

# 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 (heute)
- Neutronensterne
- Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- Altersbestimmung des Universums (heute)
- **Fundamentale Physik und die Sonne (heute)**

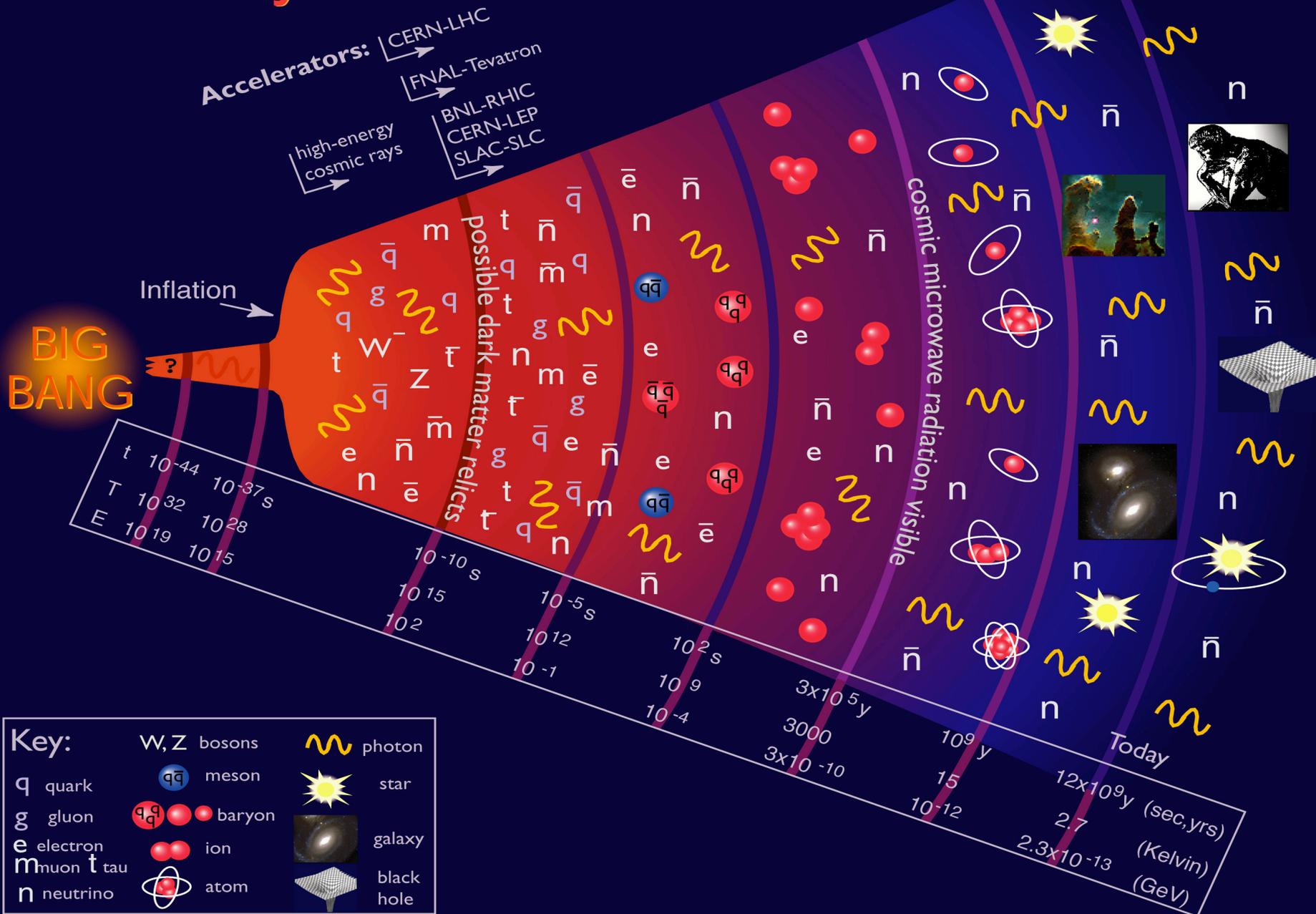
11. Vorlesung, 24.06.2014



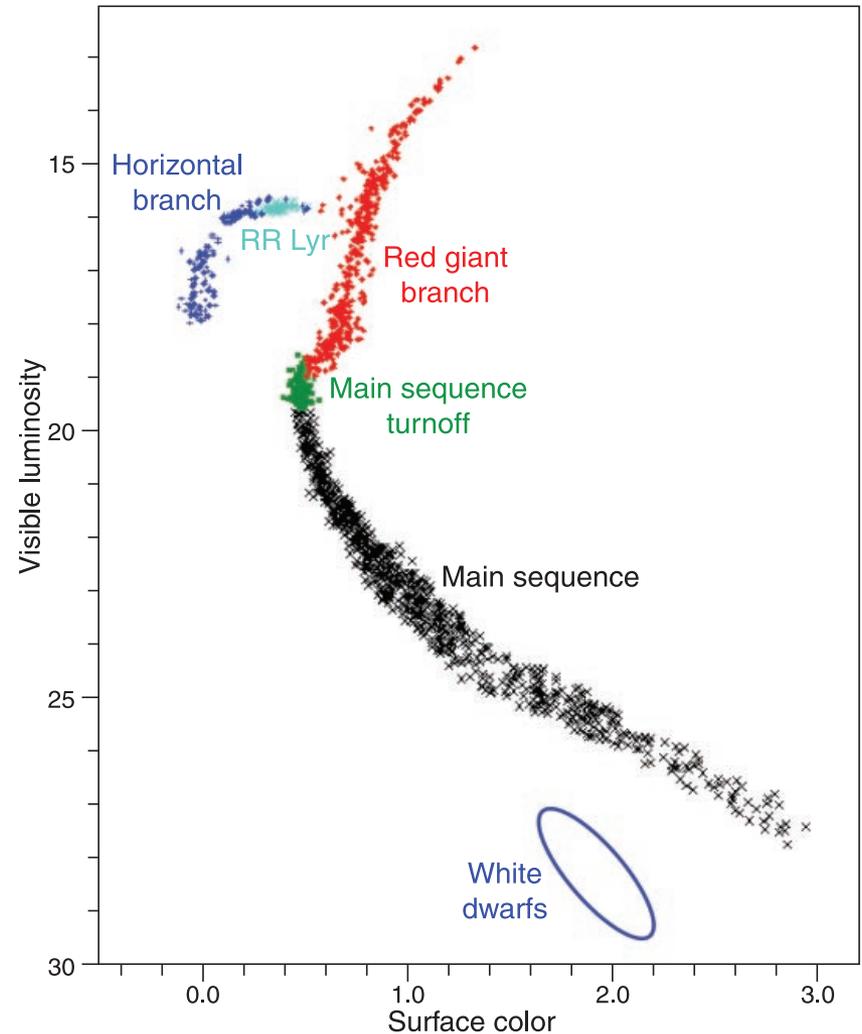
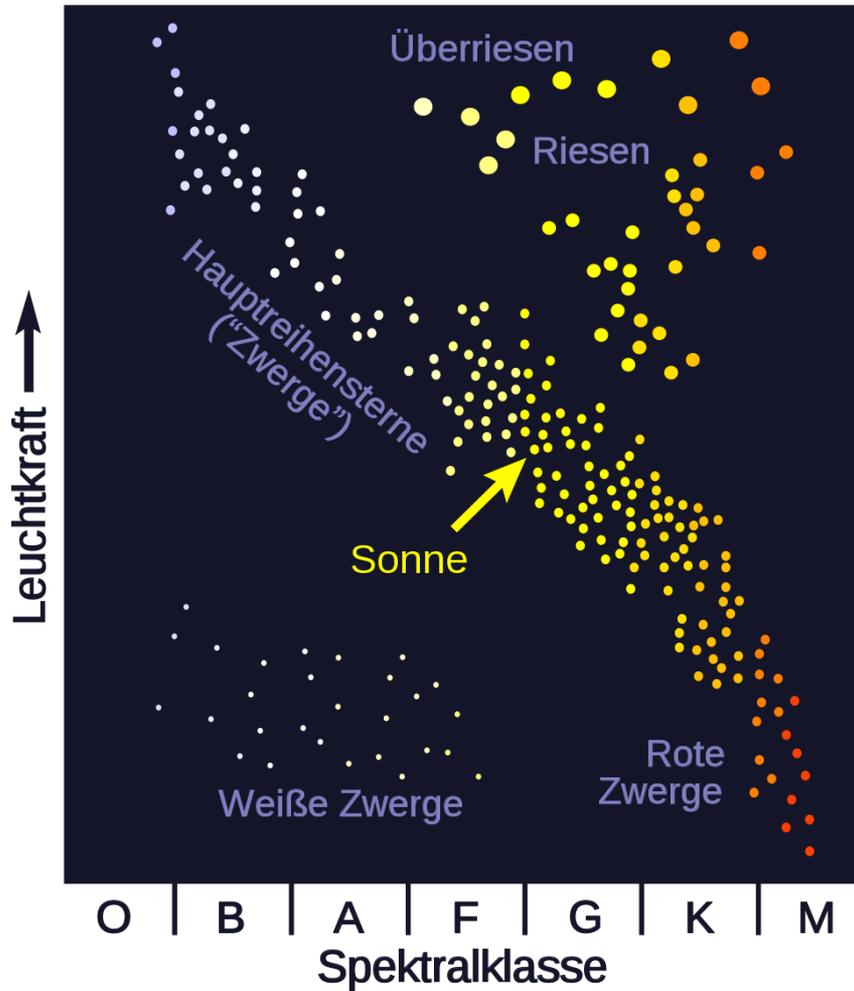
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



# History of the Universe

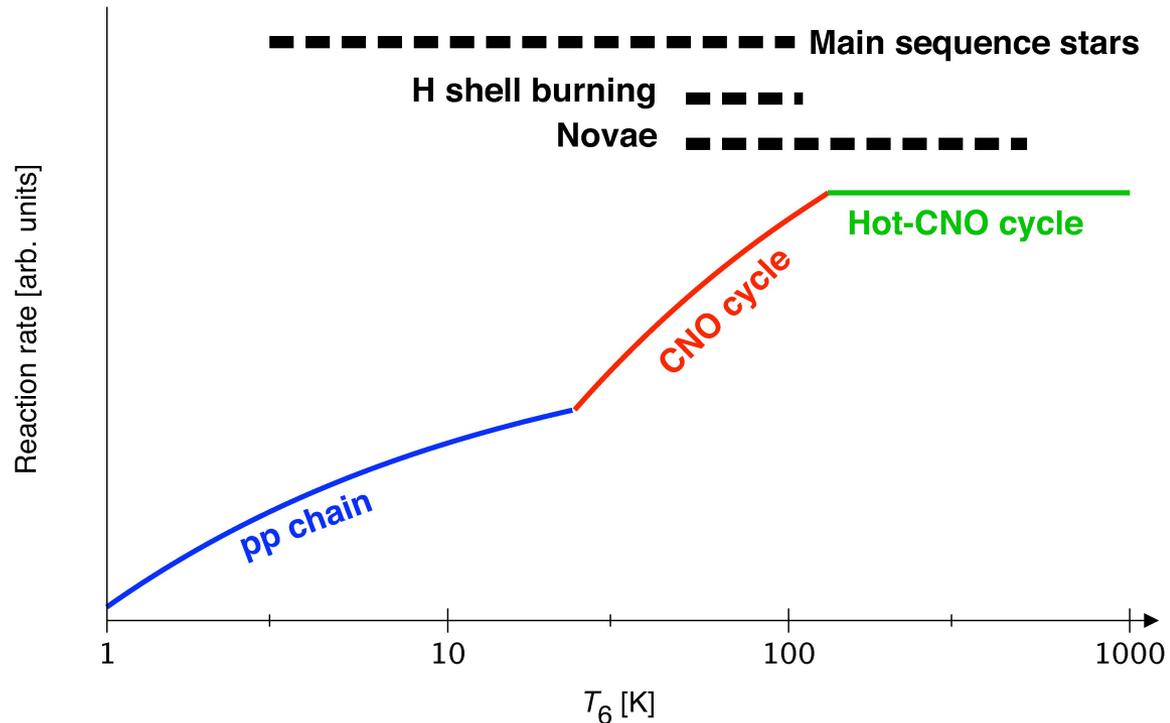
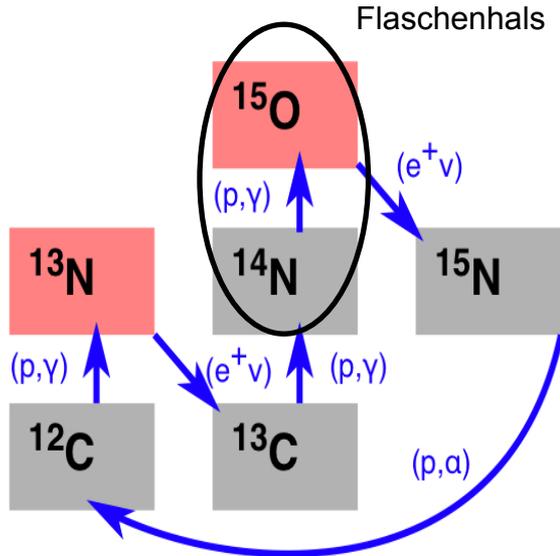
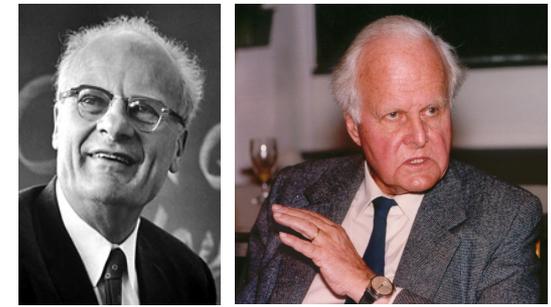


# Altersbestimmung sehr alter Sterne (in Kugelsternhaufen)



→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe Krauss & Chaboyer (2003)

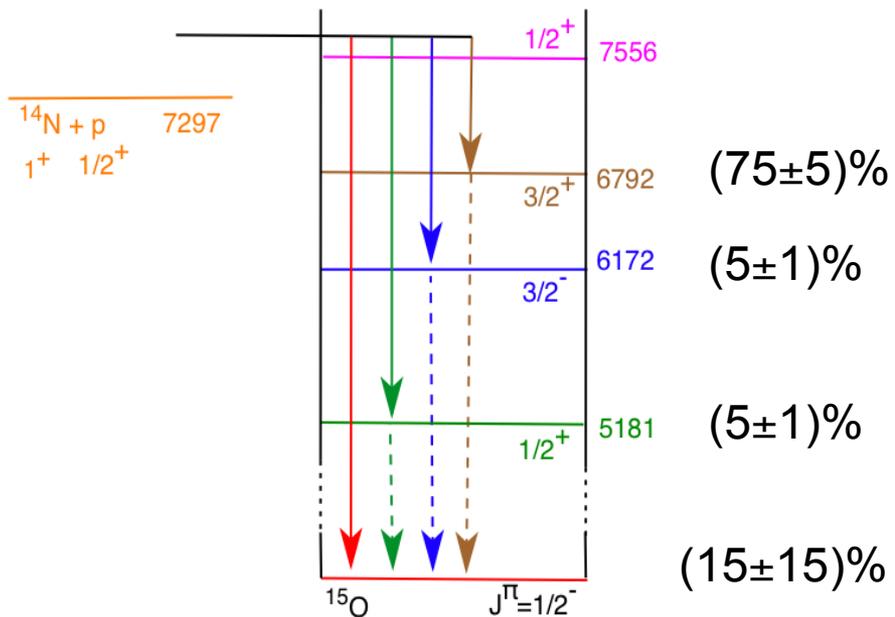
# Wasserstoffbrennen: Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)



1938 postuliert

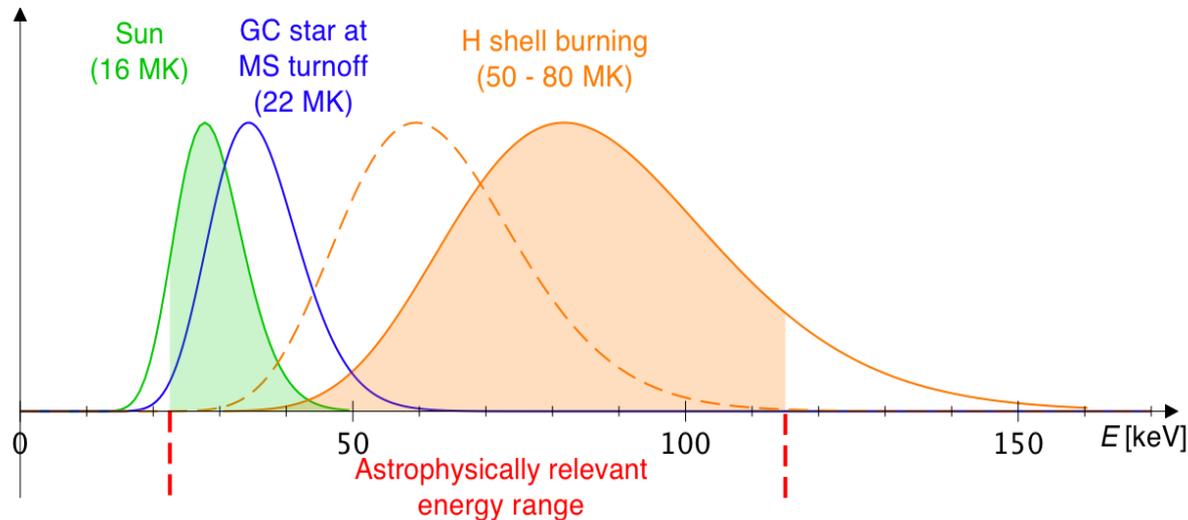
- Flaschenhals:  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$
- 0.8% der Energieproduktion der Sonne
- Bestimmung des Alters von Kugelsternhaufen

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

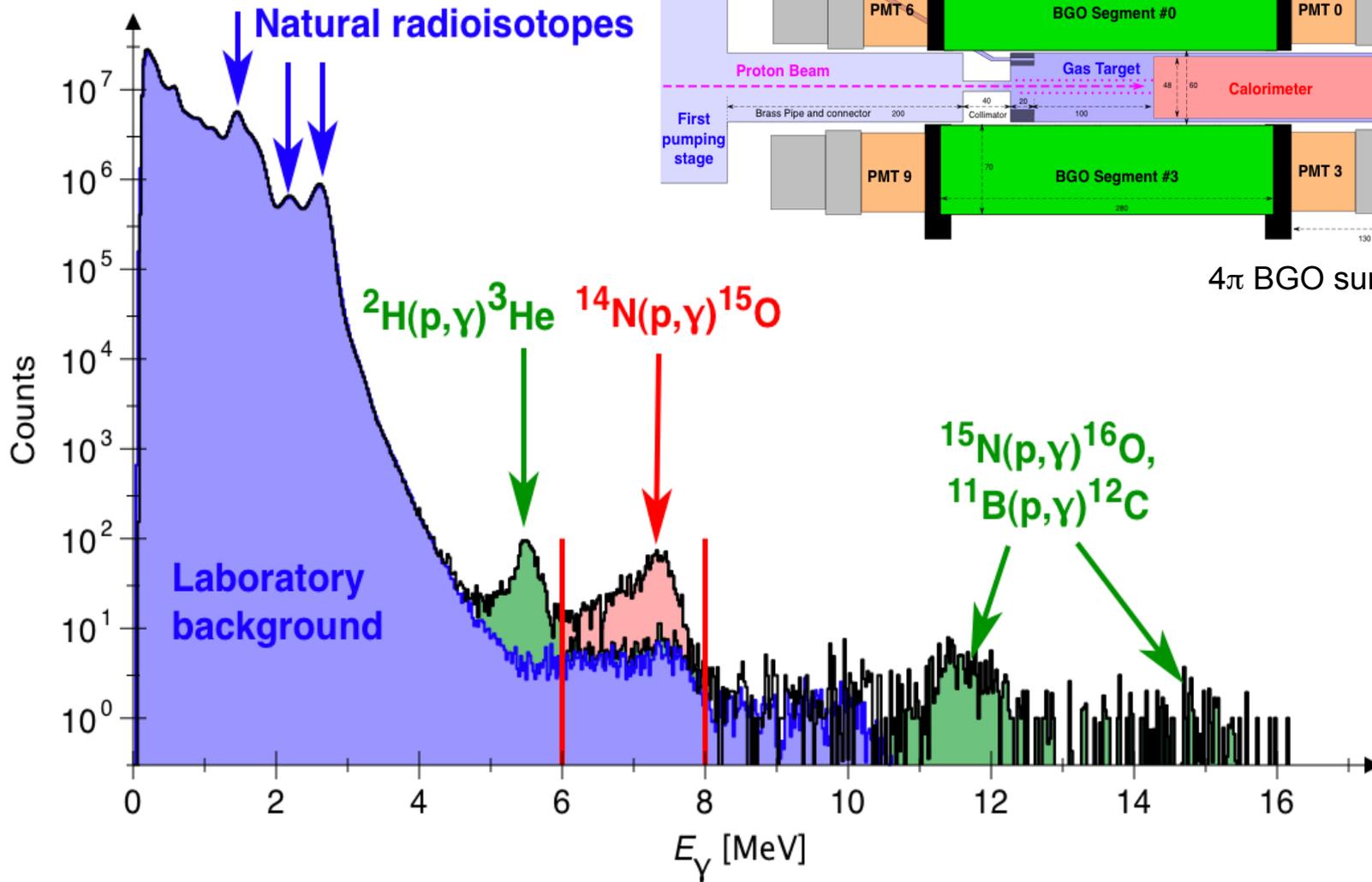


## Zwei mögliche Ansätze für Experimente

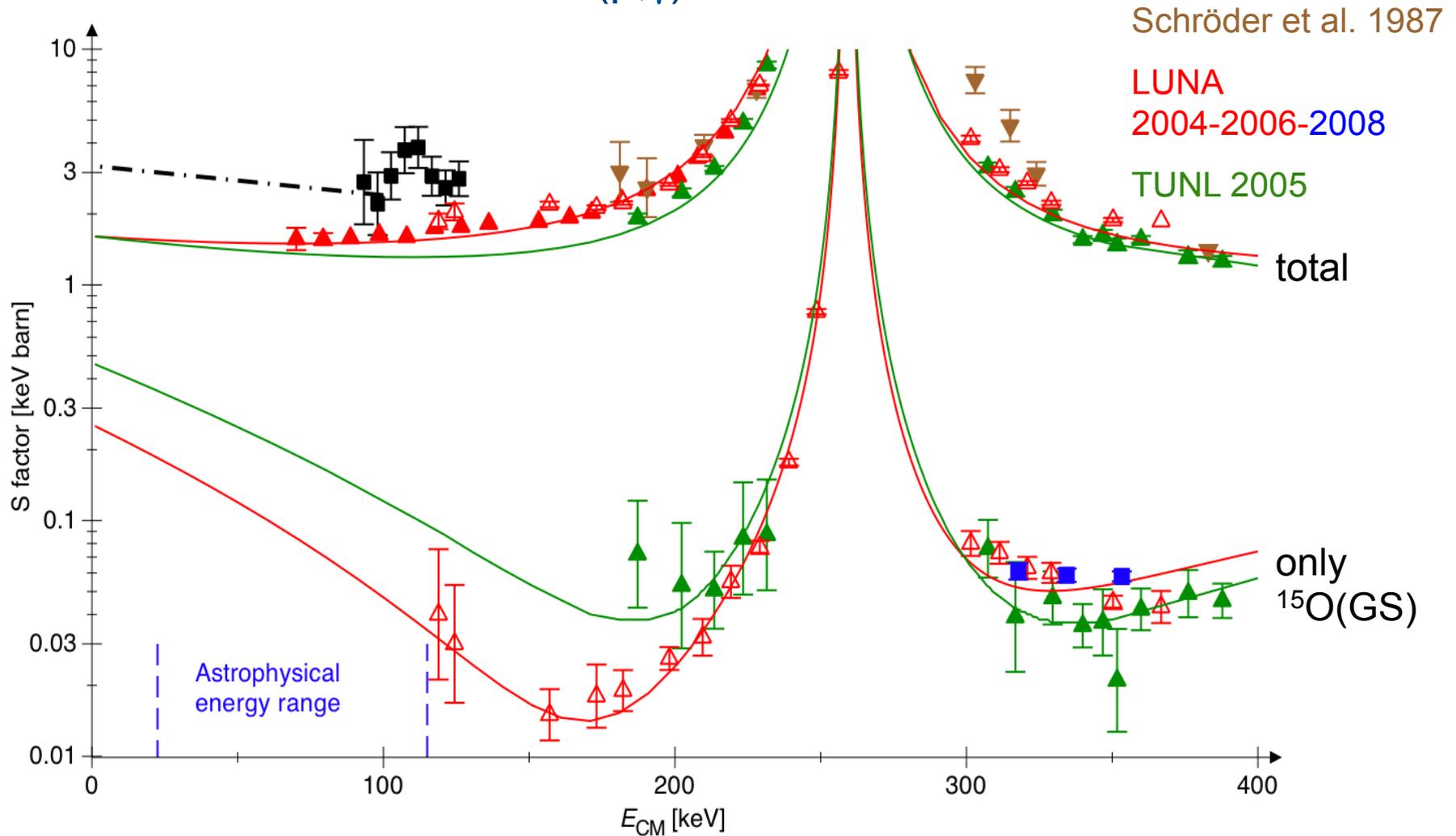
1. Untersuche Einfang in jeden Level im Einzelnen, dann extrapoliere.
2. Untersuche alle Levels gleichzeitig in einem Summendetektor, aber verzichte (gezwungenermaßen) auf die Extrapolation



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



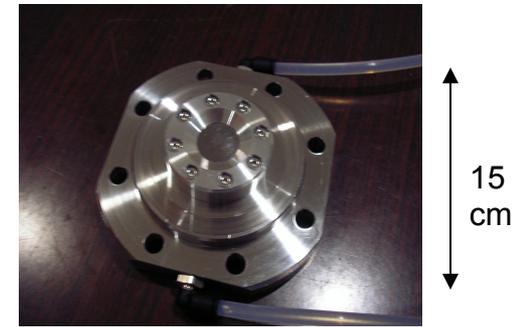
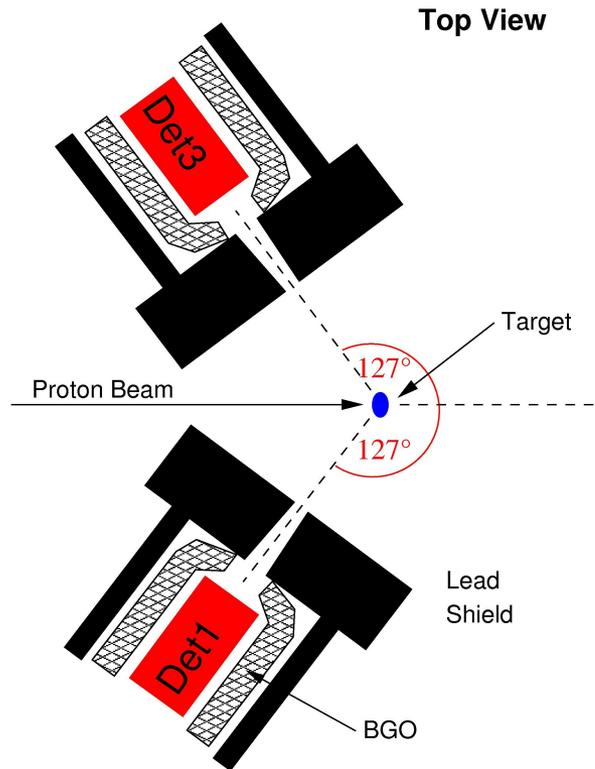
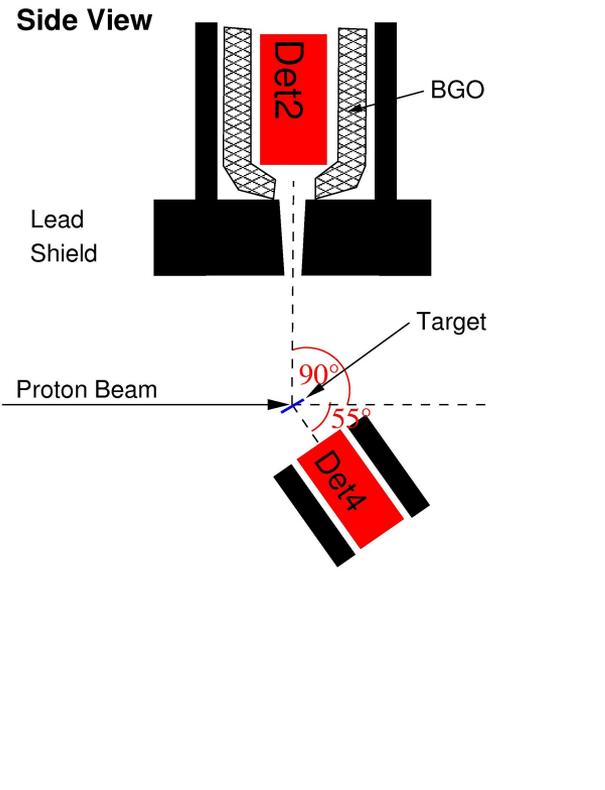
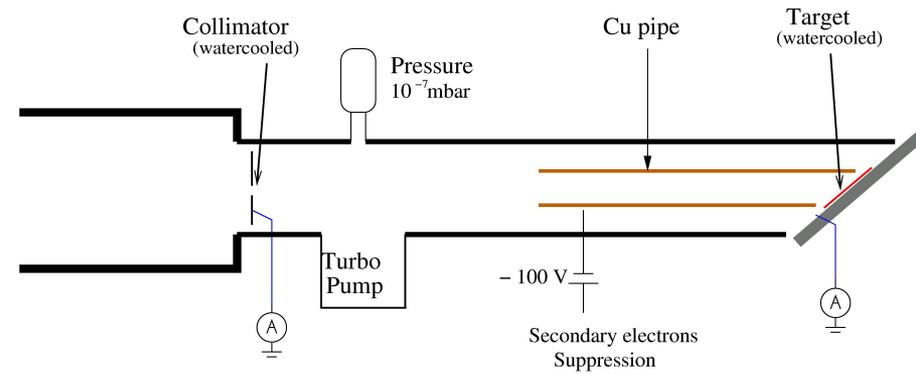
# Gesamter S-Faktor von $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$



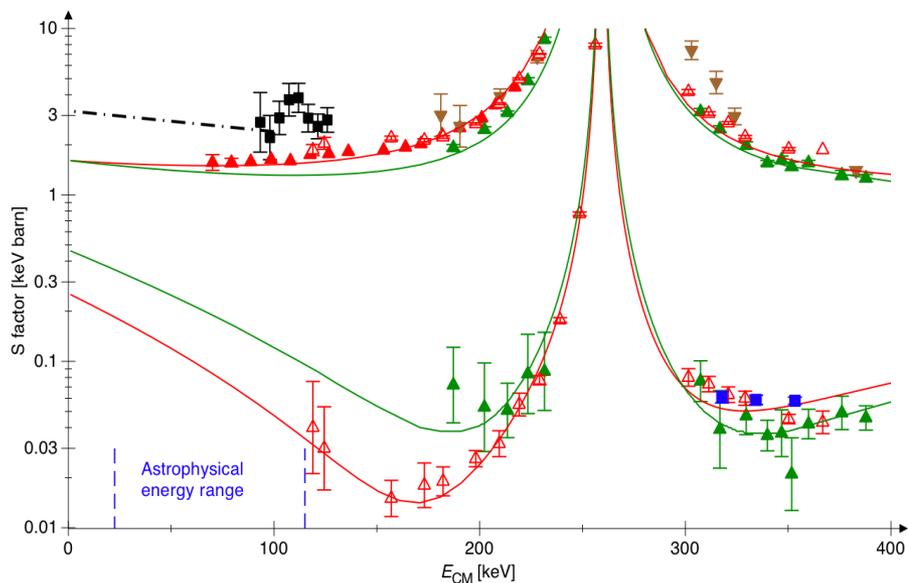
# Versuchsaufbau am HZDR Tandetron, Dresden



# Detektoren und Targets



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



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

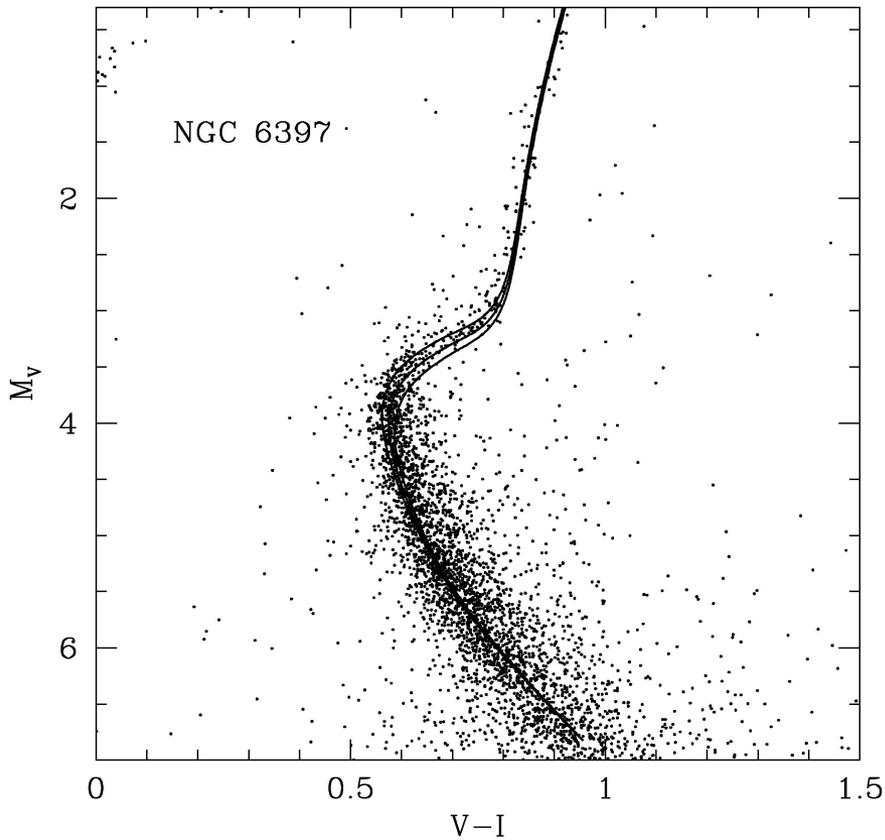
- A. Formicola et al., Phys. Lett. B 591, 61 (2004)
- A. Lemut et al., Phys. Lett. B 634, 483 (2006)
- M. Marta et al., Phys. Rev. C 78, 022802 (R) (2008)

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

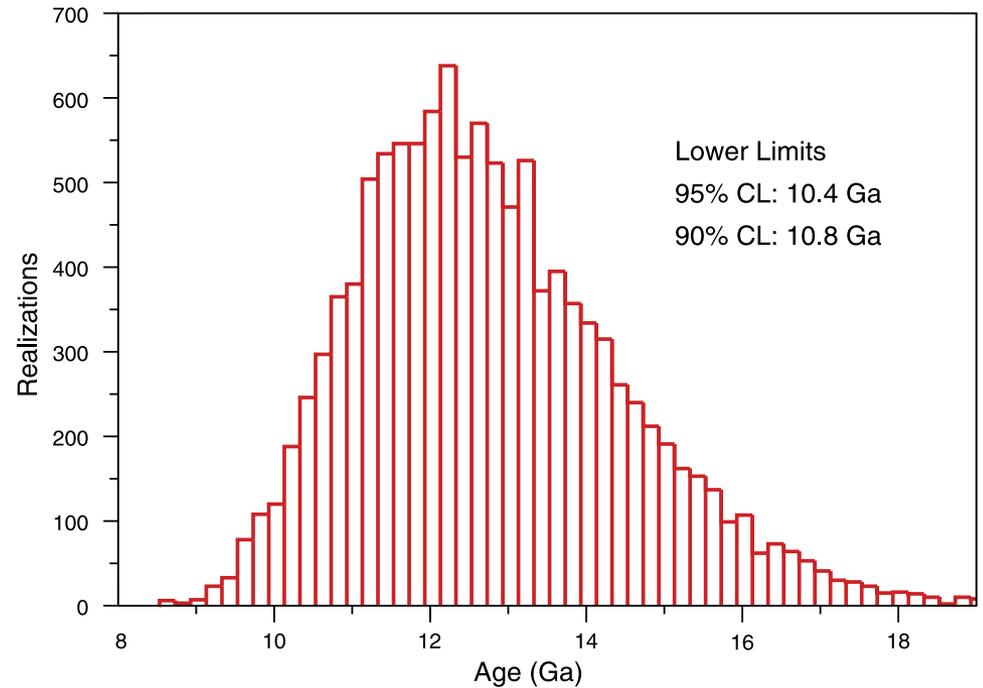
→  $1.72 \pm 0.12$  keV barn (2009)

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)



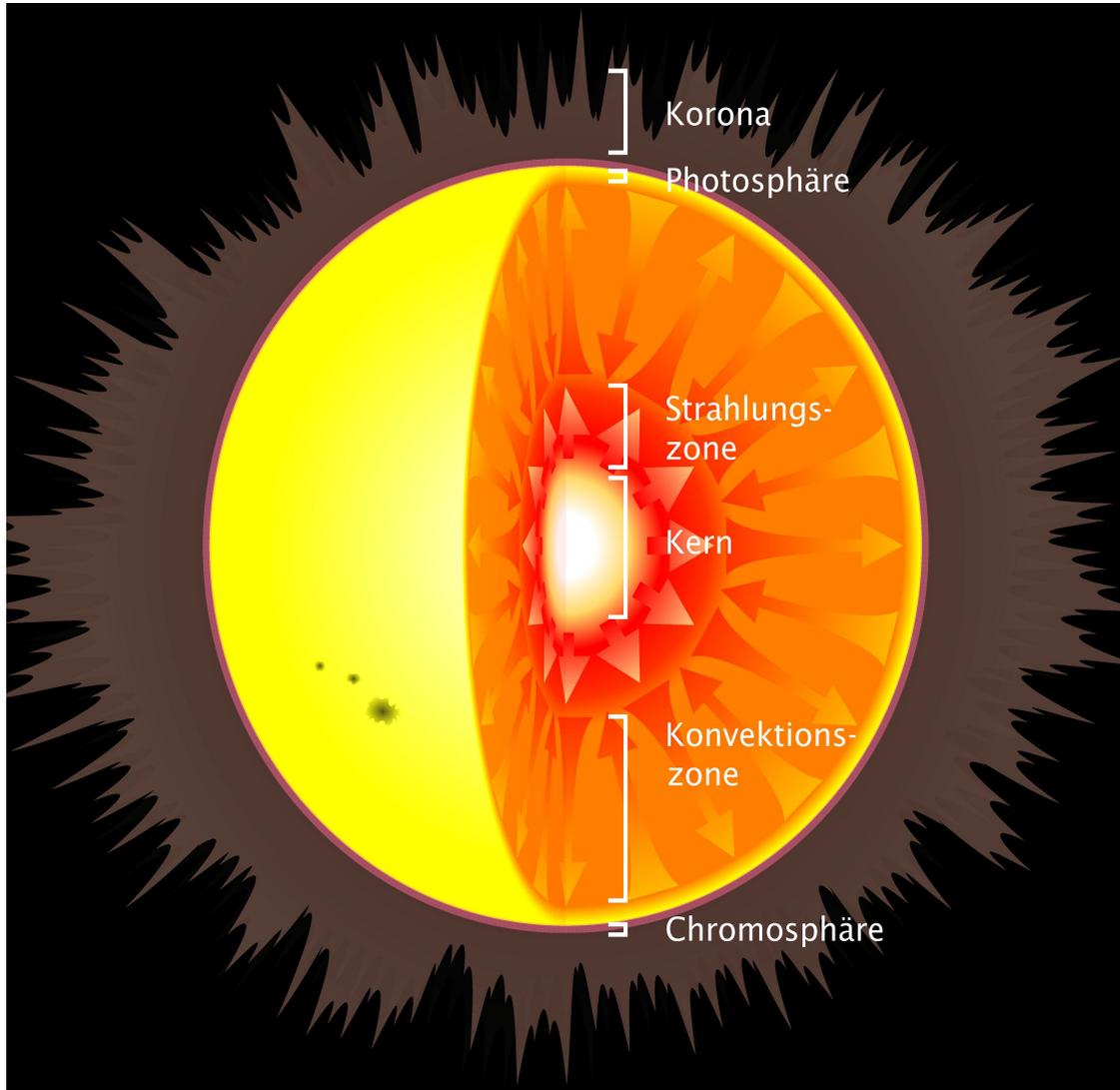
Imbriani et al. (2004)



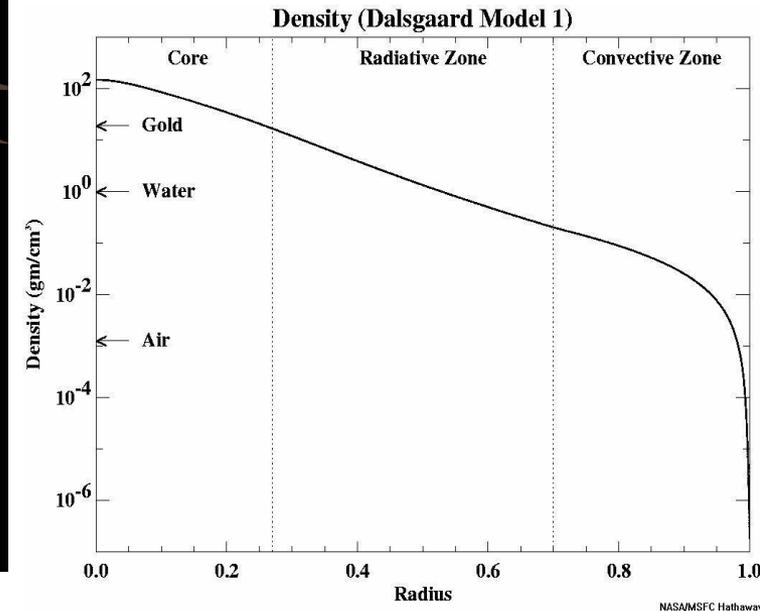
Krauss & Chaboyer (2003)

→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe

# Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



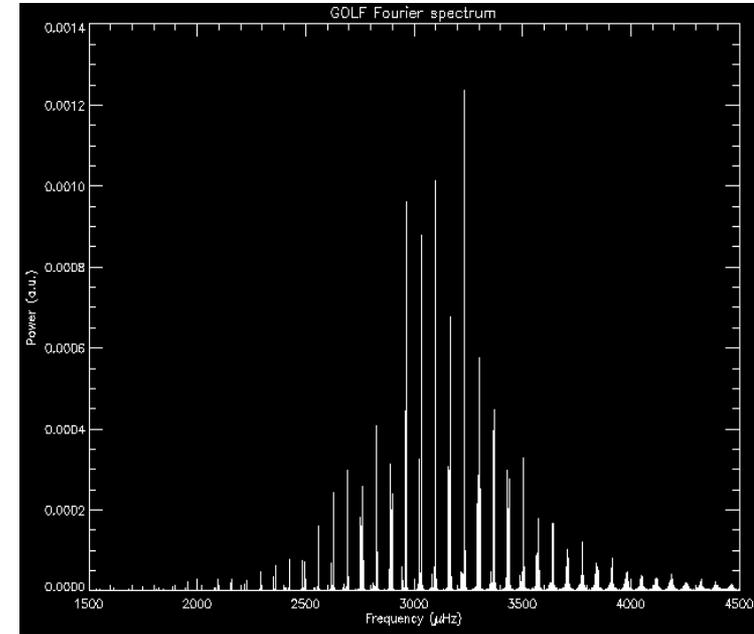
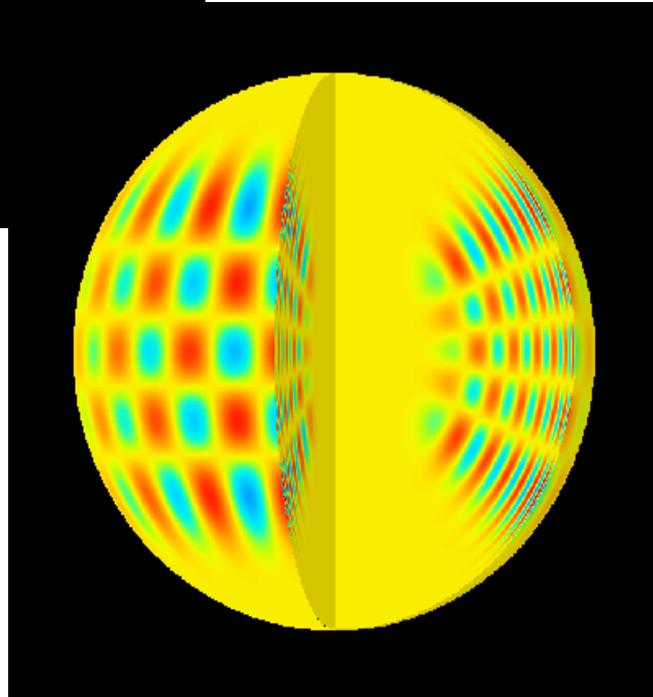
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre  
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone  
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern  
Neutrinos



# Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



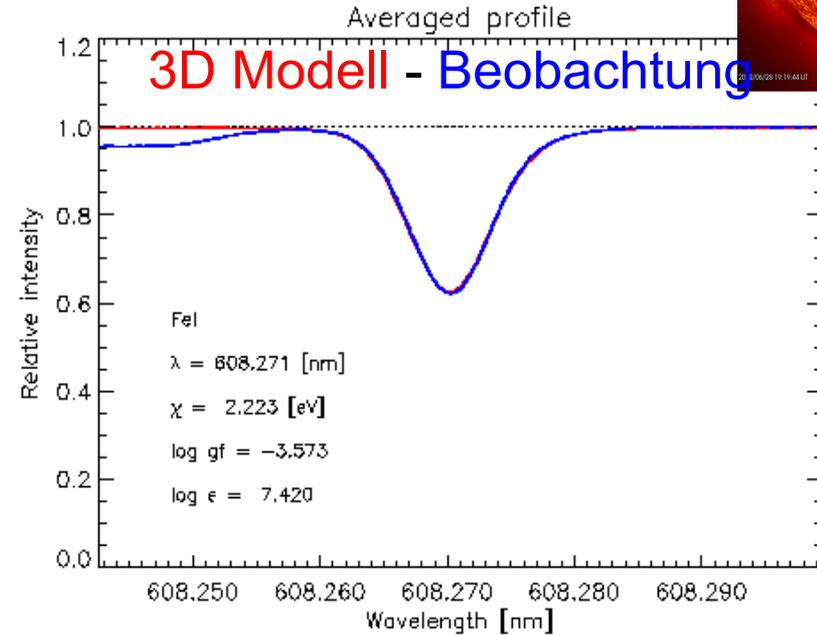
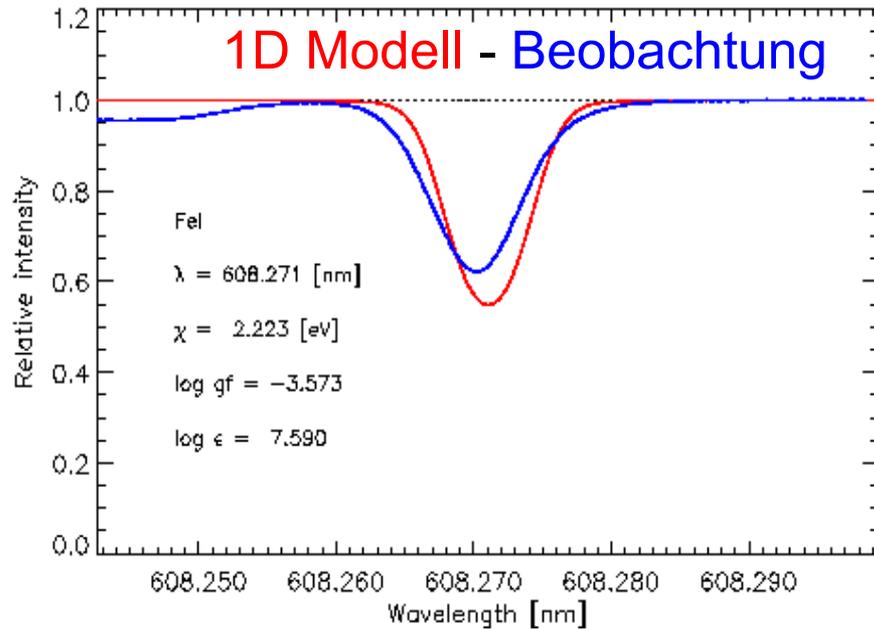
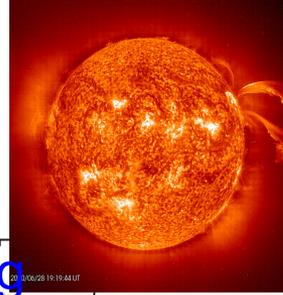
Satellit "SoHo"  
(Solar and  
Heliospheric  
Observatory)



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



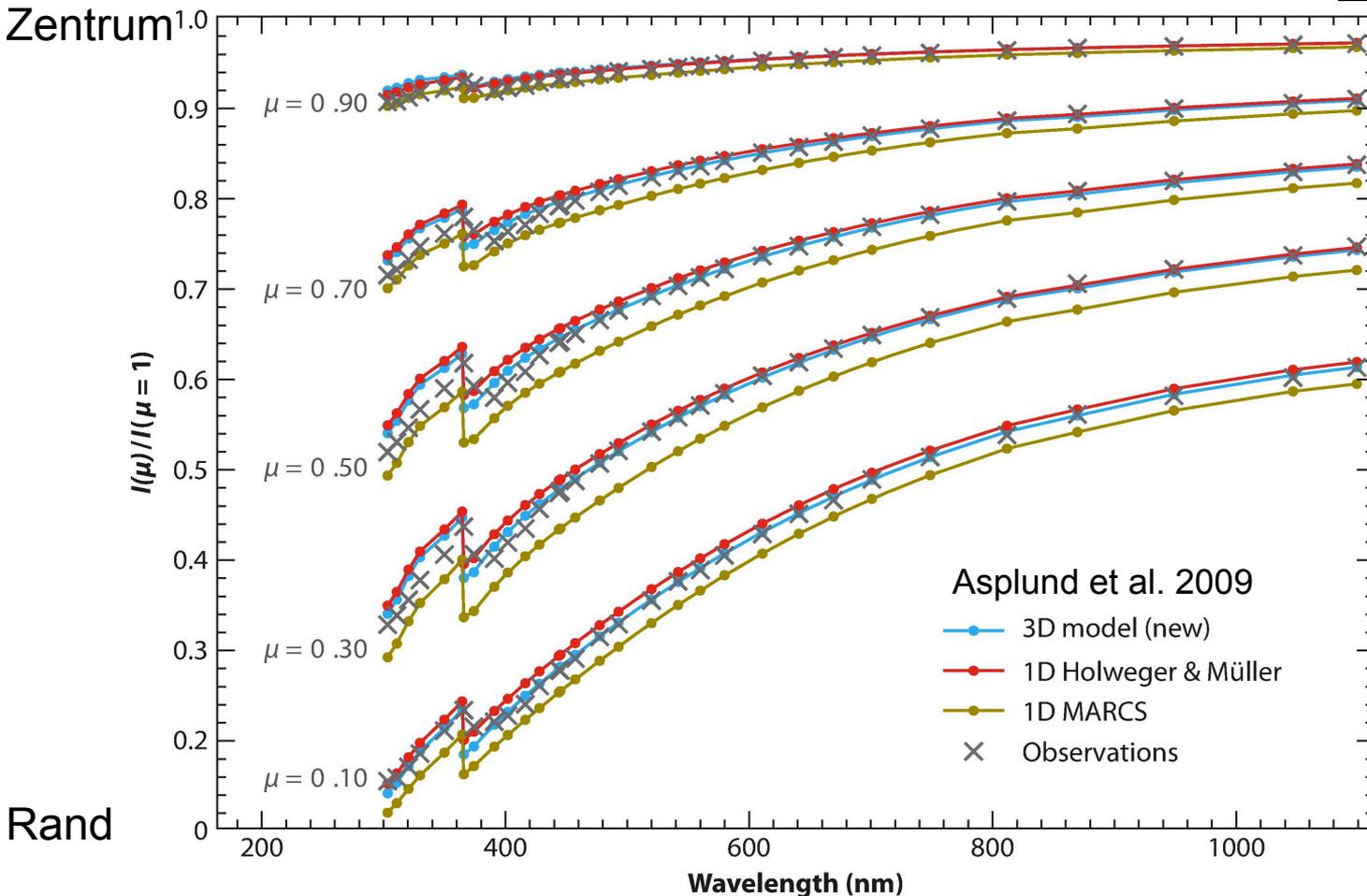
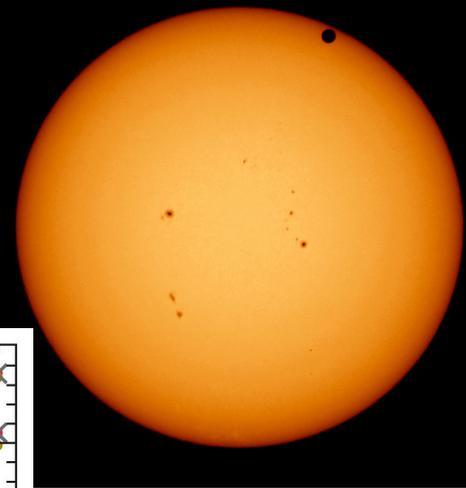
M. Asplund



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

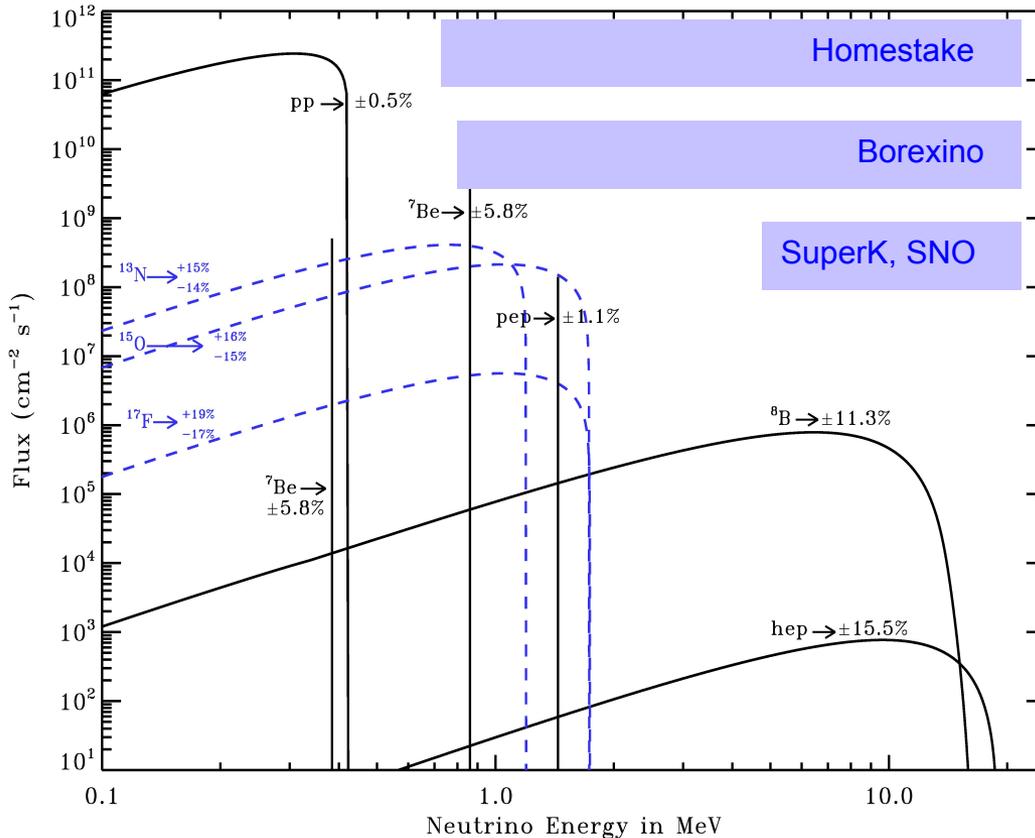
- 1D:** 2.29% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)
- 3D:** 1.78% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)

# 3D versus 1D Modellatmosphären: Intensitätsänderung Zentrum - Rand



# Neutrino-Vorhersagen des Standard-Sonnenmodells

Bahcall'sches Sonnenmodell, A. Serenelli et al. 2011: Zwei Versionen des Standard-Sonnenmodells



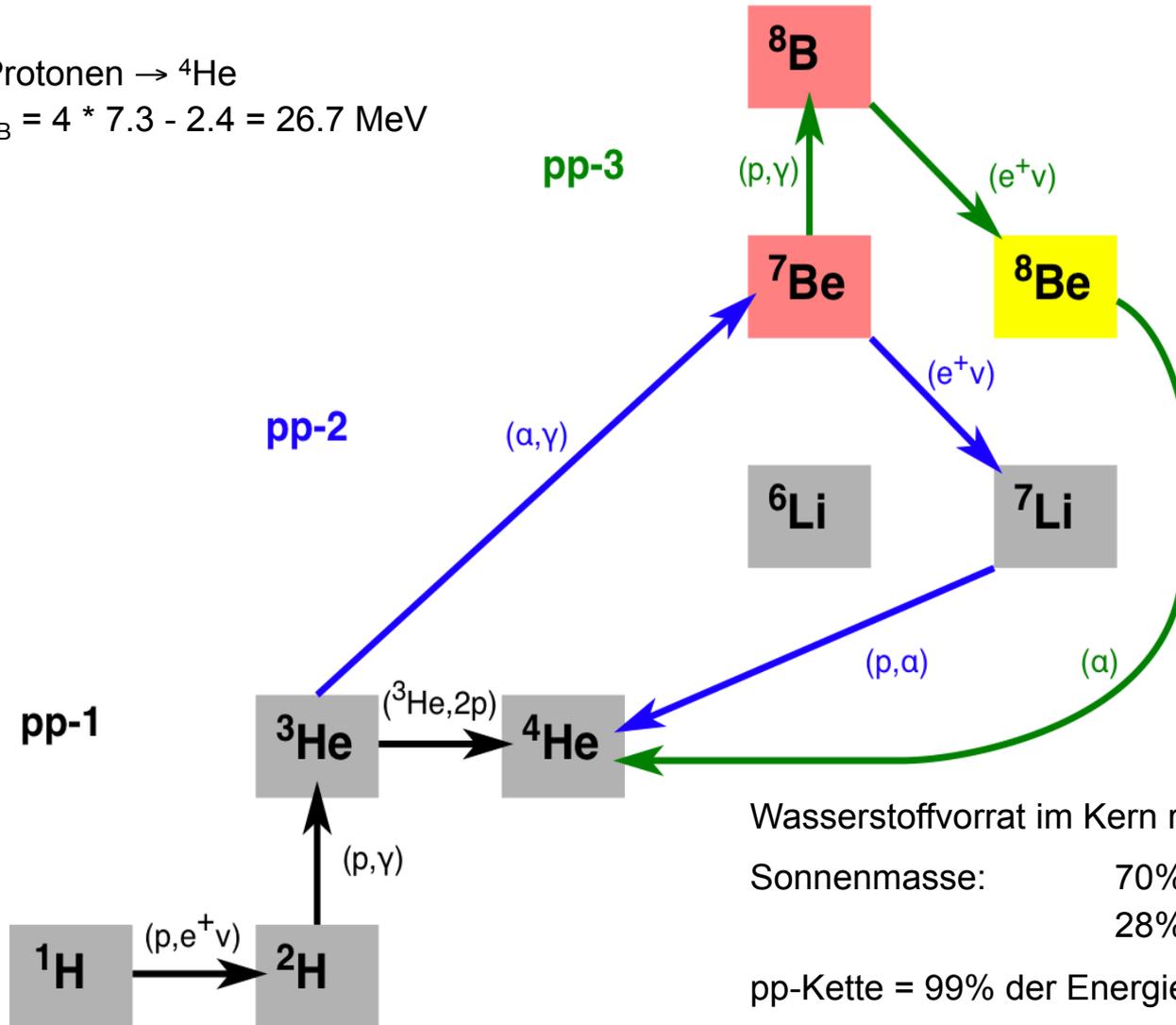
- **GS 1998**  
Alte (<2005) Elementhäufigkeiten  
Konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 5.58$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 2.23$
- **AGS 2009**  
Neue (>2005) Elementhäufigkeiten  
Nicht konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.59$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 1.56$

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

# Kernphysik für die Sonne (1): Proton-Proton-Kette (pp-Kette)

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

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



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

Sonnenmasse:

70% Wasserstoff

28% Helium (davon 25% primordial)

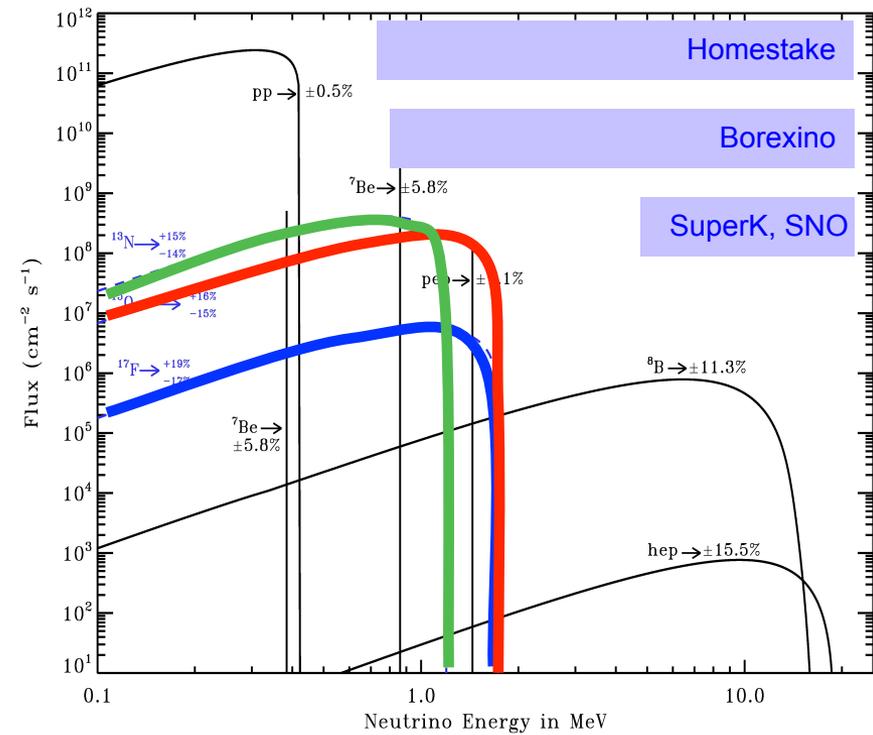
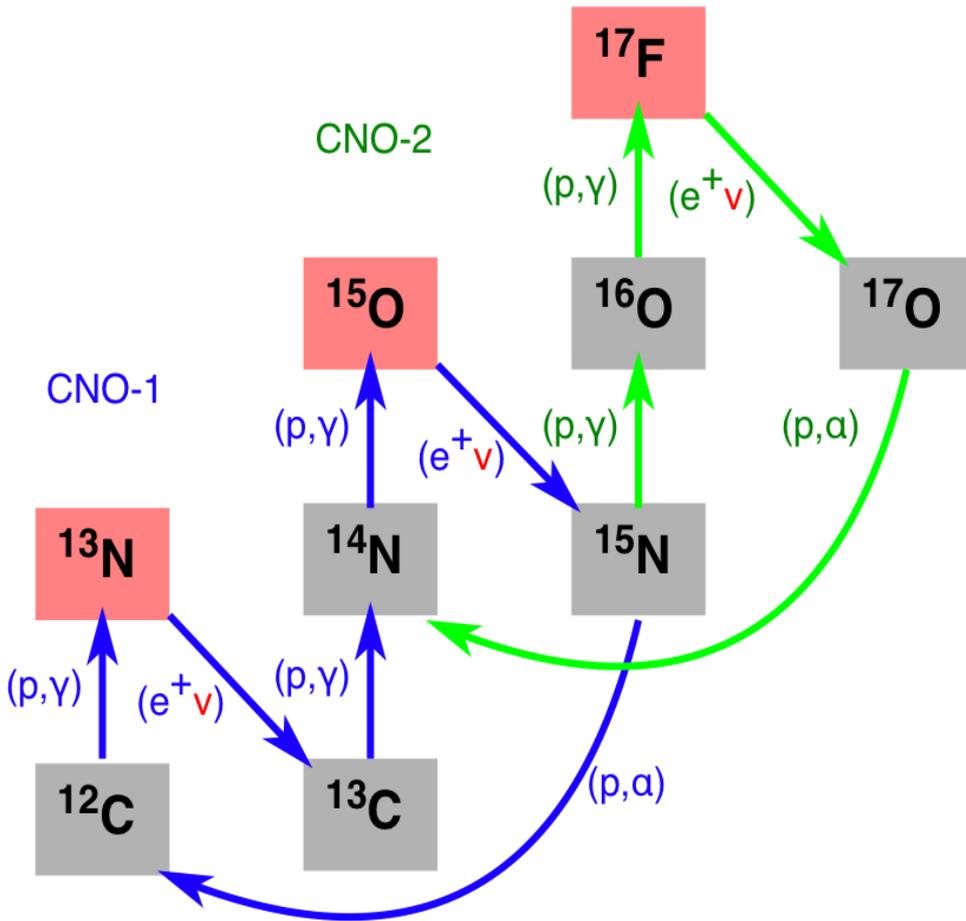
pp-Kette = 99% der Energieproduktion der Sonne

# Neutrinos aus dem CNO-Zyklus

$^{13}\text{N}$ ,  $Q(\beta^+) = 2.220 \text{ MeV}$

$^{15}\text{O}$ ,  $Q(\beta^+) = 2.754 \text{ MeV}$

$^{17}\text{F}$ ,  $Q(\beta^+) = 2.761 \text{ MeV}$



$$\frac{\partial \ln \Phi_{\text{O-15}}}{\partial \ln \sigma[^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}]} = 1$$

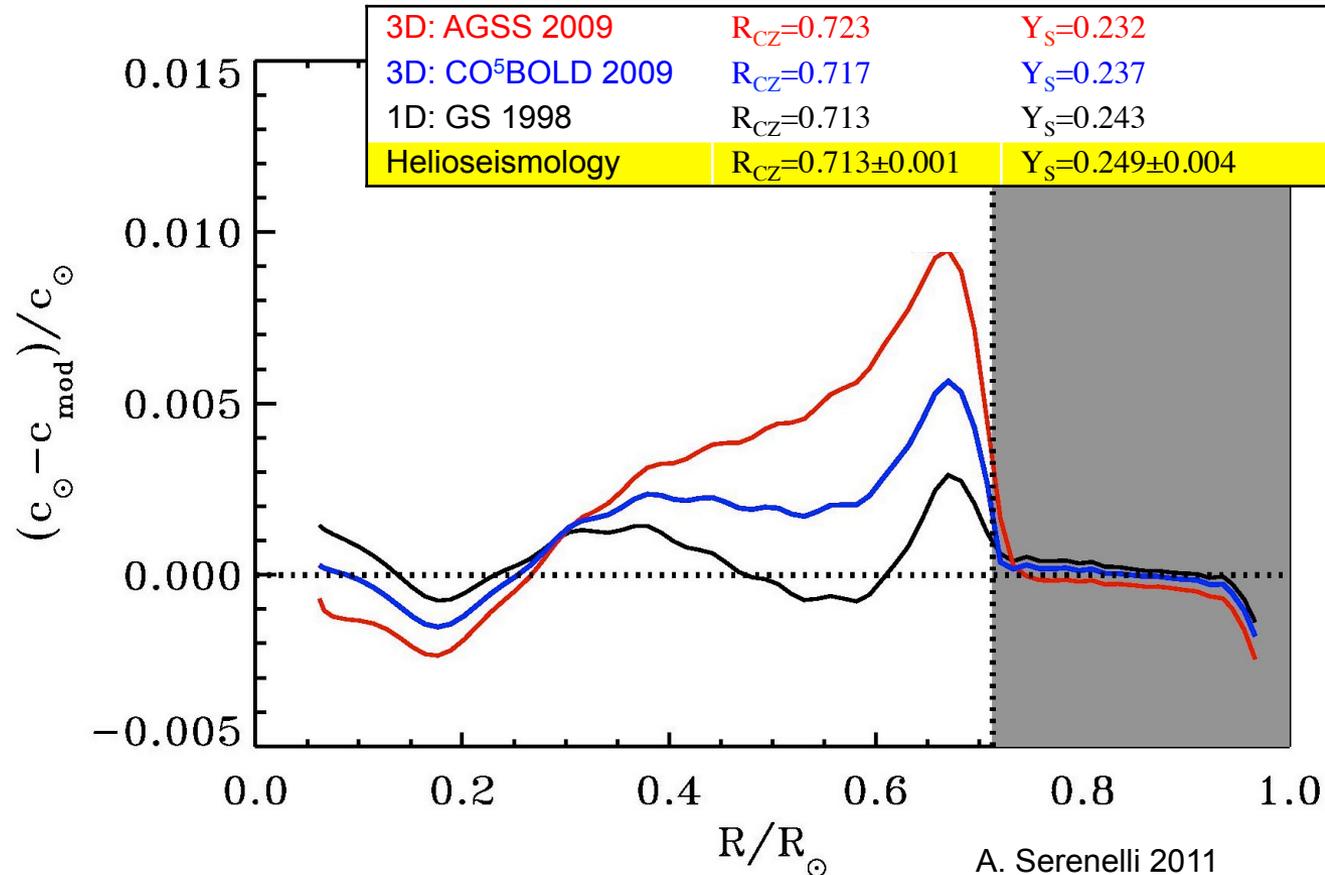
# Problem:

## Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

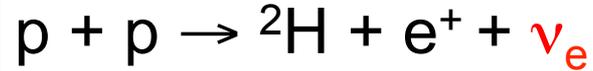
Standard-Sonnenmodell, gerechnet mit verschiedenen Elementhäufigkeiten.

Observable, die helioseismologisch überprüft werden können:

- $c_{\text{mod}}$   
Schallgeschwindigkeit
- $R_{\text{CZ}}$   
Tiefe der Konvektionszone
- $Y_{\text{S}}$   
Helium-Häufigkeit in der Photosphäre



# Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (1)



Homestake-Goldbergwerk (South Dakota / USA)

1500 m unter Tage

615 t Perchloroethylen ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ) 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<sup>-</sup> s)



Sonnenmodell:  $8.5 \text{ SNU}$

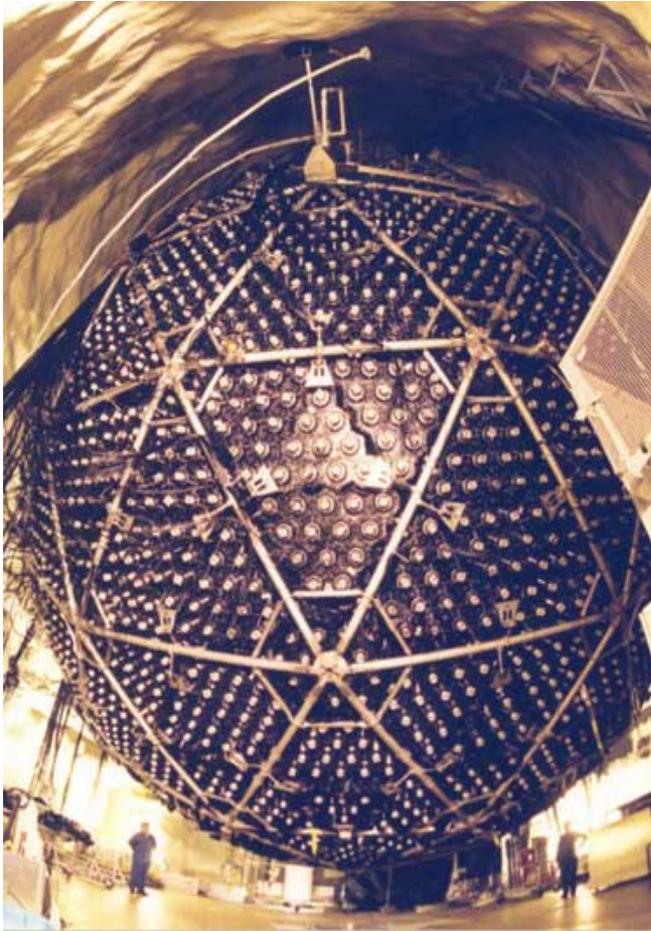
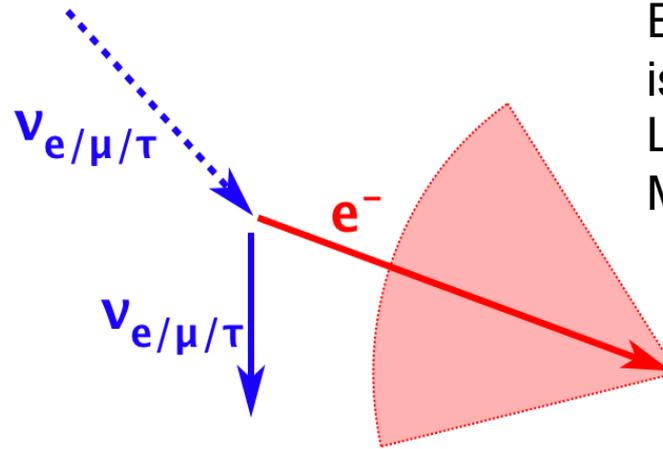
“Solares Neutrinoproblem”, 1972-2002

# 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)

ES:  $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

NC:  $\nu_x + {}^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{n} + \nu_x$

CC:  $\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{p} + e^-$

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

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

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

Umformung

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

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

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

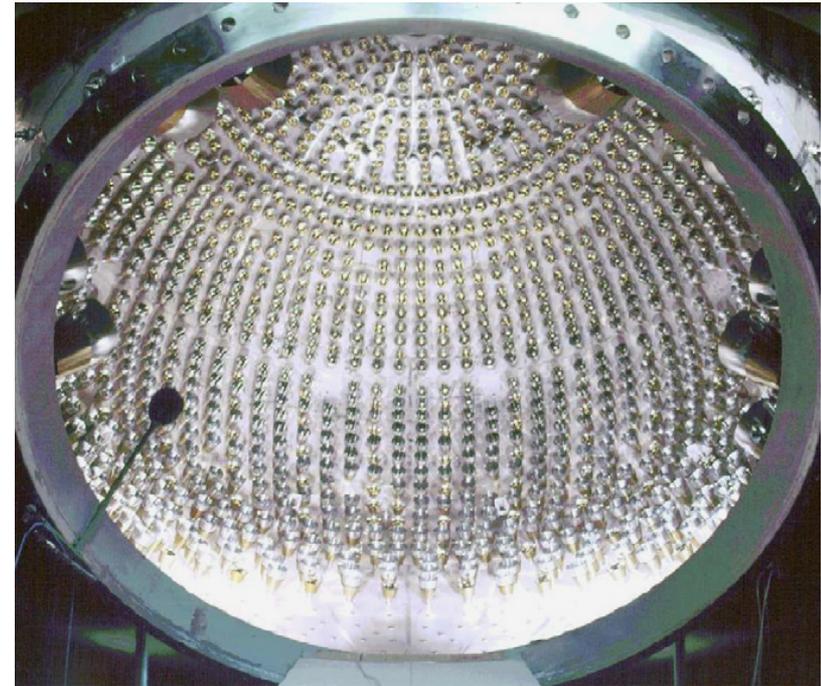
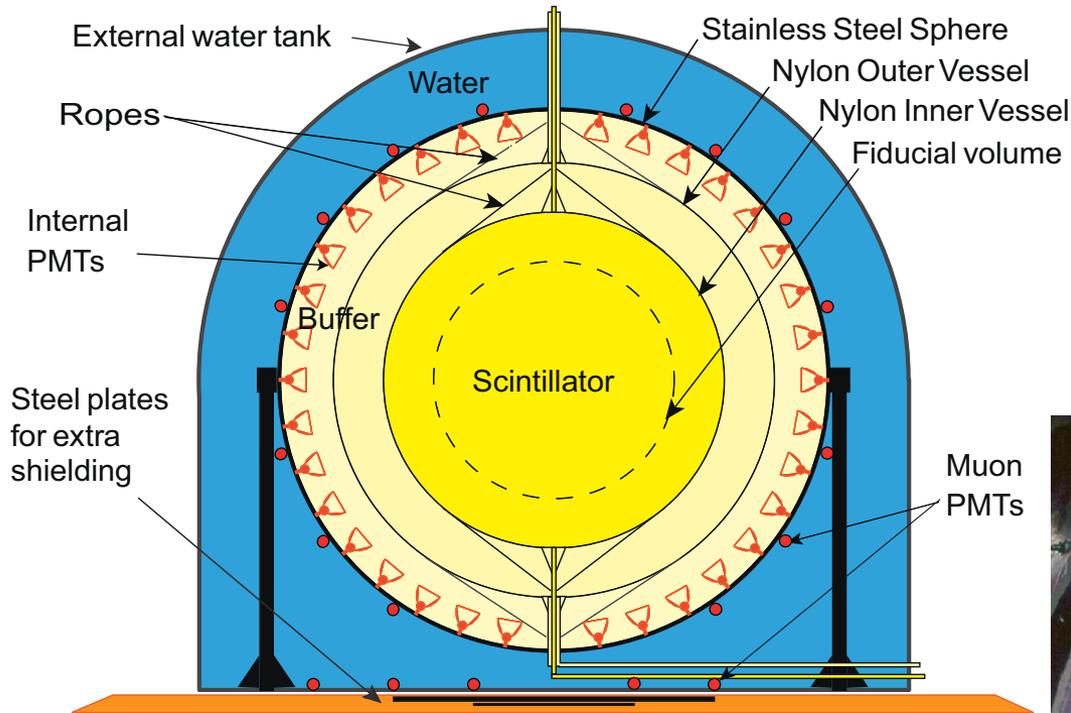
(Experiment, SNO)

Sonnenmodell: 4.72...5.94

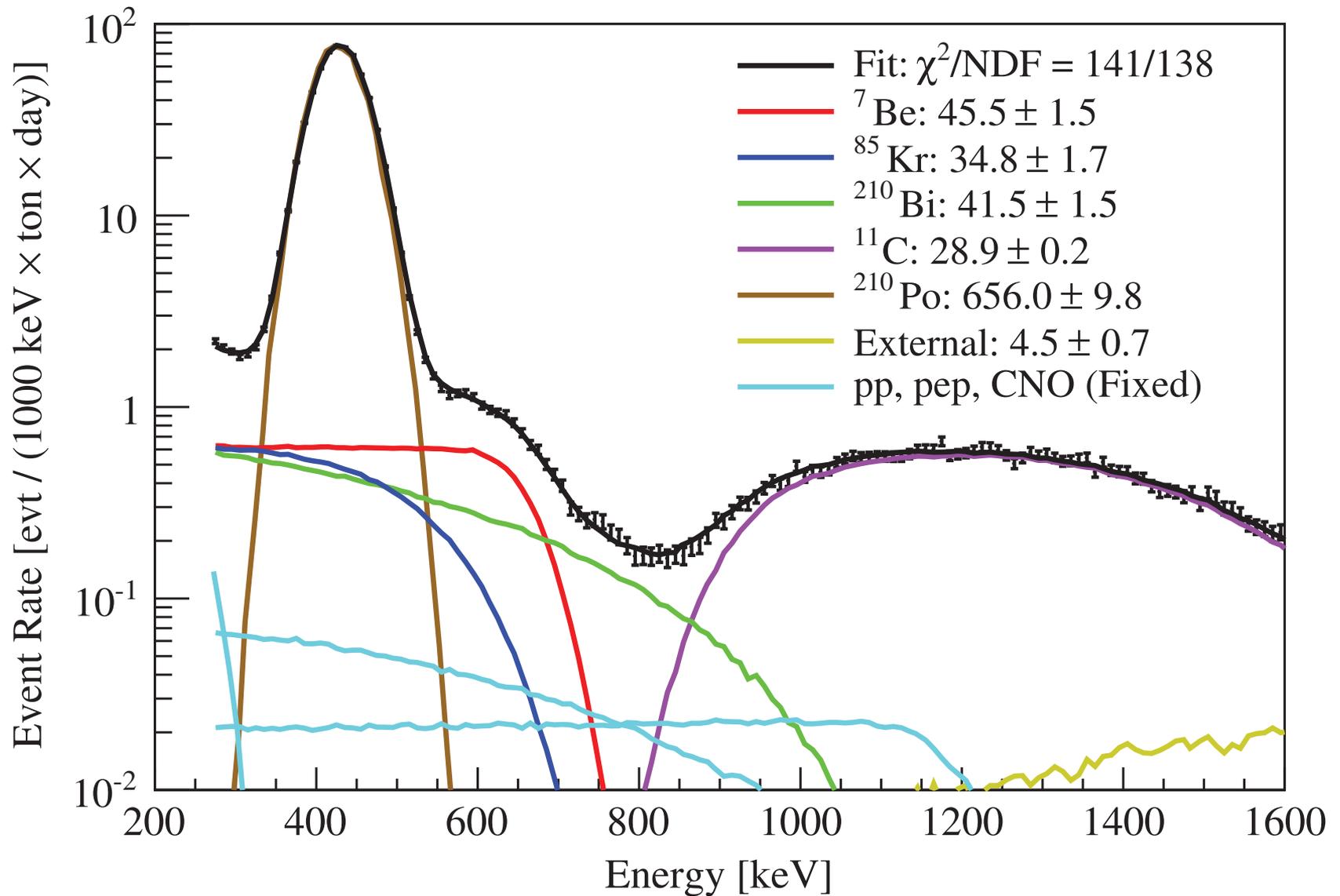
Neutrino-Flüsse in  $10^6/(\text{cm}^2 \text{ s})$

# Sonnenneutrinos: Beobachtungen mit dem Borexino-Detektor

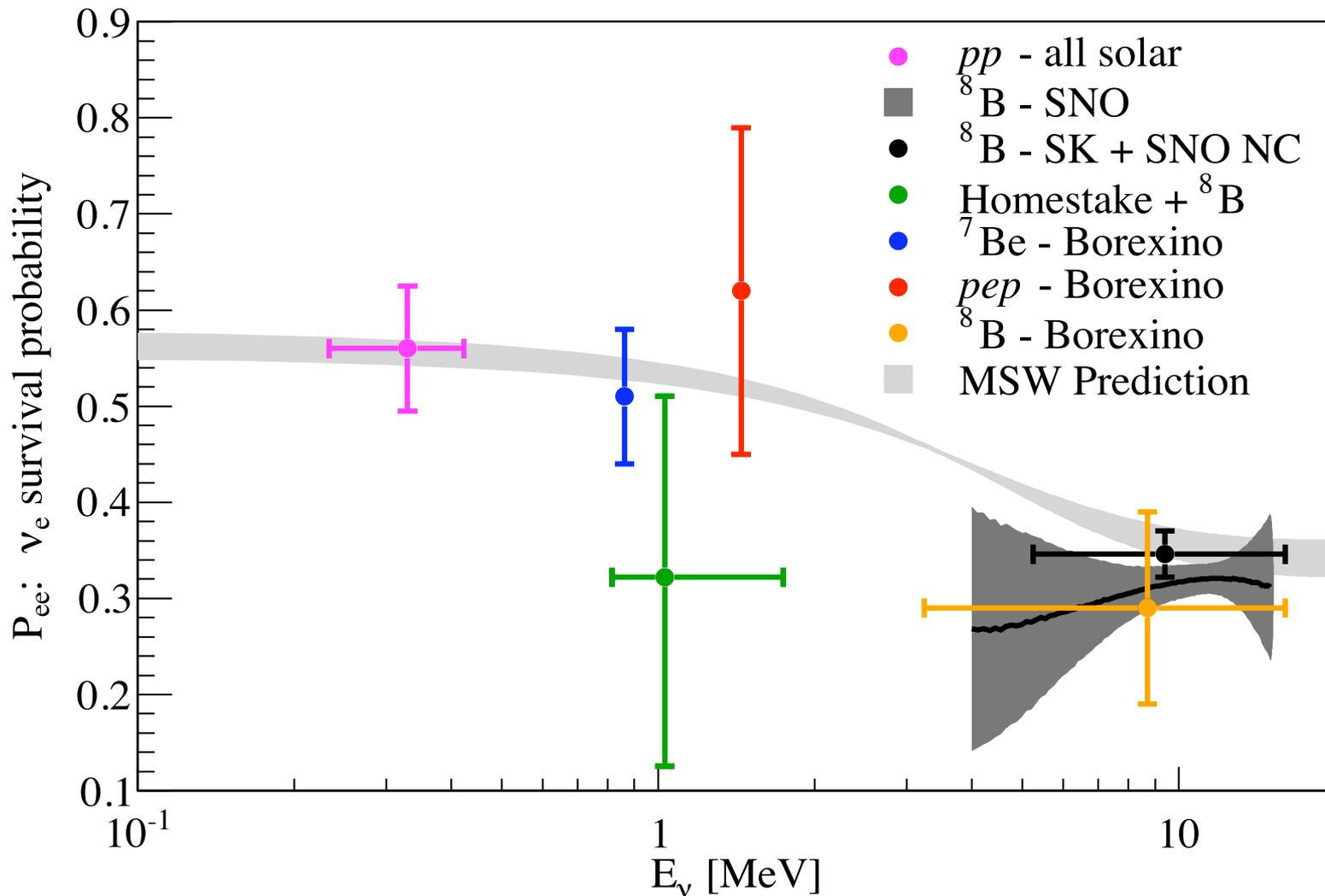
## Borexino Detector

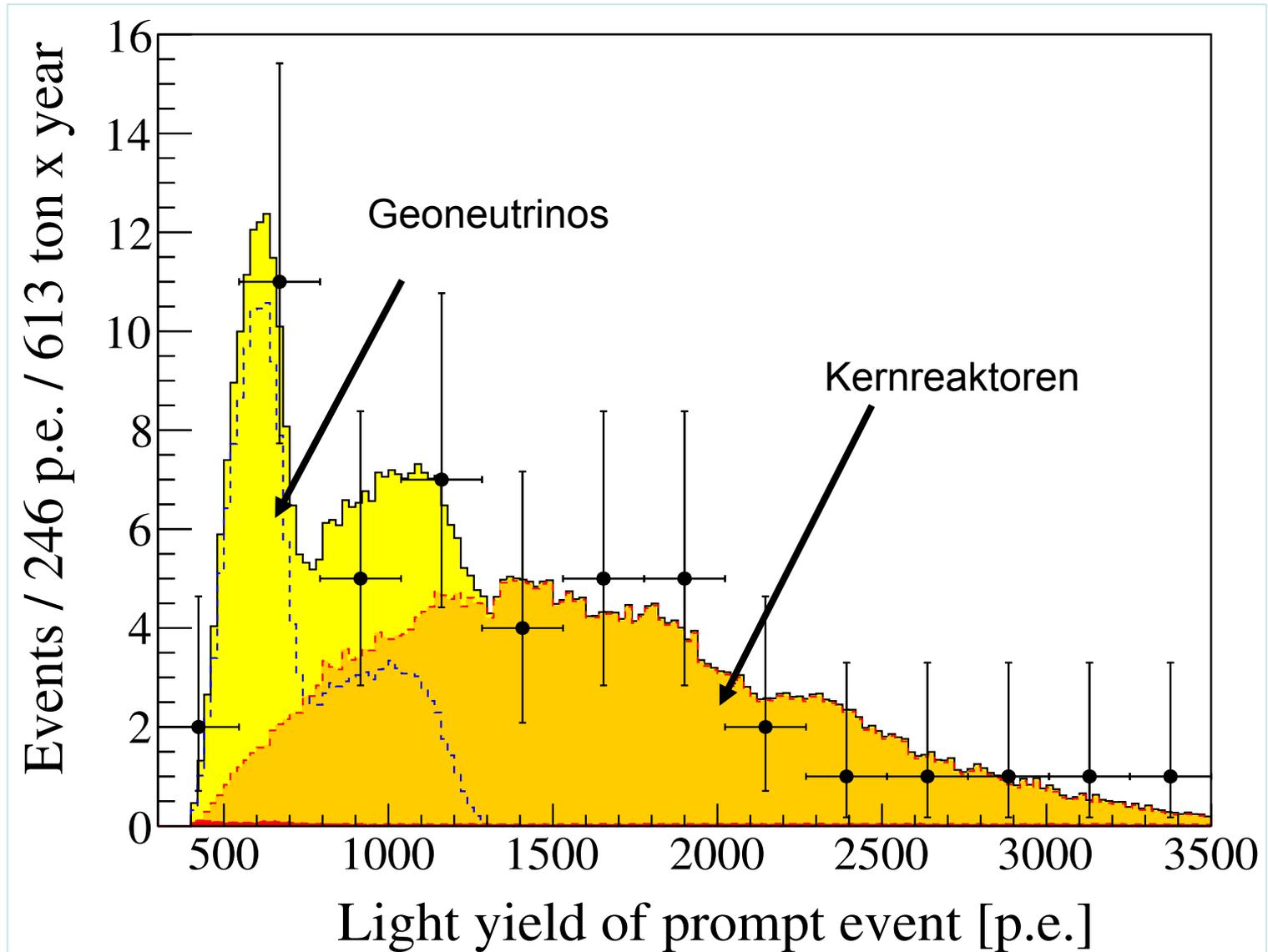


- ◆ Flüssigszintillator Pseudokumol
- ◆ Prompter Nachweis von  $e^-$  aus elastischer Neutrinostreuung

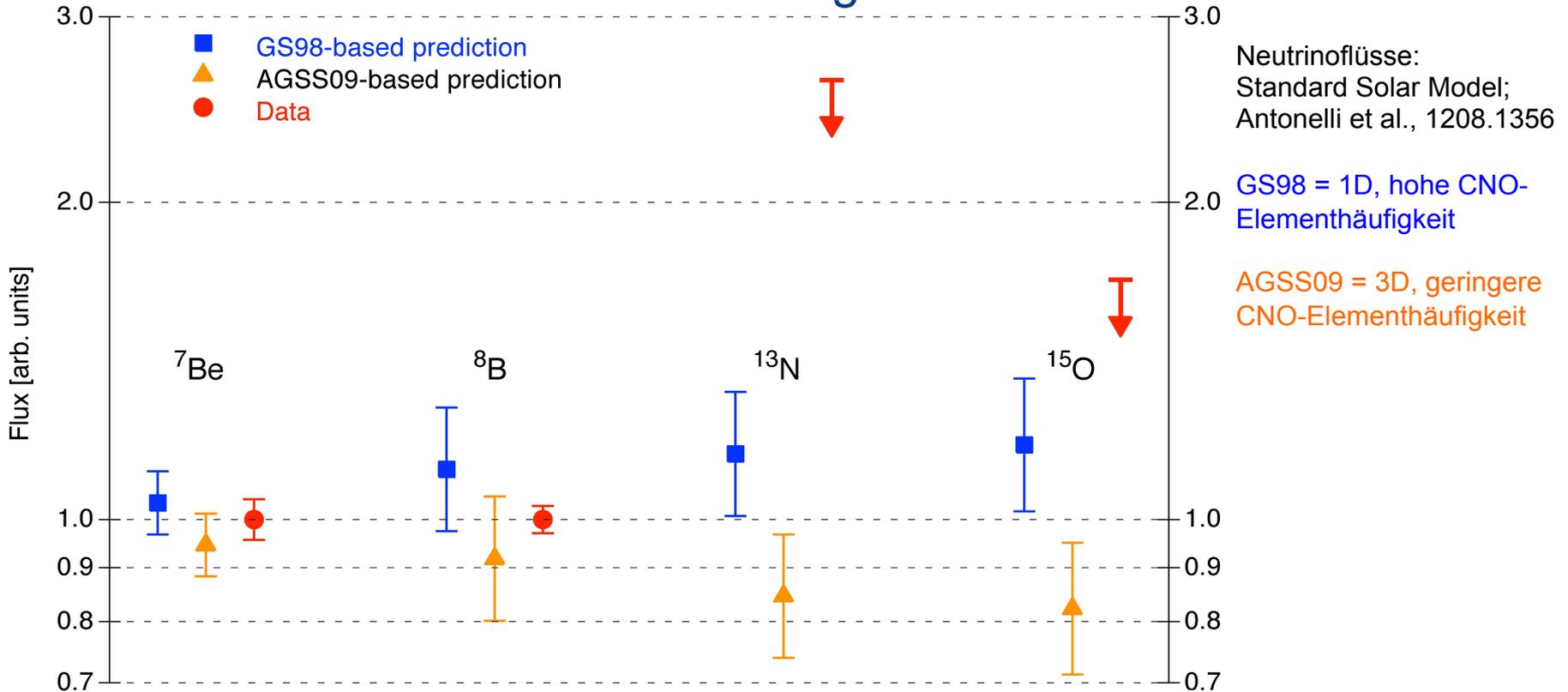


# Neutrino-Oszillationen

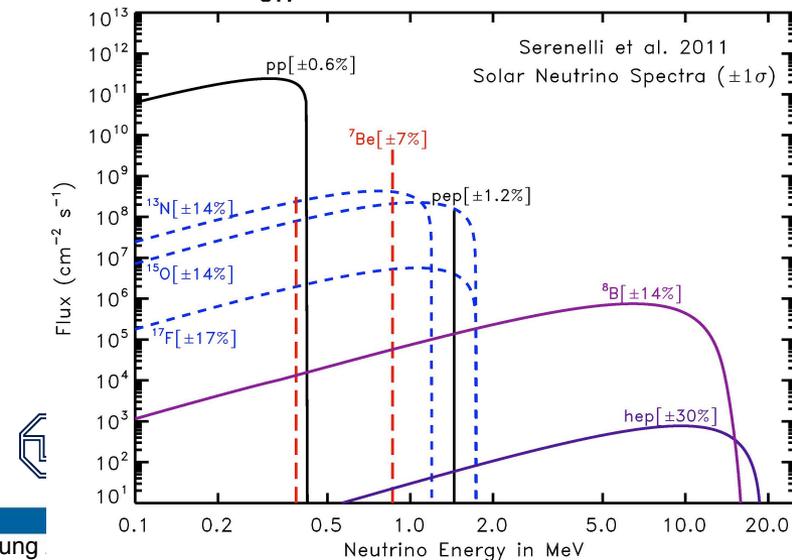




# Sonnenneutrino-Flüsse: Vorhersagen und Messdaten



- ◆  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ : Messdaten genauer als die Vorhersagen
- ◆  ${}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{15}\text{O}$ : Noch keine Messung



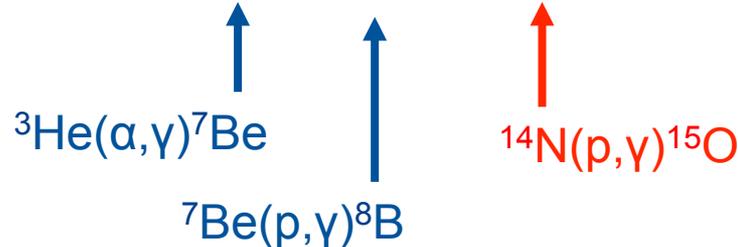
# Woher kommen die großen Fehlerbalken in der Vorhersage?

Nuclear reaction rates

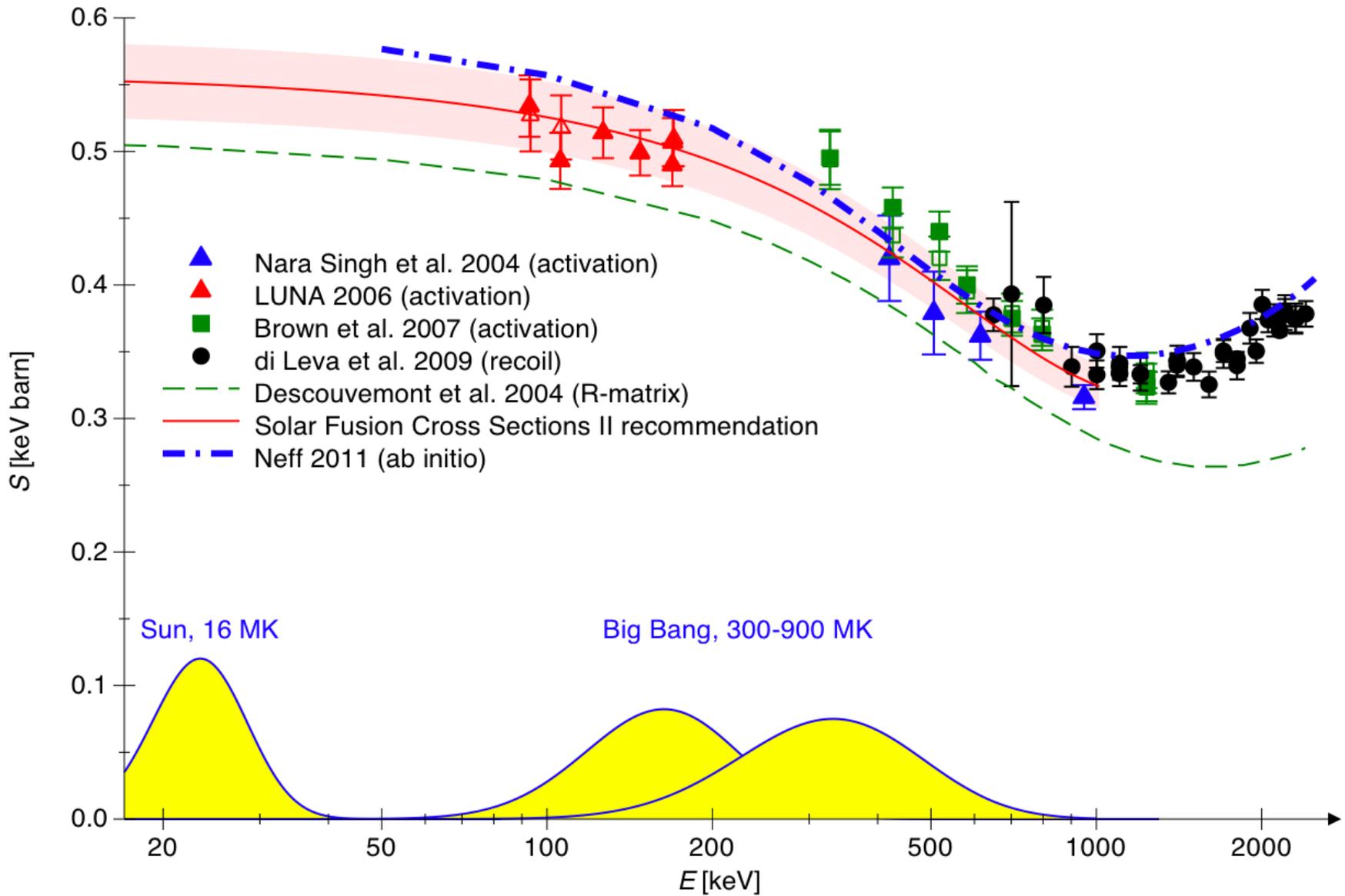
	$S_{11}$	$S_{33}$	$S_{34}$	$S_{17}$	$S_{1,14}$	Opac	Diff
pp	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.2	0.2
pep	0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.2
hep	0.1	2.3	0.4	0.0	0.0	1.0	0.5
${}^7\text{Be}$	1.1	2.2	4.7	0.0	0.0	3.2	1.9
${}^8\text{B}$	2.7	2.1	4.5	7.7	0.0	6.9	4.0
${}^{13}\text{N}$	2.1	0.1	0.3	0.0	5.1	3.6	4.9
${}^{15}\text{O}$	2.9	0.1	0.2	0.0	7.2	5.2	5.7
${}^{17}\text{F}$	3.1	0.1	0.2	0.0	0.0	5.8	6.0

Unsicherheit im vorhergesagten Neutrinofluss, in Prozent

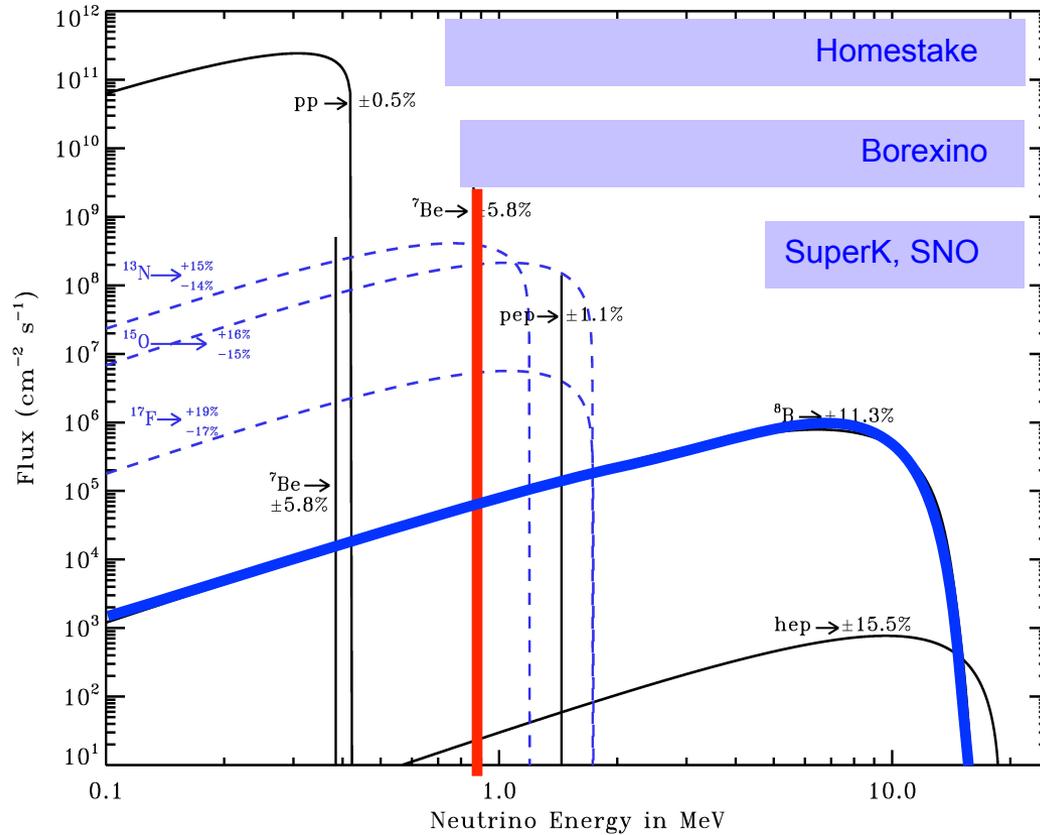
Antonelli et al., 1208.1356



# ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ an LUNA, Ergebnisse für den astrophysikalischen S-Faktor



# Auswirkung : Präzisere Vorhersagen für ${}^7\text{Be}$ - und ${}^8\text{B}$ -Neutrinofluss



Kernphysikalischer Input für  ${}^8\text{B}$ -Neutrinofluss  $\Phi_B$ :

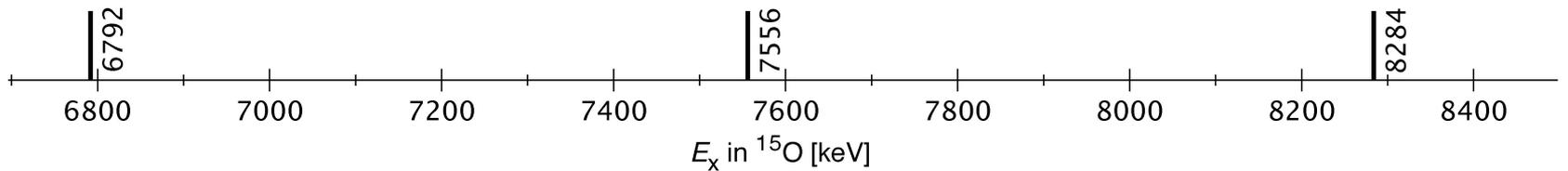
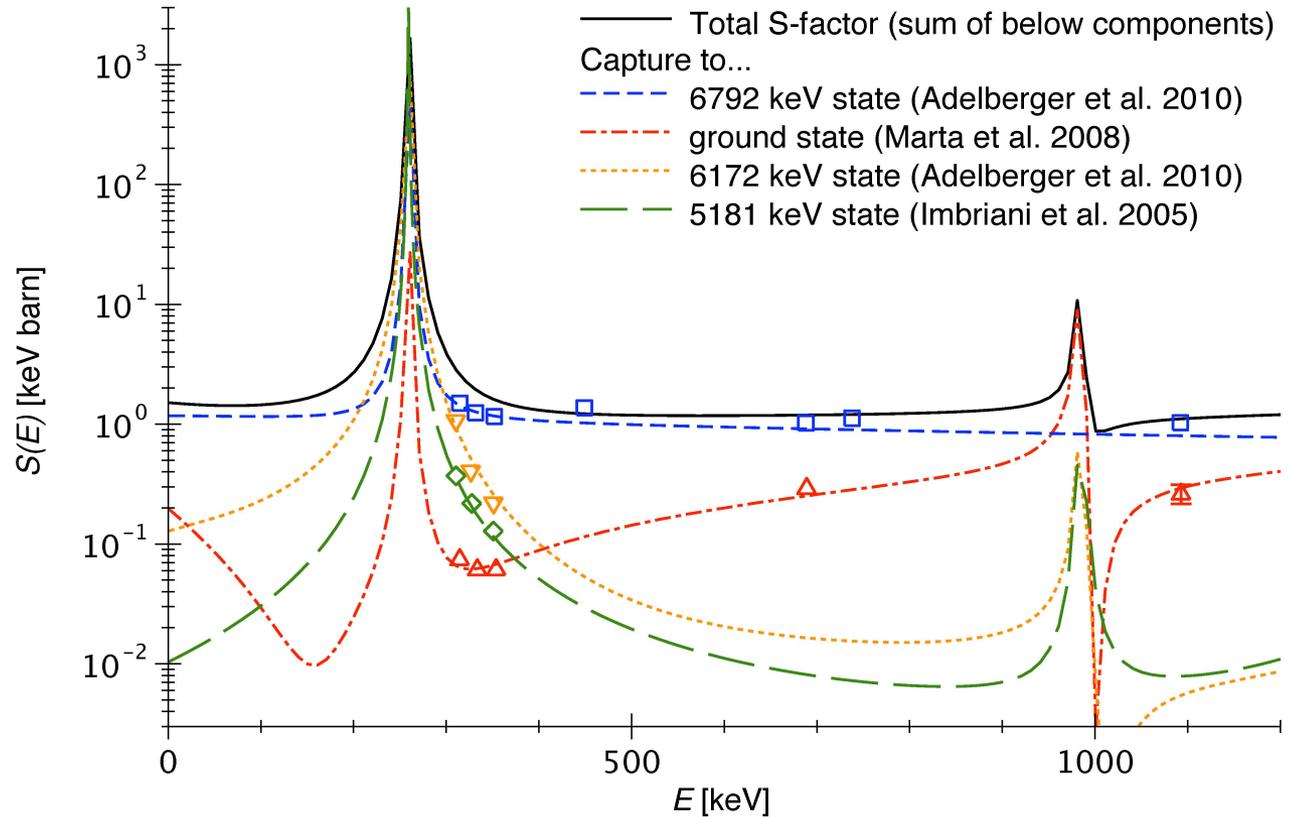
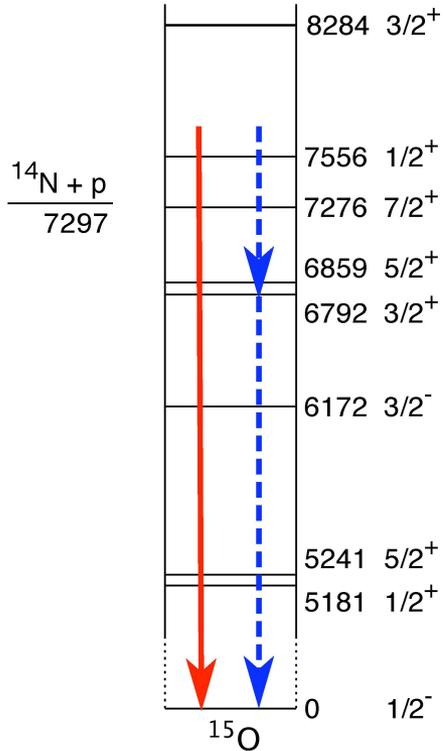
Reaktion	$\frac{\partial \ln \Phi_B}{\partial \ln \sigma}$	$\Delta \Phi_B / \Phi_B$
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$	-0.43	1.8%
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$	0.86	<del>7.5%</del> 4.2%
${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$	1.00	7.5%

Messungen des Flusses von  ${}^8\text{B}$ - und  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos:

Super-Kamiokande, SNO: 3.0% (syst.+stat.) Präzision für  $\Phi_B$

Borexino: 4.6% (syst.+stat.) Präzision für  $\Phi_{B_e}$  nach 3 Jahren Datennahme

# Ausblick zu $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$



- Neue direkte Daten zwischen 0.3 und 2 MeV
- Indirekte Daten zu unterschwelliger Resonanz

# Dresden, ehemalige Felsenkeller-Brauerei (Plauenscher Grund)

- ◆ Niederniveau-Messlabor besteht seit 1982
- ◆ Platz in weiteren Stollen vorhanden



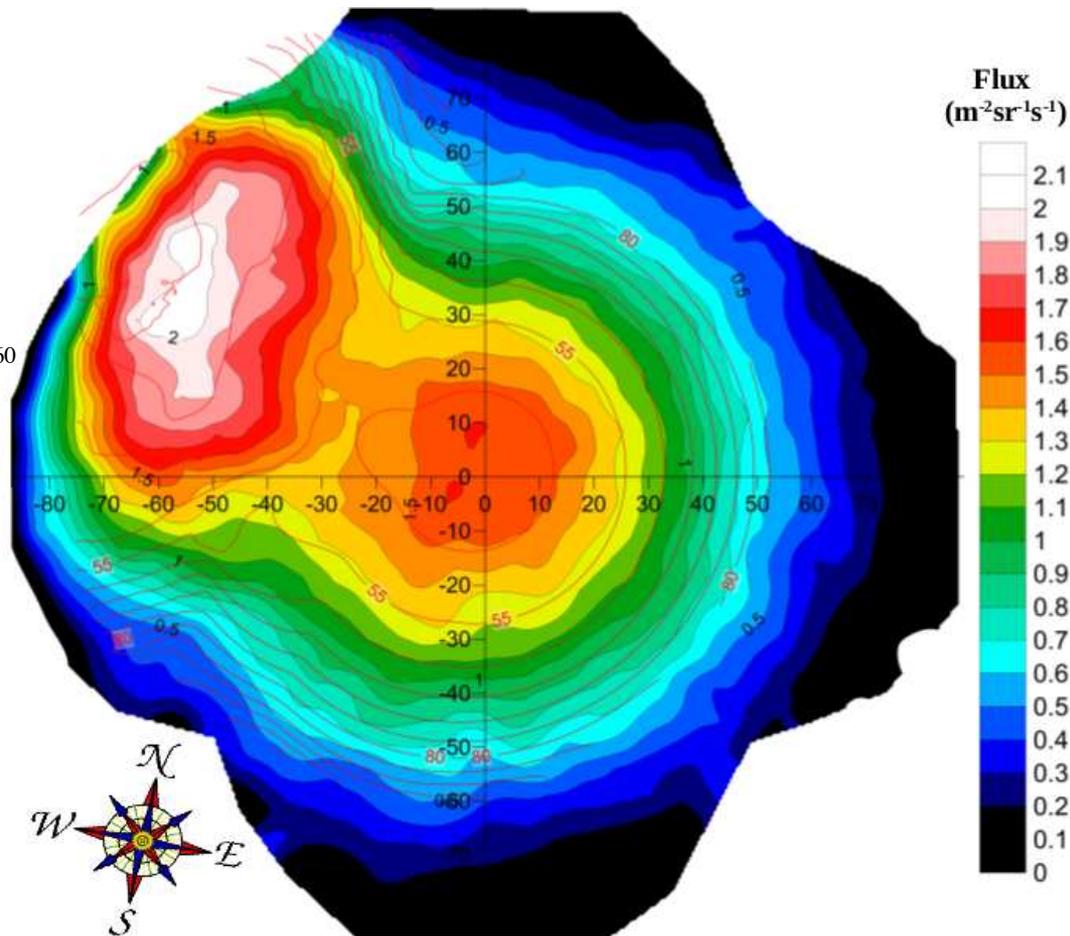
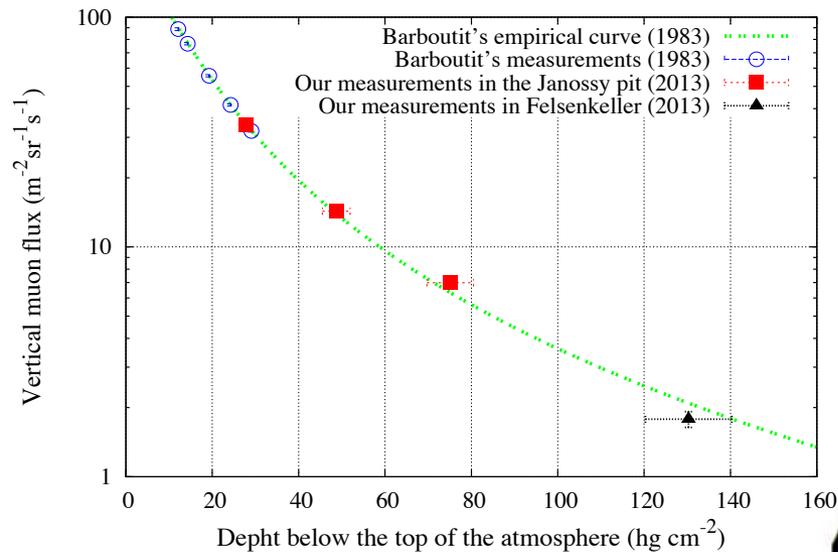
- ◆ 12 Jahre alter 5 MV Beschleuniger
- ◆ Aus Konkursmasse gekauft (York)
- ◆ 250  $\mu\text{A}$  Ladestrom (2 Pelletketten)
- ◆ Cäsium-Sputterionenquelle: 100  $\mu\text{A}$   $\text{H}^-$  und  $\text{C}^-$
- ◆ Gut geeignet für nukleare Astrophysik

## HZDR (Daniel Bemmerer et al.), TU Dresden (Kai Zuber et al.)

- ◆ Kernreaktionen in der Sonne
- ◆ Kohlenstoffbrennen in Supernovae Ia
- ◆ Ausbildung von Studierenden
- ◆ Internationale Nutzer mit eigenen Projekten



# Felsenkeller, Messung des Myonenflusses



- ◆ REGARD - Myonentomograph (Uni Budapest)

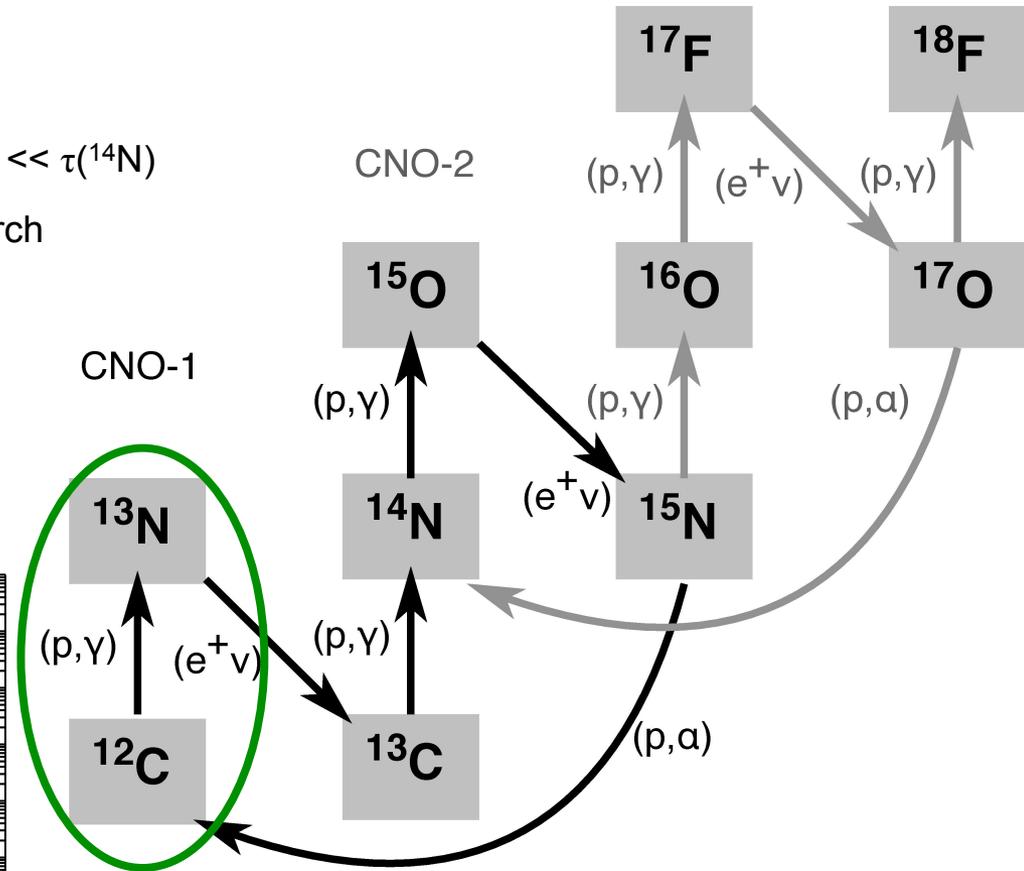
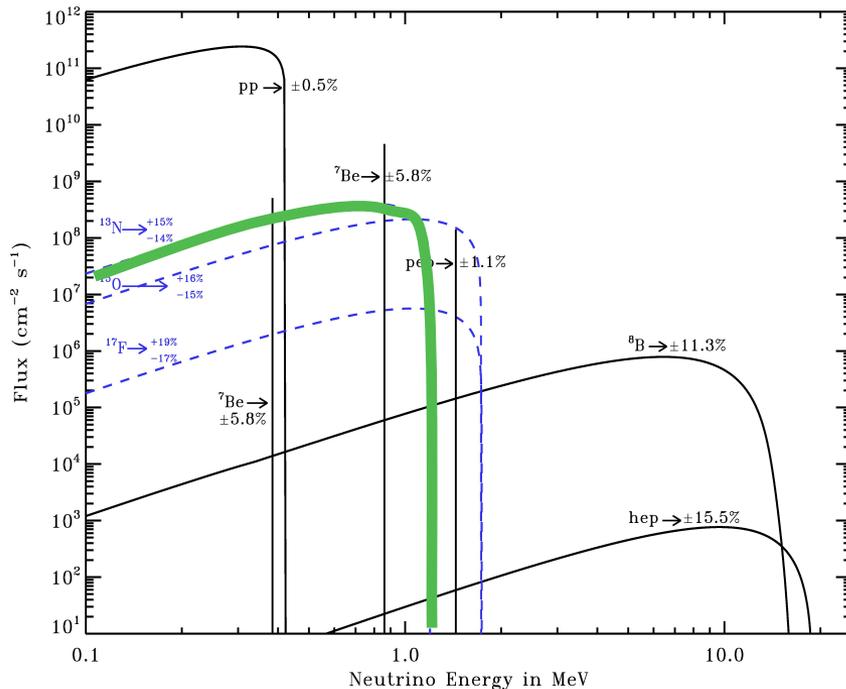
## Ergebnisse:

- ◆ Beschleunigerstollen ist etwas besser abgeschirmt als Stollen des Niederniveaumesslabors (130 statt 110 m.w.e.)
- ◆ Daten zur Winkelverteilung erlauben es, aktives Veto zu planen.

# $^{13}\text{N}$ -Neutrinos und die $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ und $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ Reaktionen

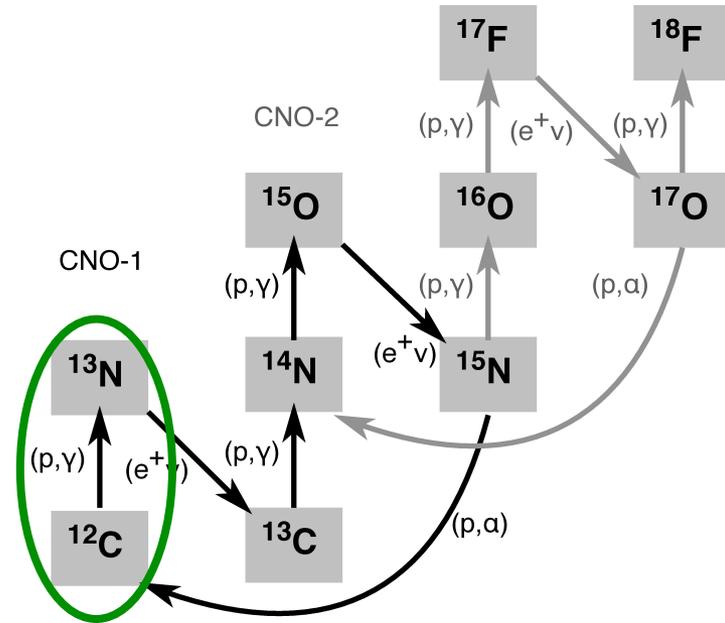
- ◆  $Q(\beta^+, ^{13}\text{N}) = 2.220 \text{ MeV}$
- ◆ Lebensdauer  $\tau(^{12}\text{C})$  im Sonnenkern  $10^6 \text{ a} \ll \tau(^{14}\text{N})$
- ◆  $^{13}\text{N}$  emission im Sonnenkern gegeben durch  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  - Reaktionsrate

$$\frac{\partial \ln \Phi_{\nu(\text{N-13})}}{\partial \ln S[^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}]} = 0.75$$

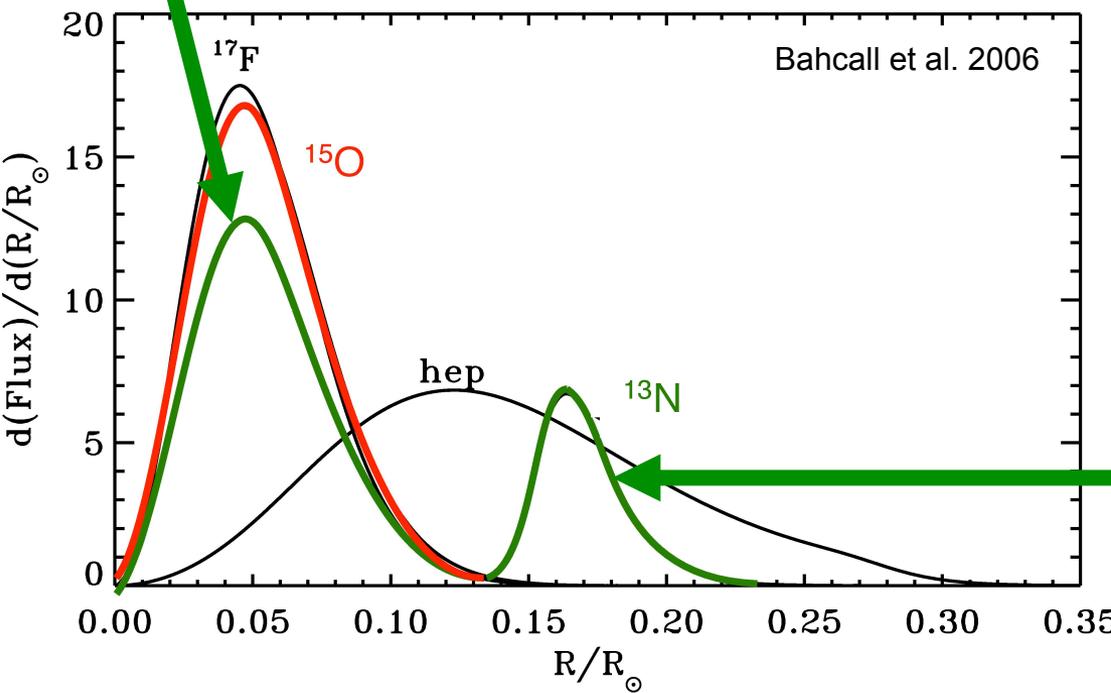


# Zwei Maxima für $^{13}\text{N}$ - Neutrinos

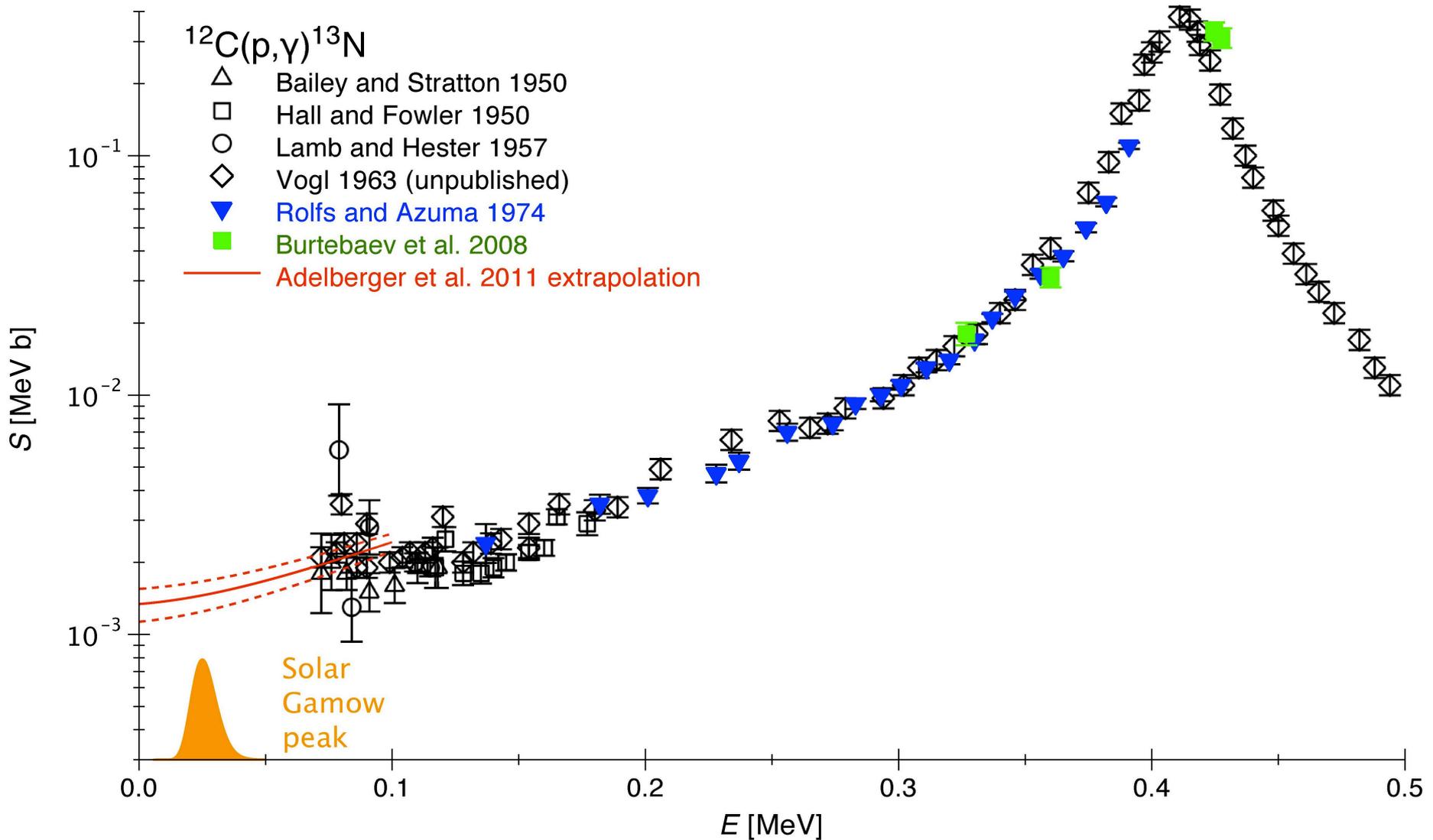
- ◆ Mittelpunkt der Sonne,  $T = 16 \text{ MK}$
- ◆ Lebensdauer  $\tau(^{12}\text{C}) = 7 \cdot 10^5 \text{ a} \ll 2 \cdot 10^8 \text{ a} = \tau(^{14}\text{N})$
- ◆  $^{12}\text{C}$  wird zügig zu  $^{14}\text{N}$  konvertiert, und der Zyklus kommt ins Gleichgewicht



- ◆  $R/R_\odot \sim 0.16$ ,  $T = 12 \text{ MK}$
- ◆  $\tau(^{12}\text{C}) = 2 \cdot 10^8 \text{ a}$
- ◆  $\tau(^{14}\text{N}) = 10^{11} \text{ a} \gg \text{Sonnenalter}$
- ◆ CNO-Zyklus nie im Gleichgewicht
- ◆  $^{13}\text{N}$ -Neutrinoemission bei  $R/R_\odot \sim 0.16$  hängt von  $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ -Rate ab



# Daten zur $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ -Reaktion



# Zusammenfassung

- ◆ Helioseismologische p-Moden an der Sonnenoberfläche werden beobachtet und zur Ableitung des Schallgeschwindigkeits-Profiles und anderer Observabler verwendet.
- ◆ Die Analyse der Fraunhoferschen Absorptionslinien liefert die Elementhäufigkeiten in der Sonnenatmosphäre.
- ◆ Neutrinos aus der Sonne lassen sich auf der Erde nachweisen.
- ◆ Das Sonnen-Neutrino-Problem wurde 2002 durch die Entdeckung von Neutrino-Flavor-Oszillationen gelöst.
- ◆ Neutrinos können jetzt zur präzisen Untersuchung der Sonne genutzt werden.
- ◆ Weitere Voraussetzung dafür sind präzise Daten zu den Kernreaktionen in der Sonne, wie sie auch am zukünftigen Felsenkeller-Beschleuniger in Dresden gewonnen werden können.

