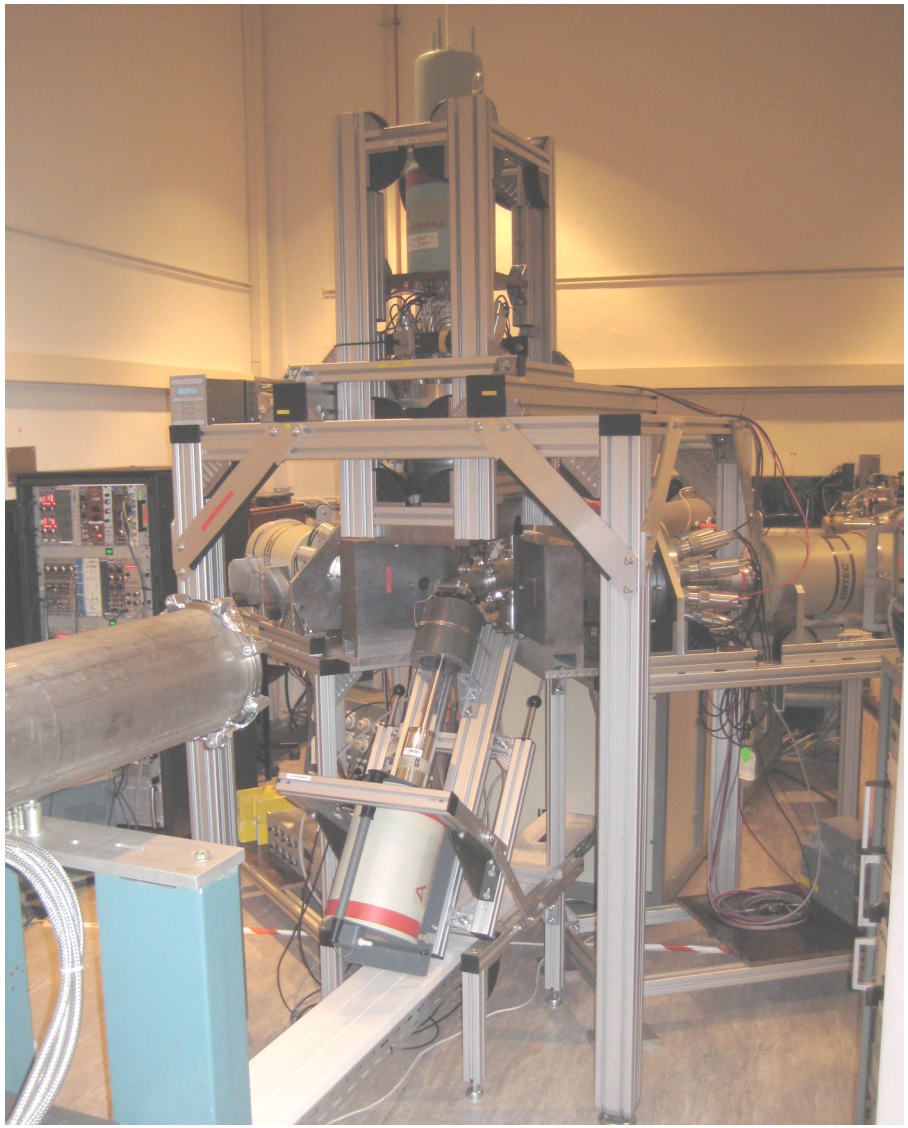




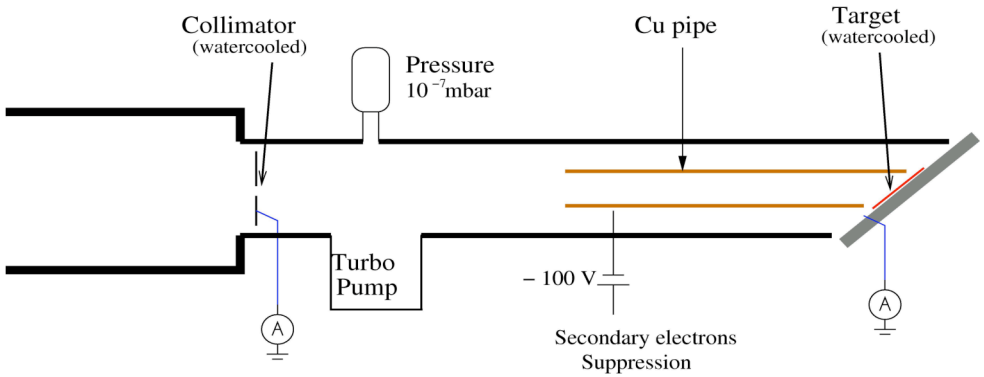
Wichtige Niveaux

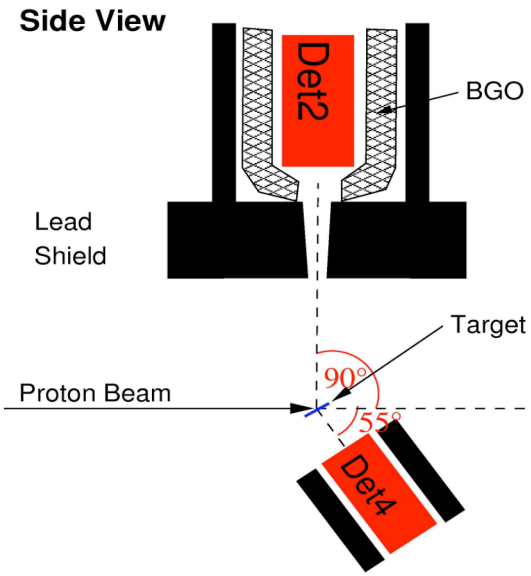
- E = -0.504 MeV, $^{15}O^*(6.79)$
- E = 0.259 MeV
- E = 0.987 MeV
- E = 2.187 MeV
- “background pole”

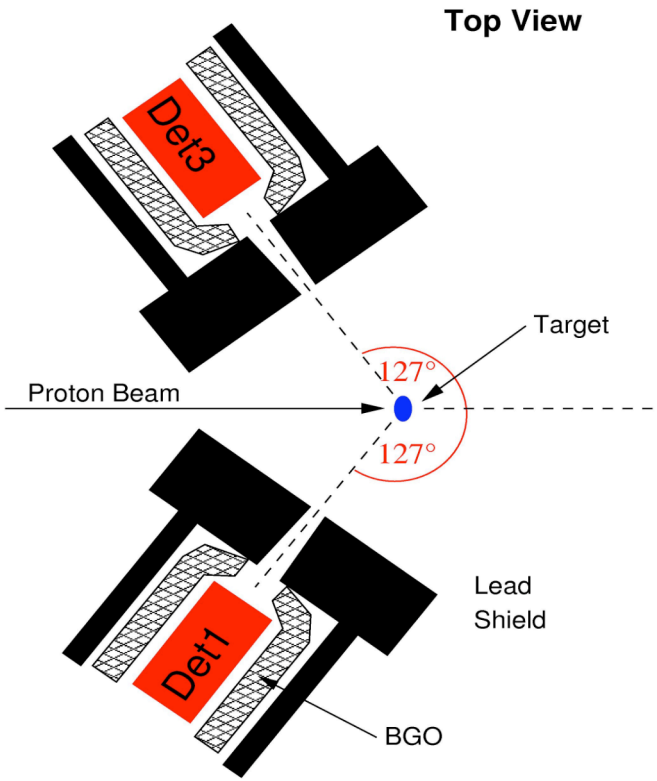
Versuchsaufbau am FZD Tandetron, Dresden

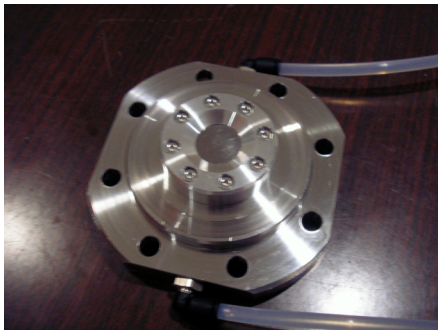


Detektoren und Targets

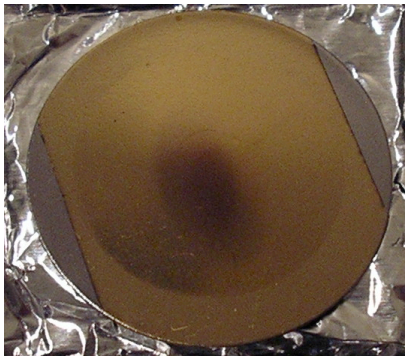








15 cm



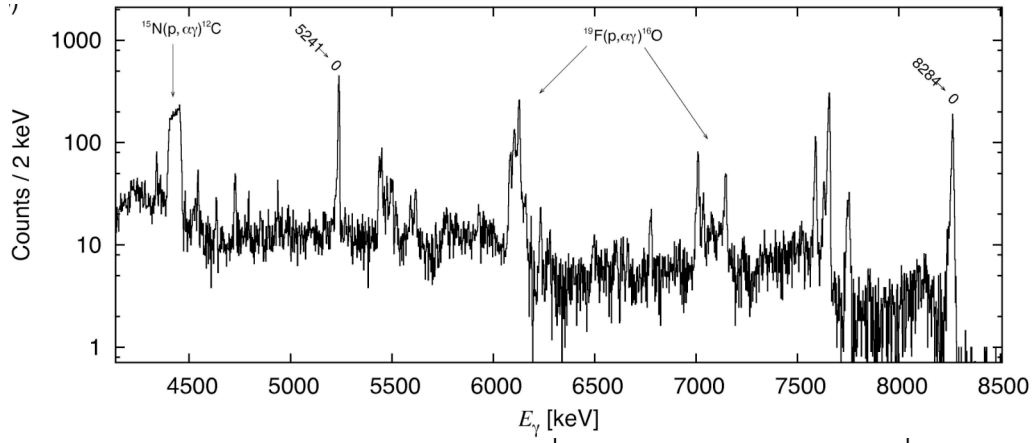
1 cm

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

278 keV Normierungspunkt:

$\omega\gamma$ = (13.1 ± 0.6) meV

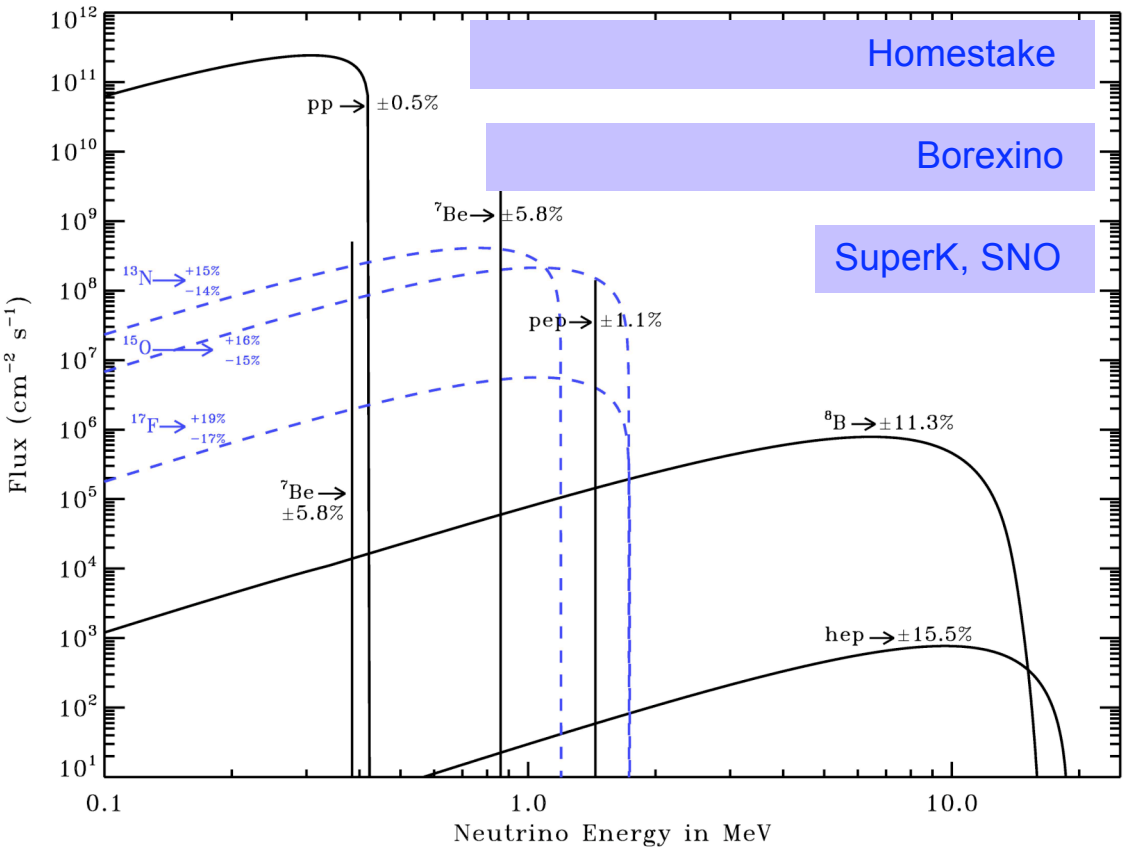
$$Y = \frac{\lambda^2}{2}\frac{1}{SP_{\text{eff}}}\omega\gamma$$



Reaction	Literature [23, 52]		Present		Literature
	E_p [keV]	Γ_{lab} [keV]	$\omega\gamma_n/\omega\gamma_{278}$	$\omega\gamma$ [eV]	$\omega\gamma$ [eV]
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$	278	1.12^a	$\overset{\text{Def}}{=}1$	—	0.0131 ± 0.0006^b
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$	1058	3.8^c	27.8 ± 0.9	0.364 ± 0.020	0.31 ± 0.04 [25]
$^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$	430	0.1	$(1.73\pm0.07)\cdot10^3$	22.7 ± 1.4	21.1 ± 1.4 [46]
$^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$	897	1.57	$(2.77\pm0.08)\cdot10^4$	362 ± 20	293 ± 38 [63]

→M. Marta et al., Phys. Rev. C (2010)

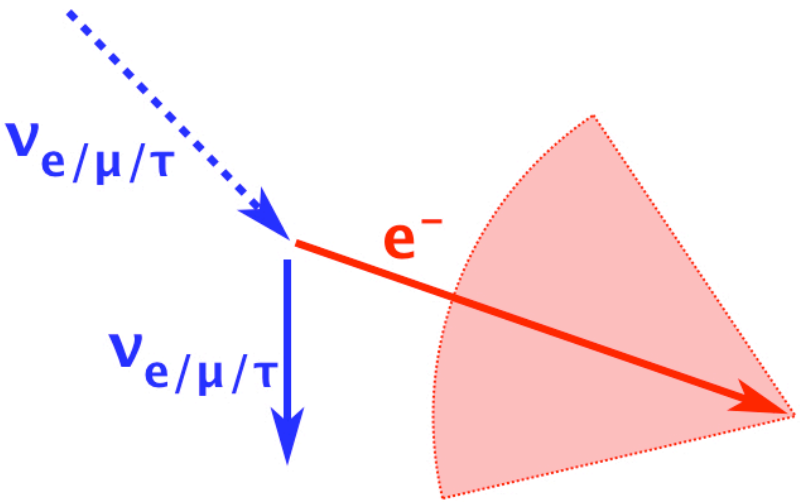
Neutrinos aus dem CNO-Zyklus (Standard-Sonnenmodell BPS08)

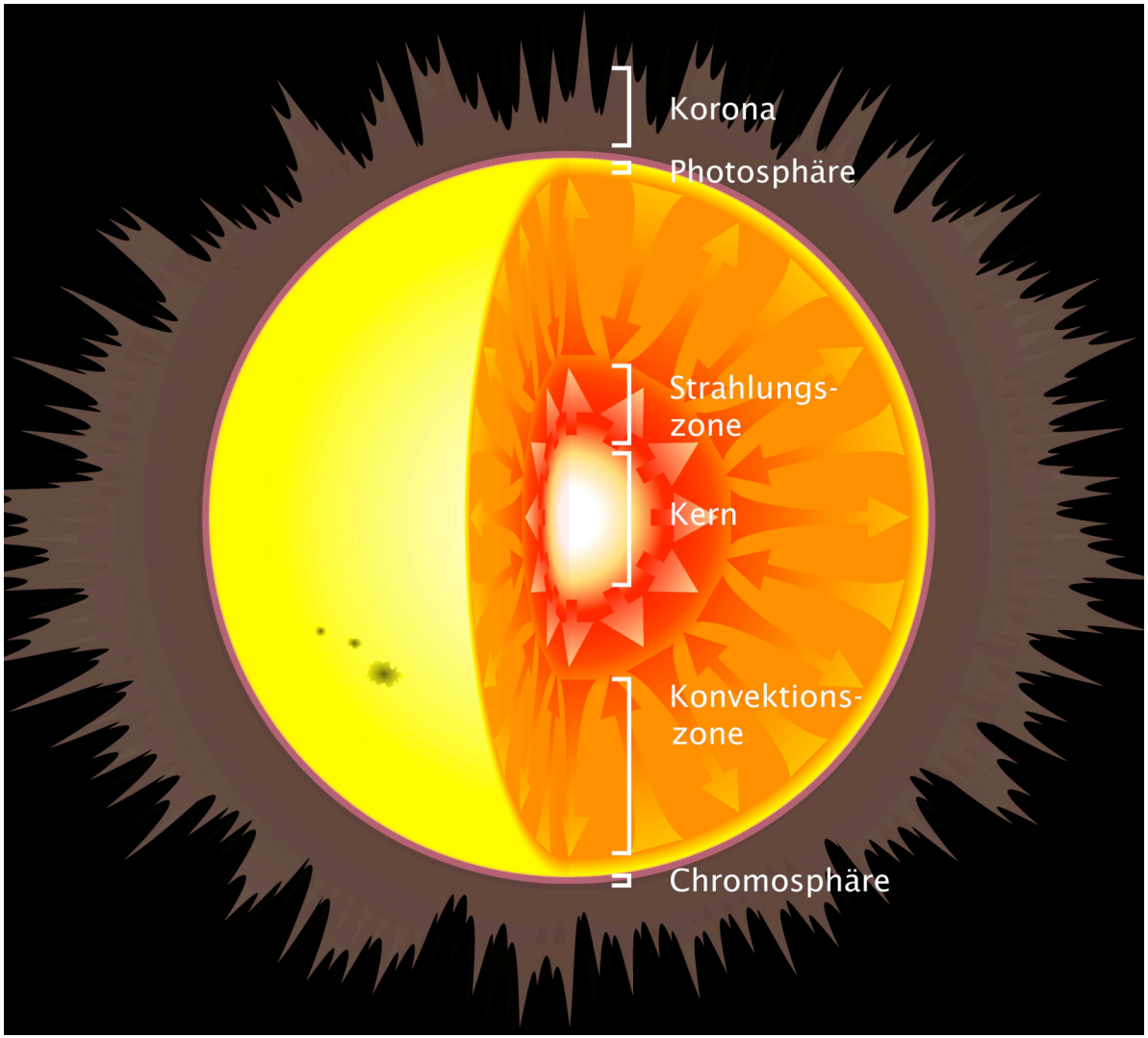


Neutrino-Flüsse in $10^6/(cm^2\ s)$

- BPS08(AGS)
  Neue (>2005) Elementhäufigkeiten
  Nicht konsistent mit Helioseismologie
  $\Phi(^8B) = 4.72$ $\Phi(^{15}O) = 1.34$

- Experiment (SNO, Super-Kamiokande)
  $\Phi(^8B) = 4.91 \pm 0.17(stat)$
  $\Phi(^{15}O)$ ... Borexino/SNO+ Detektoren



Zusammenfassung

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