

Kosmologie und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, PD 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)**

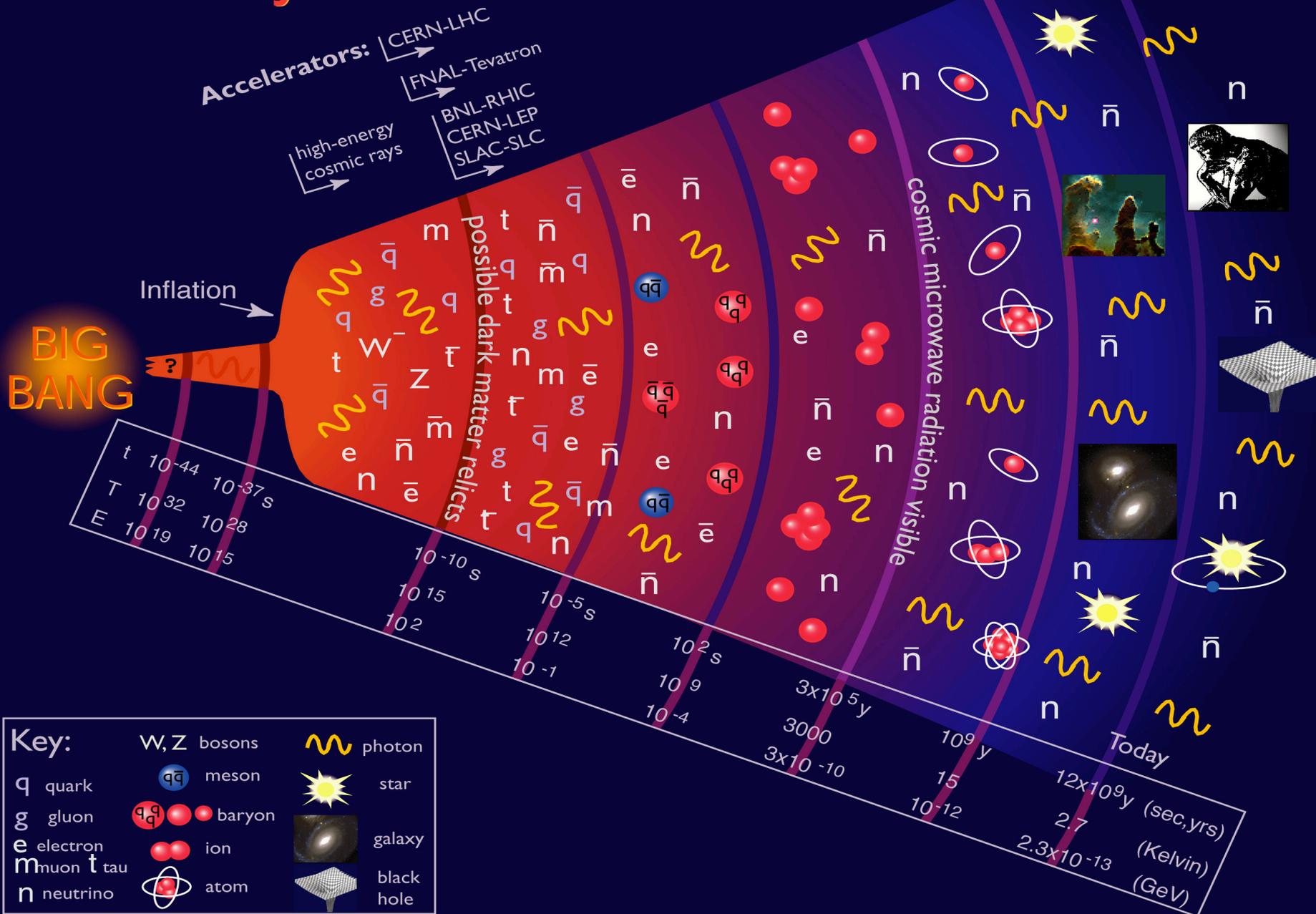
12. Vorlesung, 01.07.2013



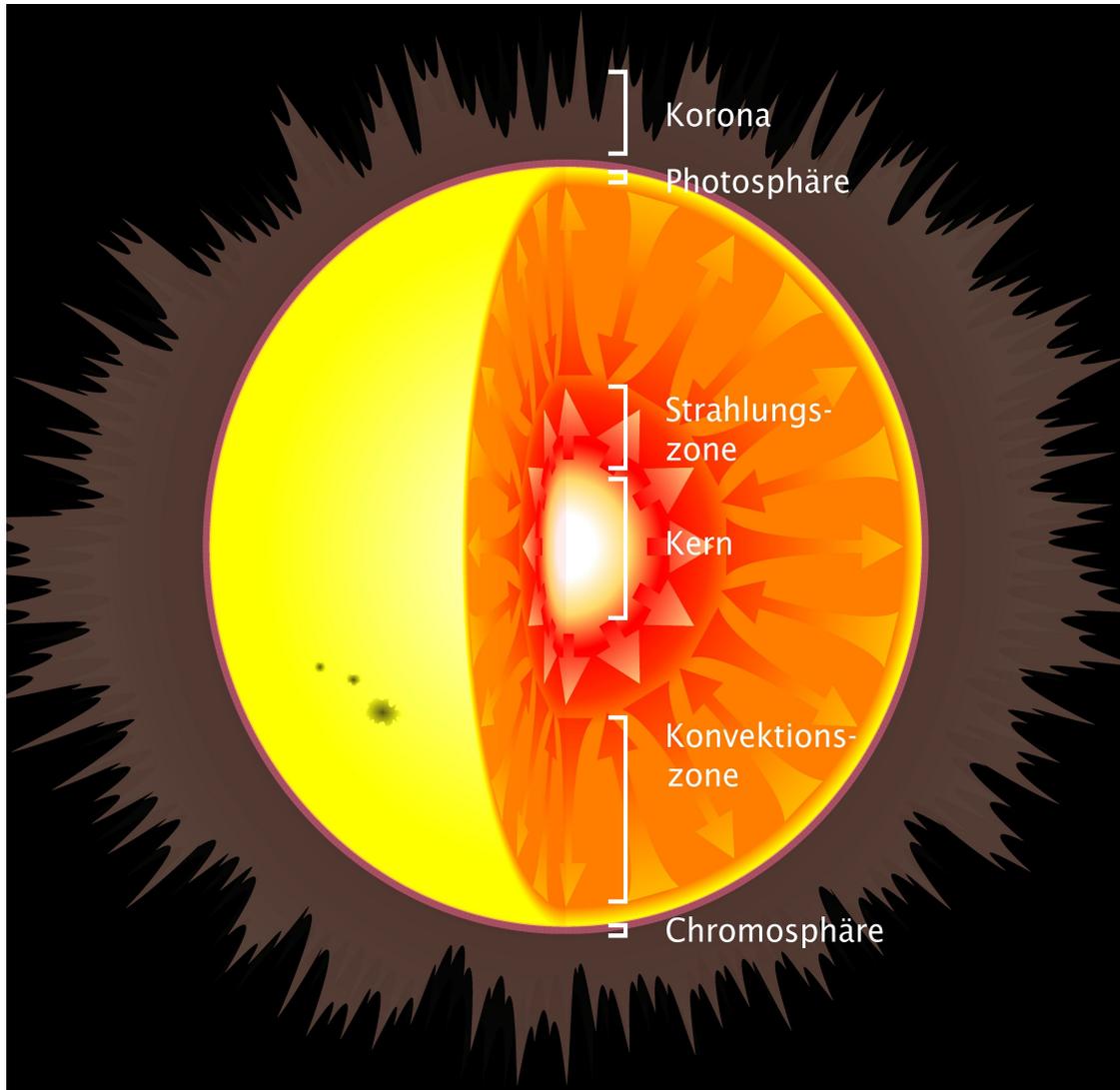
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



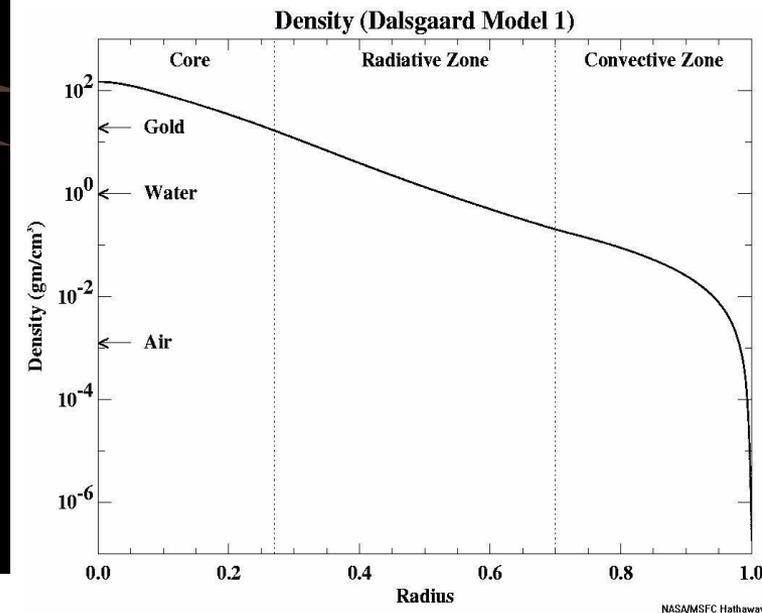
History of the Universe



Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



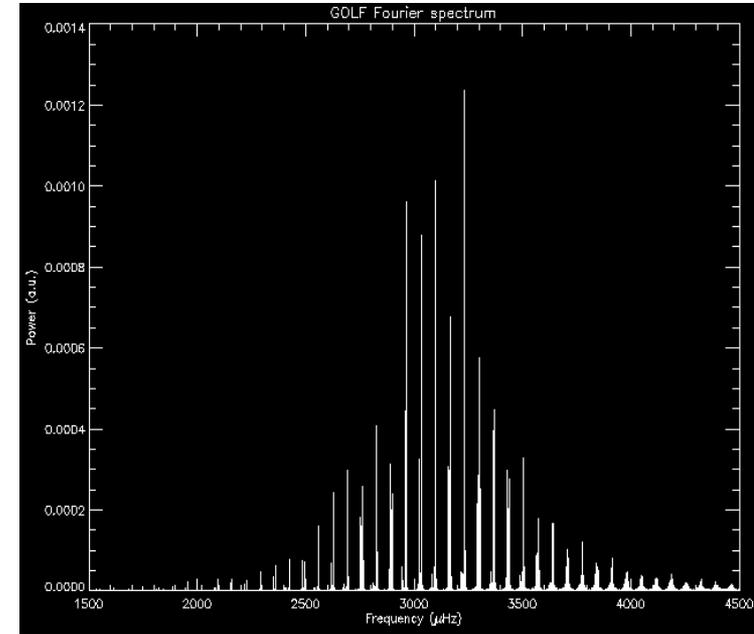
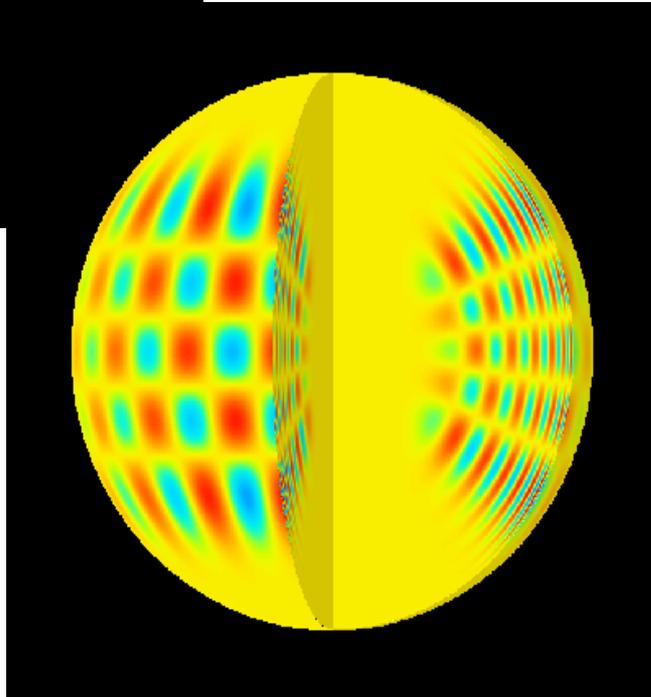
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern
Neutrinos



Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



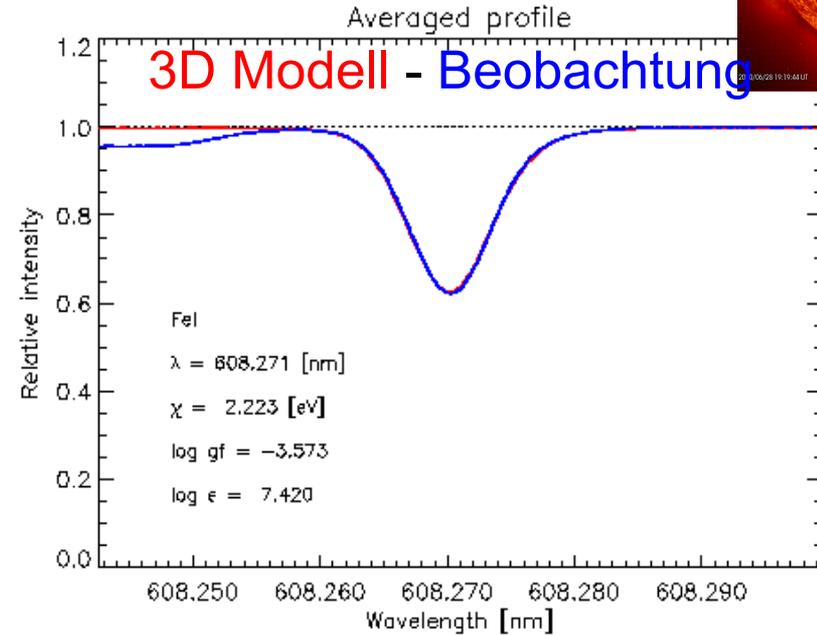
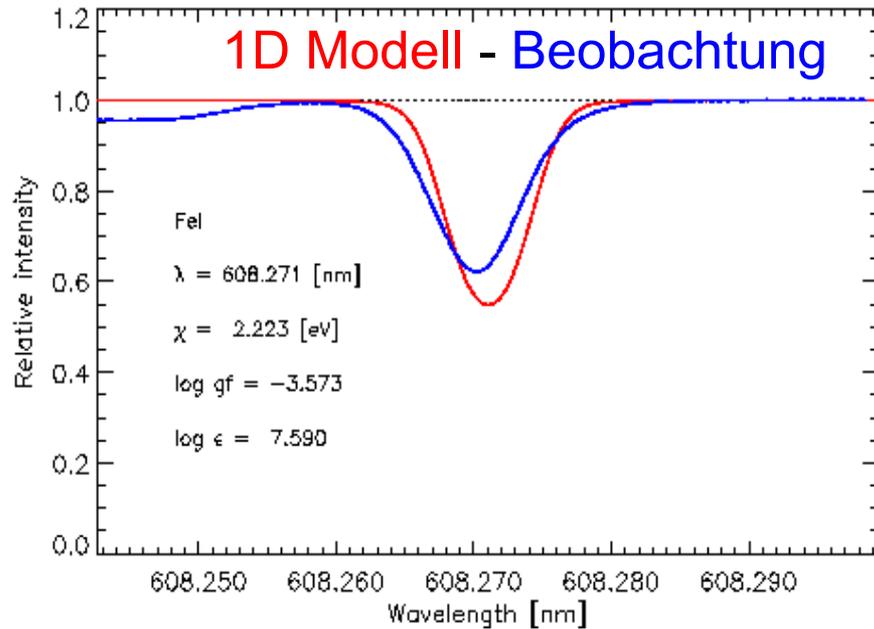
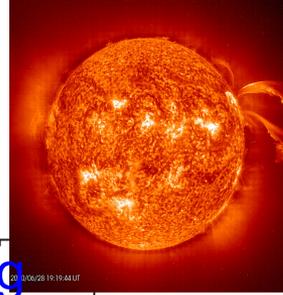
Satellit "SoHo"
(Solar and
Heliospheric
Observatory)



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



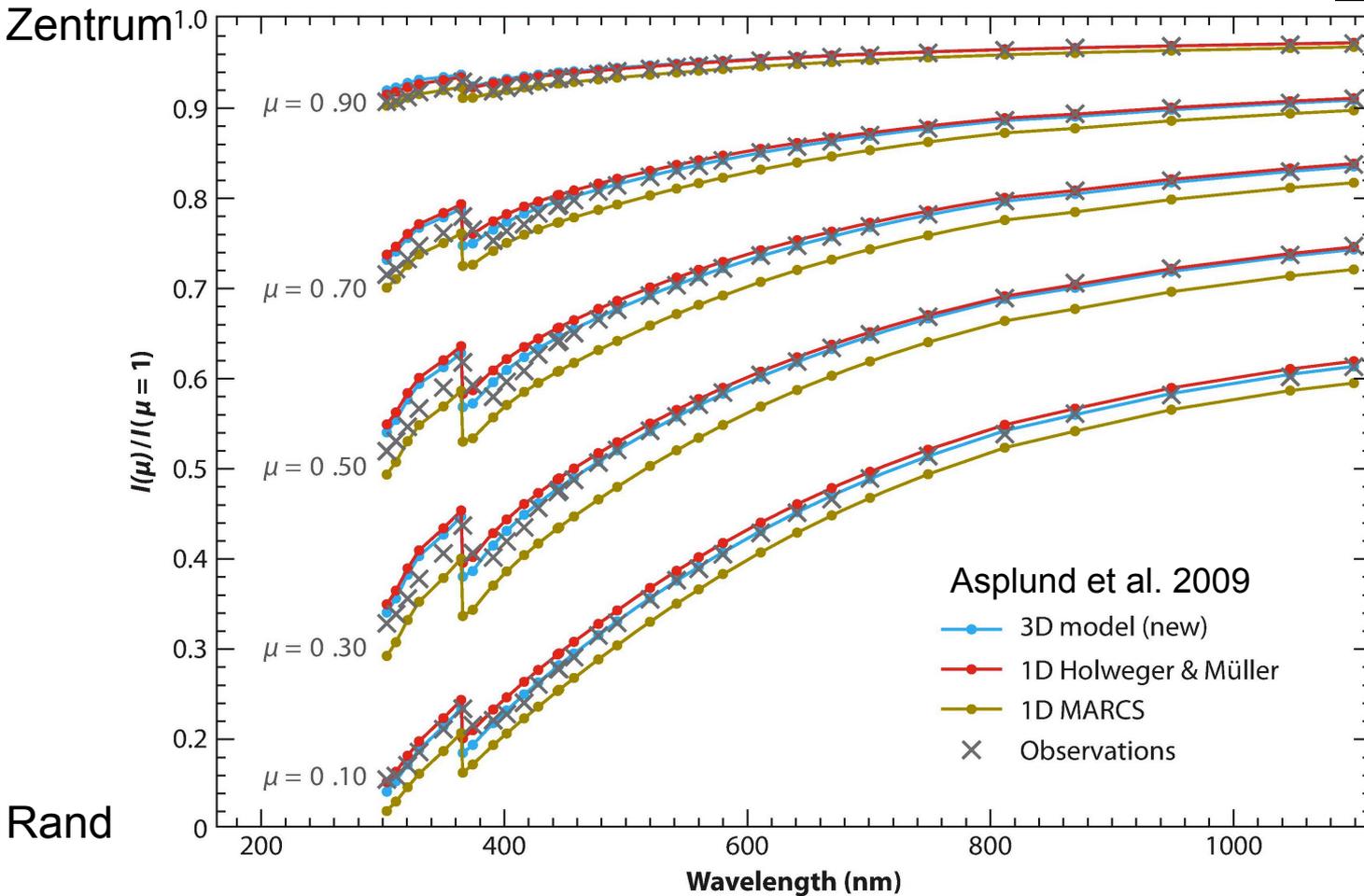
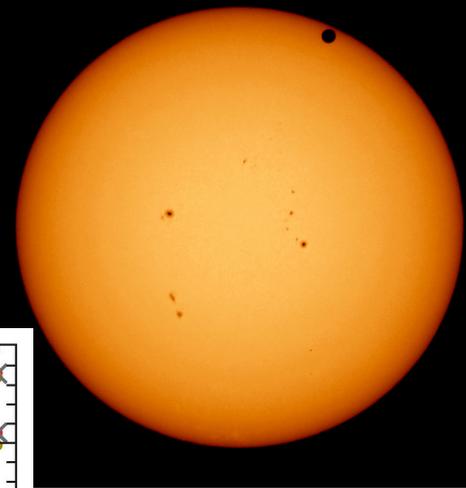
M. Asplund



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

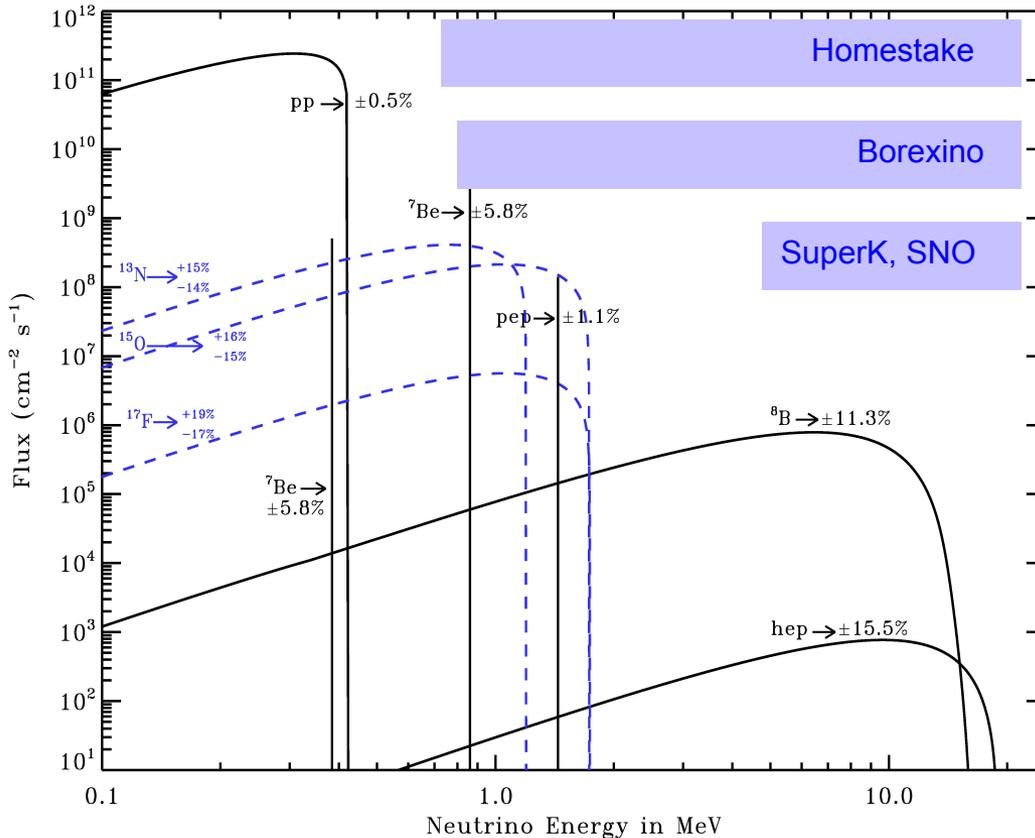
- 1D:** 2.29% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)
- 3D:** 1.78% der Sonnenmasse sind "Metalle" (Li...U)

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
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.59$ $\Phi(^{15}\text{O}) = 1.56$

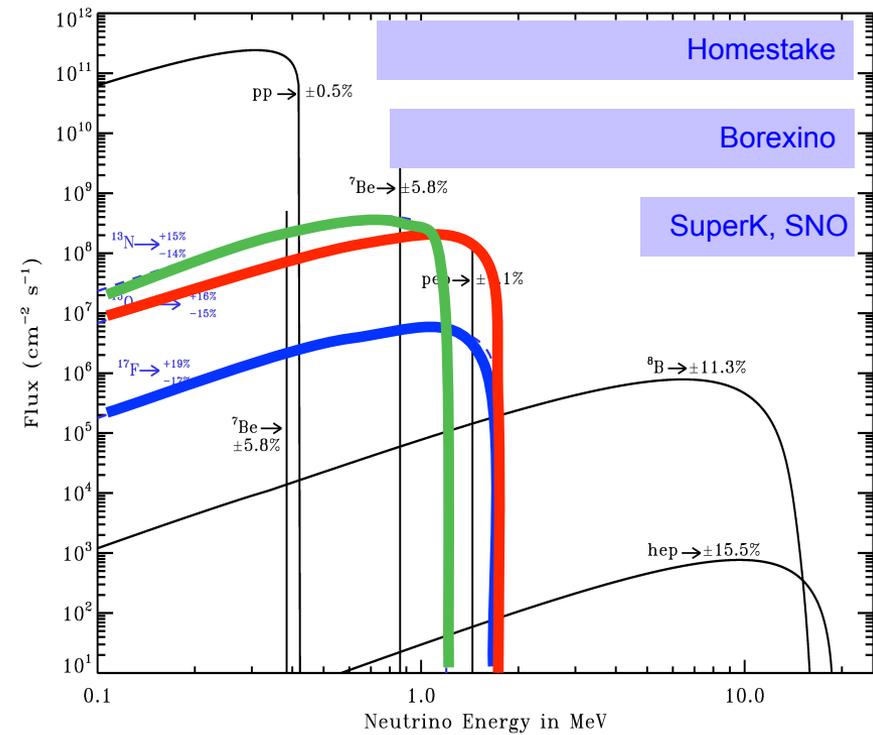
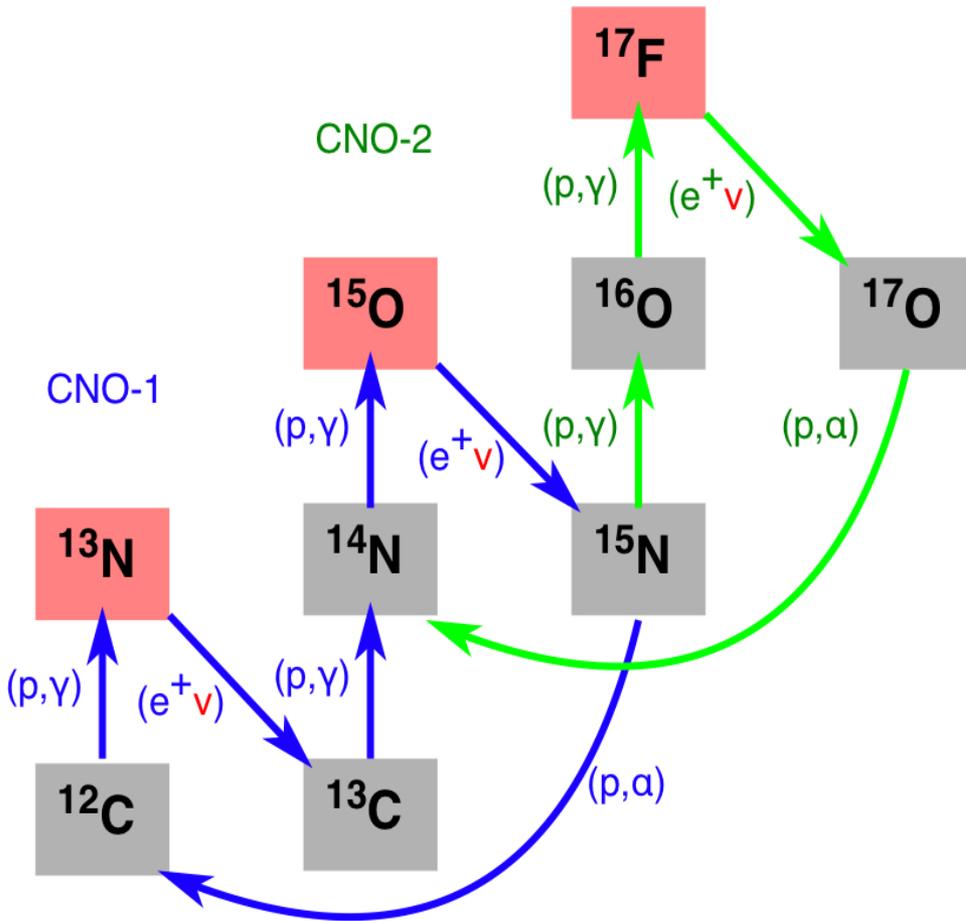
Neutrino-Flüsse in $10^6/(\text{cm}^2 \text{s})$

Neutrinos aus dem CNO-Zyklus

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

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

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



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

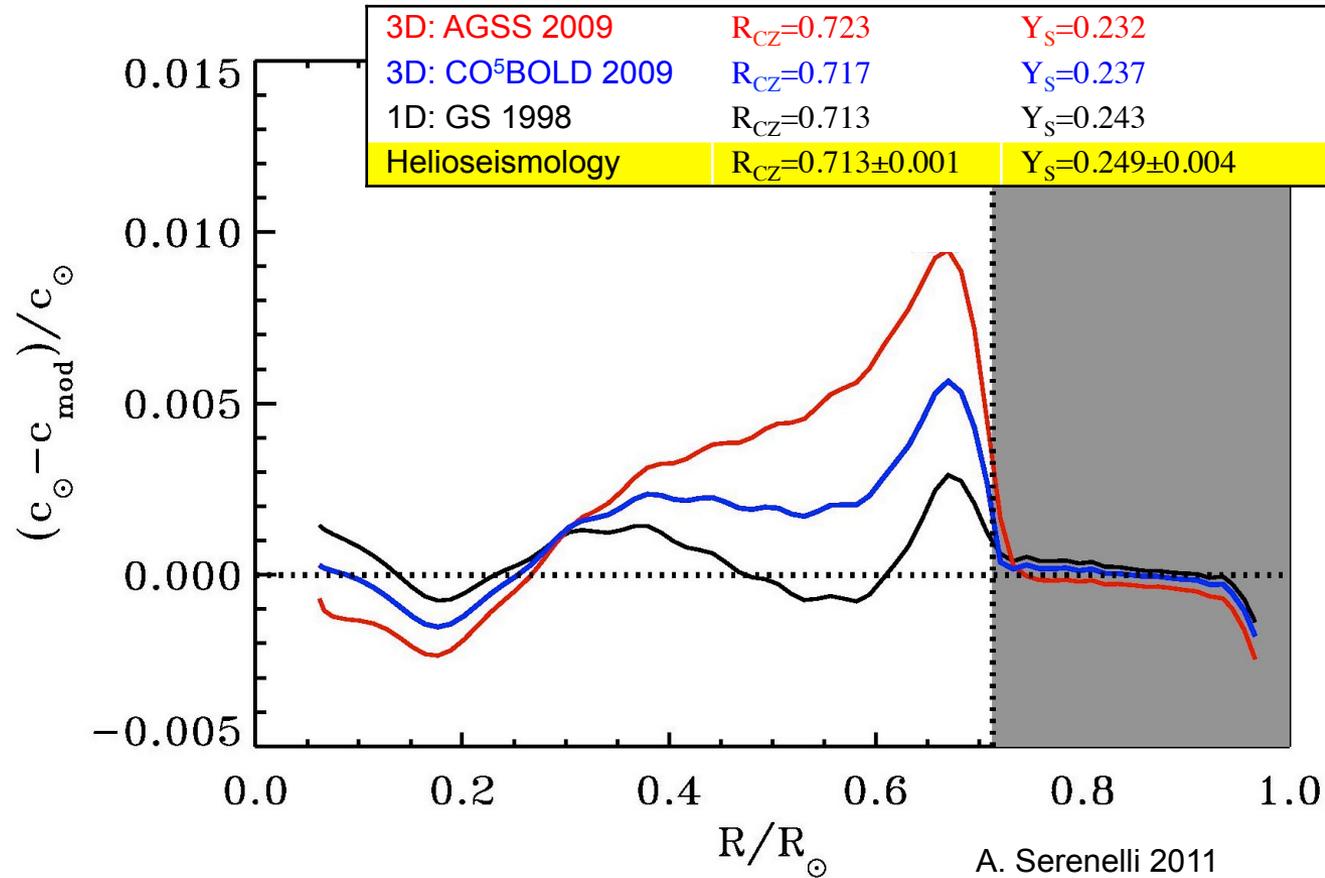
Problem:

Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

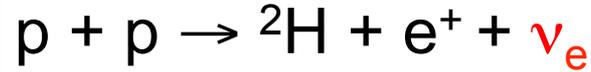
Standard-Sonnenmodell, gerechnet mit verschiedenen Elementhäufigkeiten.

Observable, die helioseismologisch überprüft werden können:

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



Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (1)

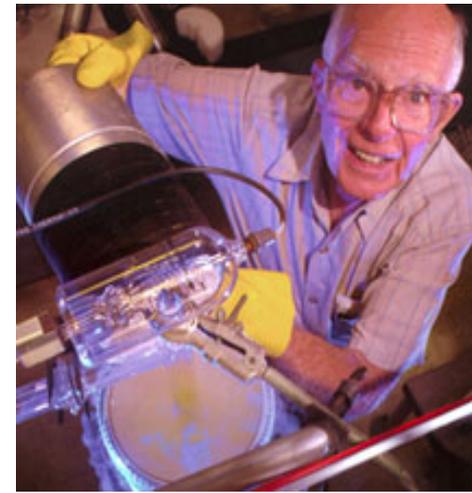


Homestake-Goldbergwerk (South Dakota / USA)

1500 m unter Tage

615 t Perchlorethylen (C_2Cl_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⁻ s)



Sonnenmodell: 8.5 SNU

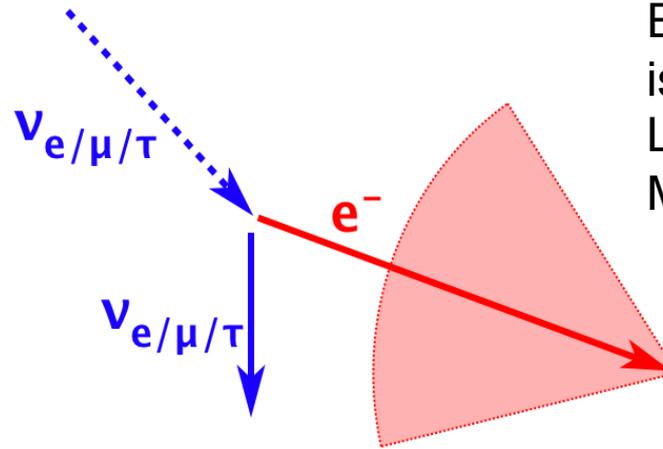
“Solares Neutrino problem”, 1972-2002

Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (2)

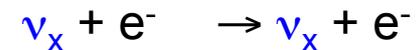
Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada):

Schwerwasser-Tscherenkow-Zähler
1000 t D₂O , 2100 m unter Tage

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



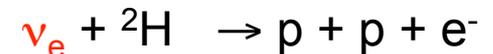
ES = Elastic scattering:



NC = neutral current:



CC = charged current:



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 ${}^8\text{B}$ -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

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

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

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

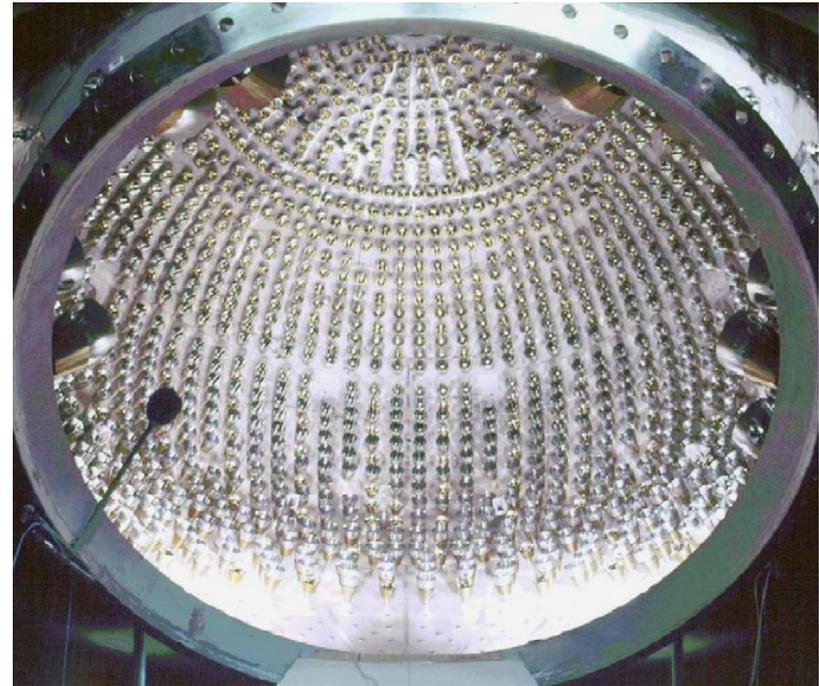
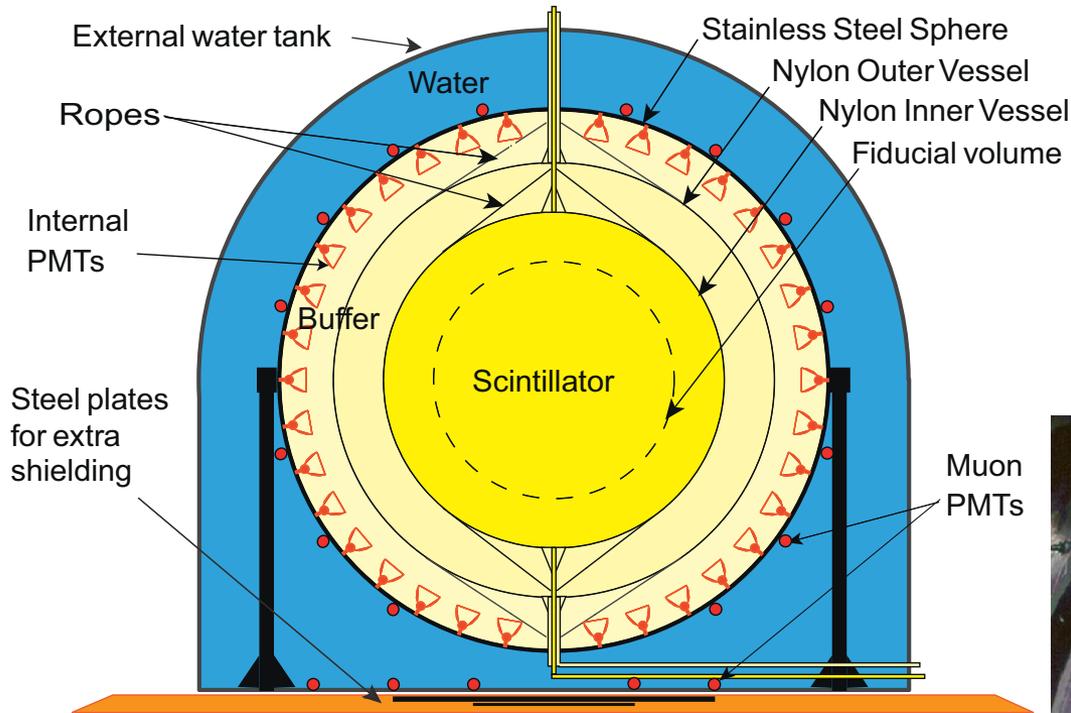
(Experiment, SNO)

Sonnenmodell: 4.72...5.94

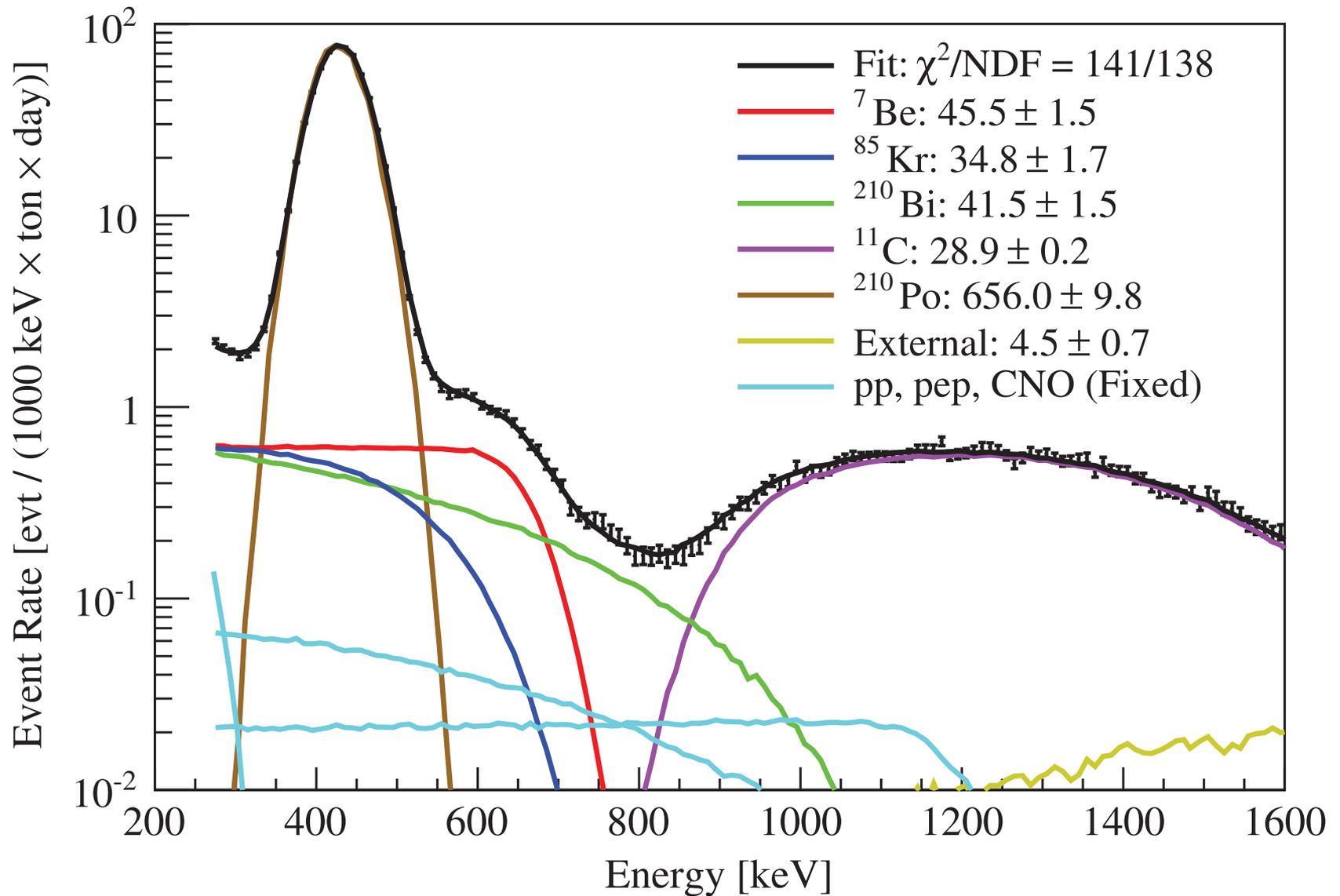
Neutrino-Flüsse in $10^6/(\text{cm}^2 \text{ s})$

Sonnenneutrinos: Beobachtungen mit dem Borexino-Detektor

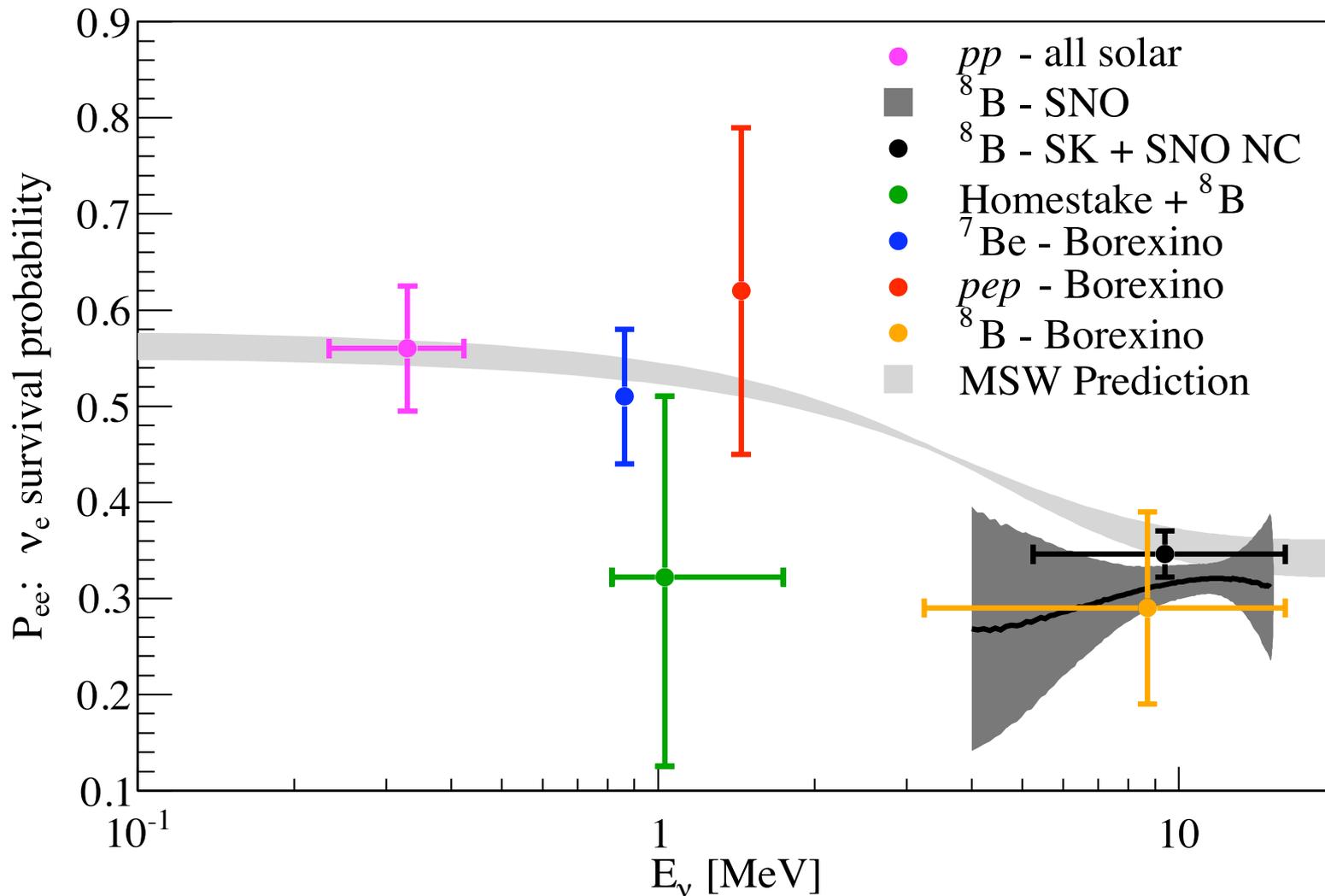
Borexino Detector

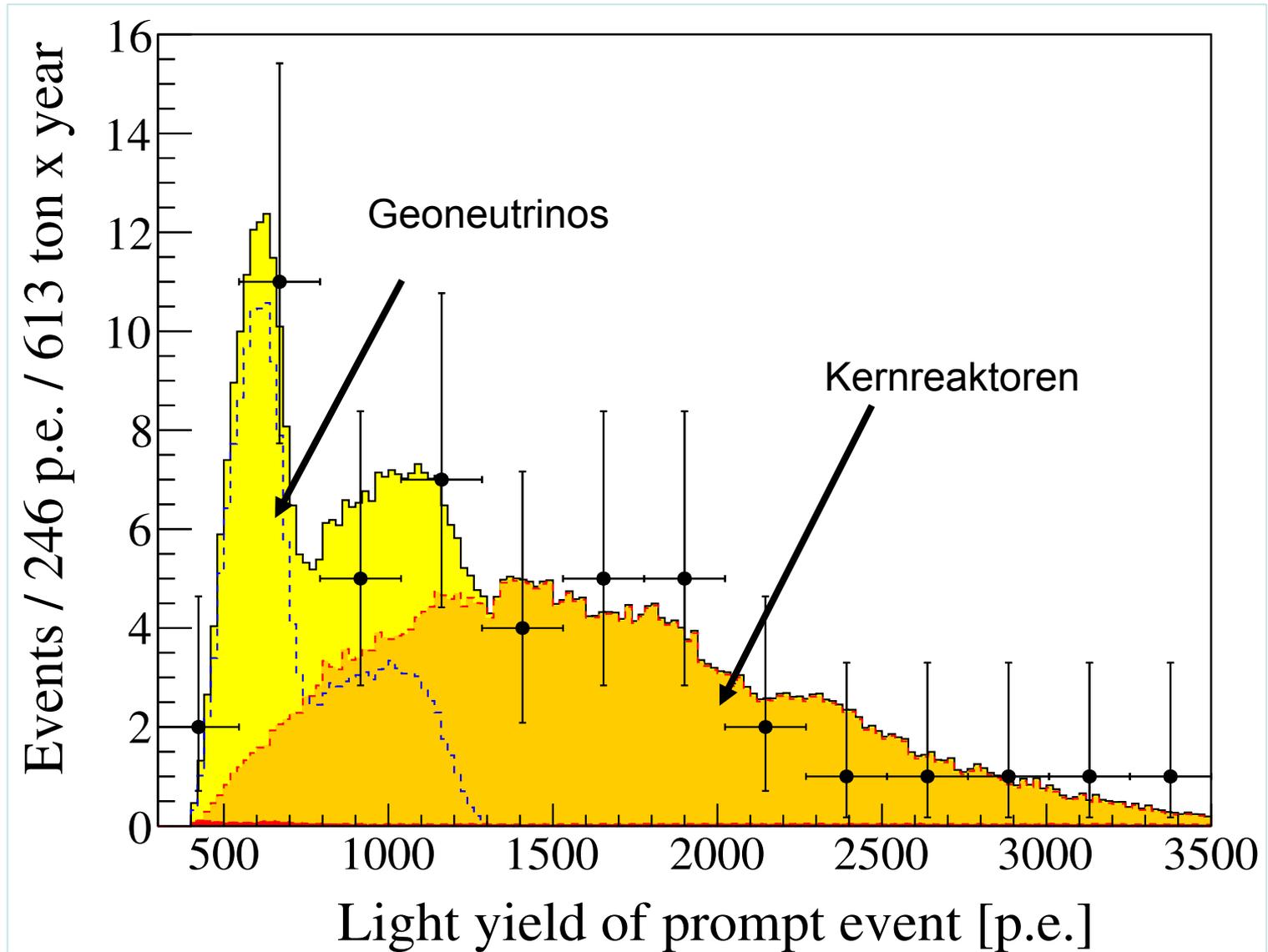


- ◆ Flüssigszintillator Pseudokumol
- ◆ Prompter Nachweis von e^- aus elastischer Neutrinostreuung

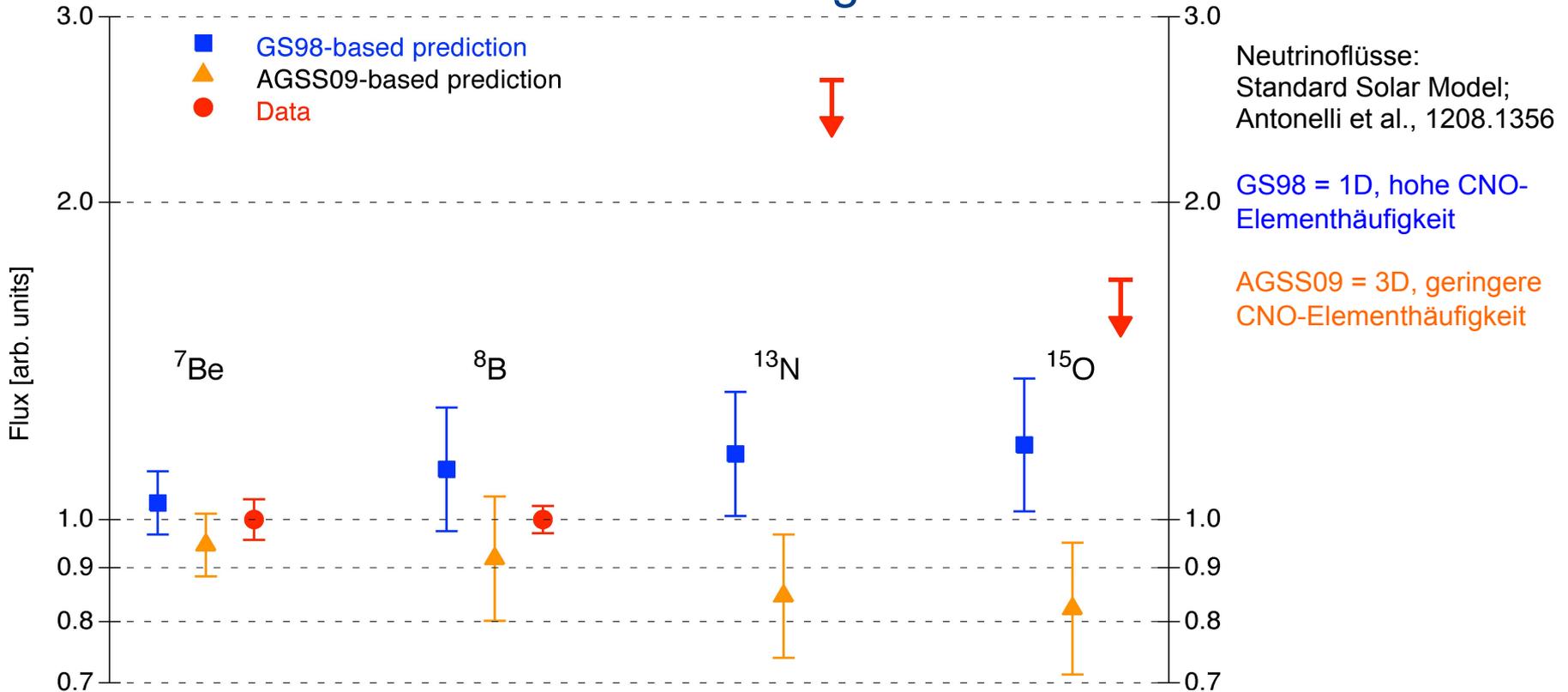


Neutrino-Oszillationen

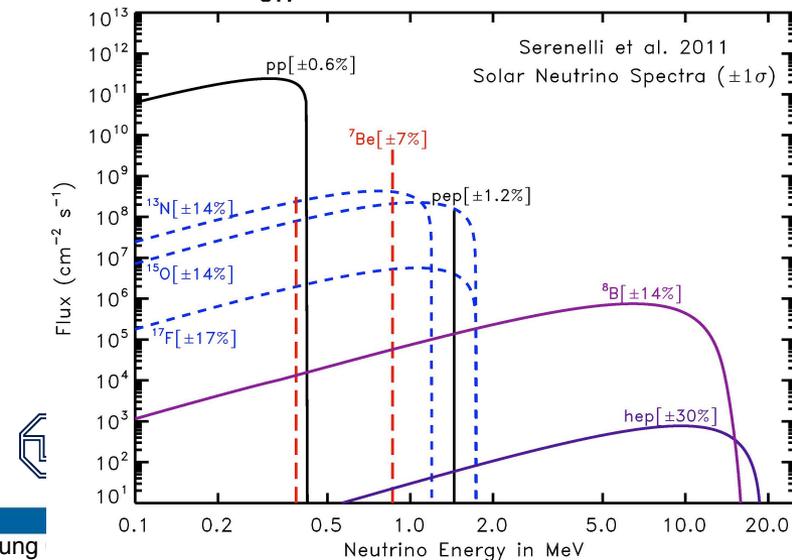




Sonnenneutrino-Flüsse: Vorhersagen und Messdaten



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



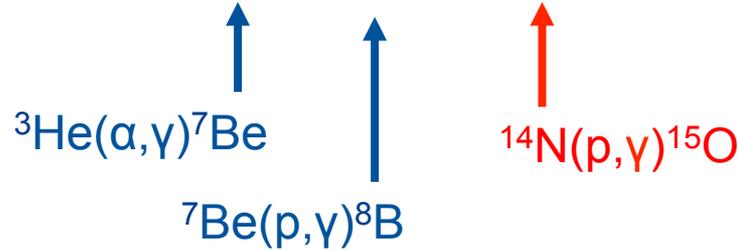
Woher kommen die großen Fehlerbalken in der Vorhersage?

Nuclear reaction rates

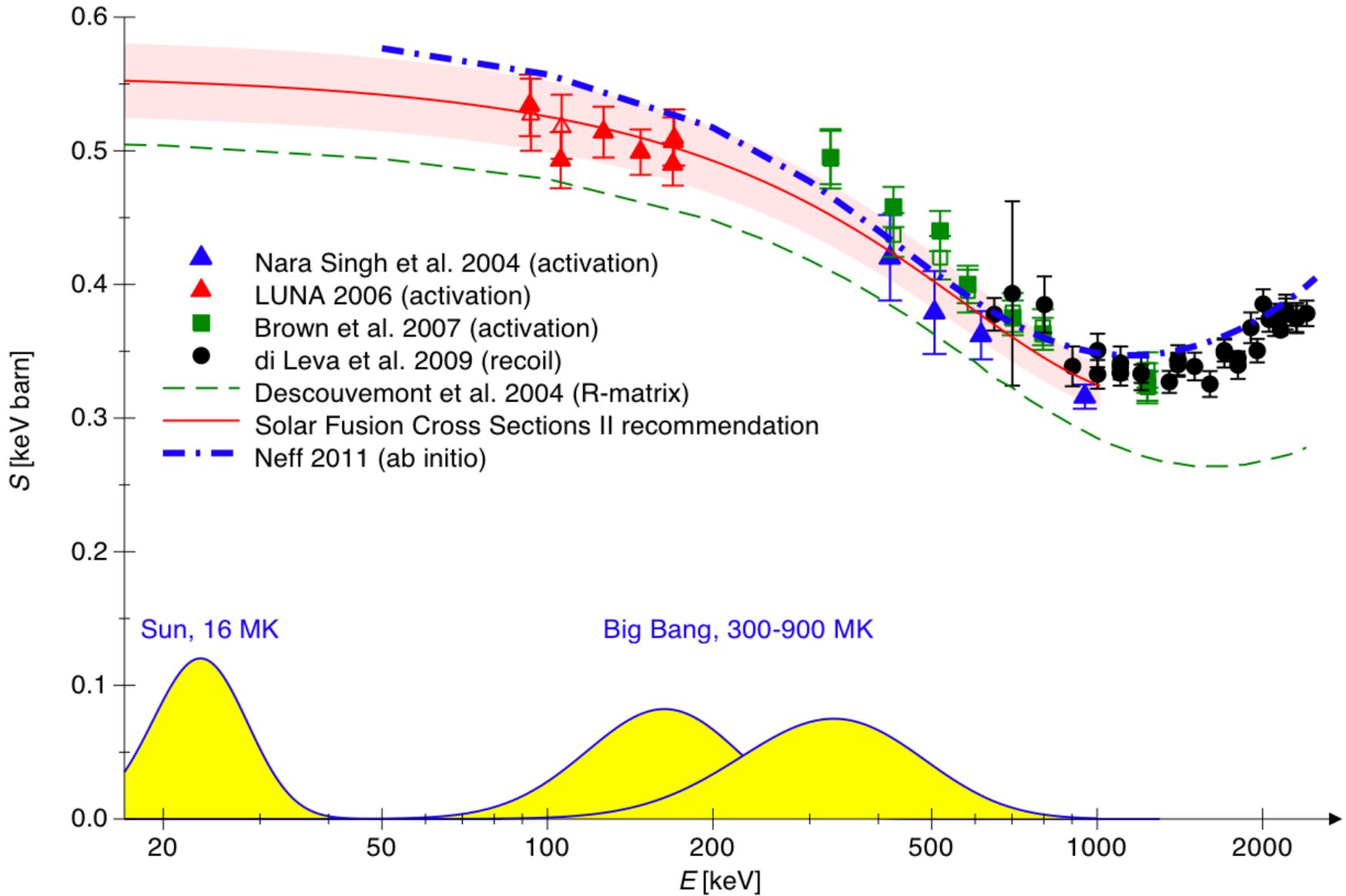
	S_{11}	S_{33}	S_{34}	S_{17}	$S_{1,14}$	Opac	Diff
pp	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.2	0.2
pep	0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	0.7	0.2
hep	0.1	2.3	0.4	0.0	0.0	1.0	0.5
${}^7\text{Be}$	1.1	2.2	4.7	0.0	0.0	3.2	1.9
${}^8\text{B}$	2.7	2.1	4.5	7.7	0.0	6.9	4.0
${}^{13}\text{N}$	2.1	0.1	0.3	0.0	5.1	3.6	4.9
${}^{15}\text{O}$	2.9	0.1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

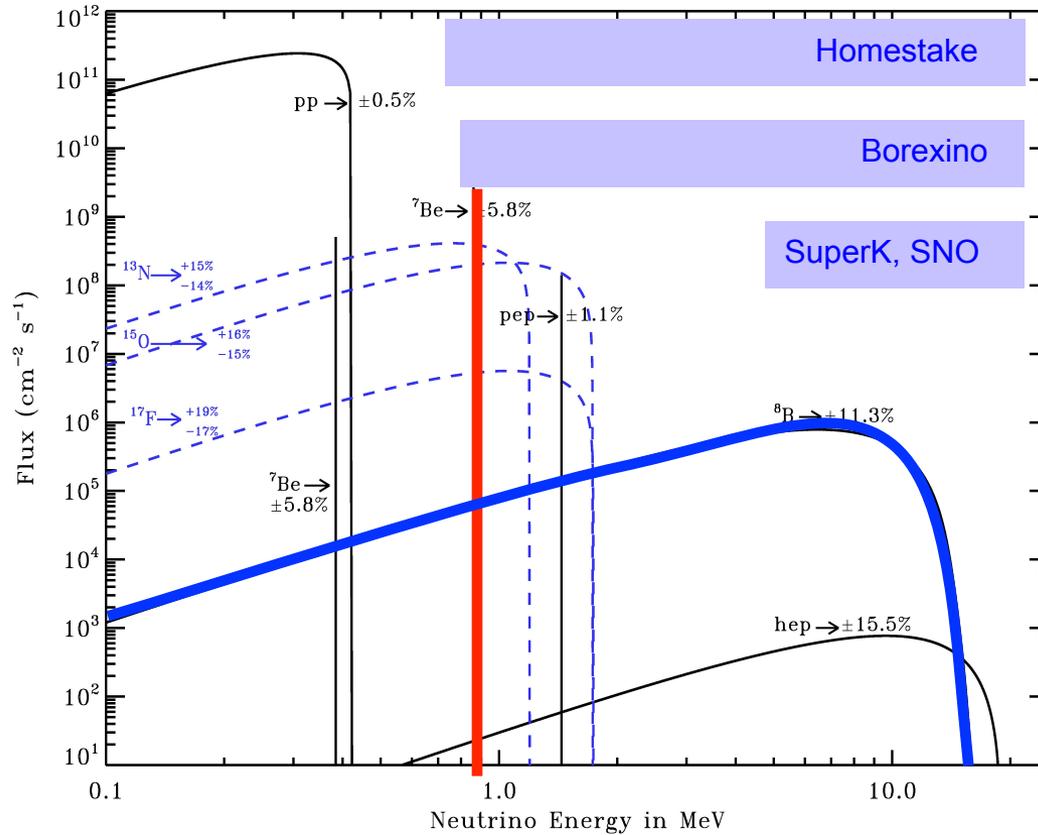
Antonelli et al., 1208.1356



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

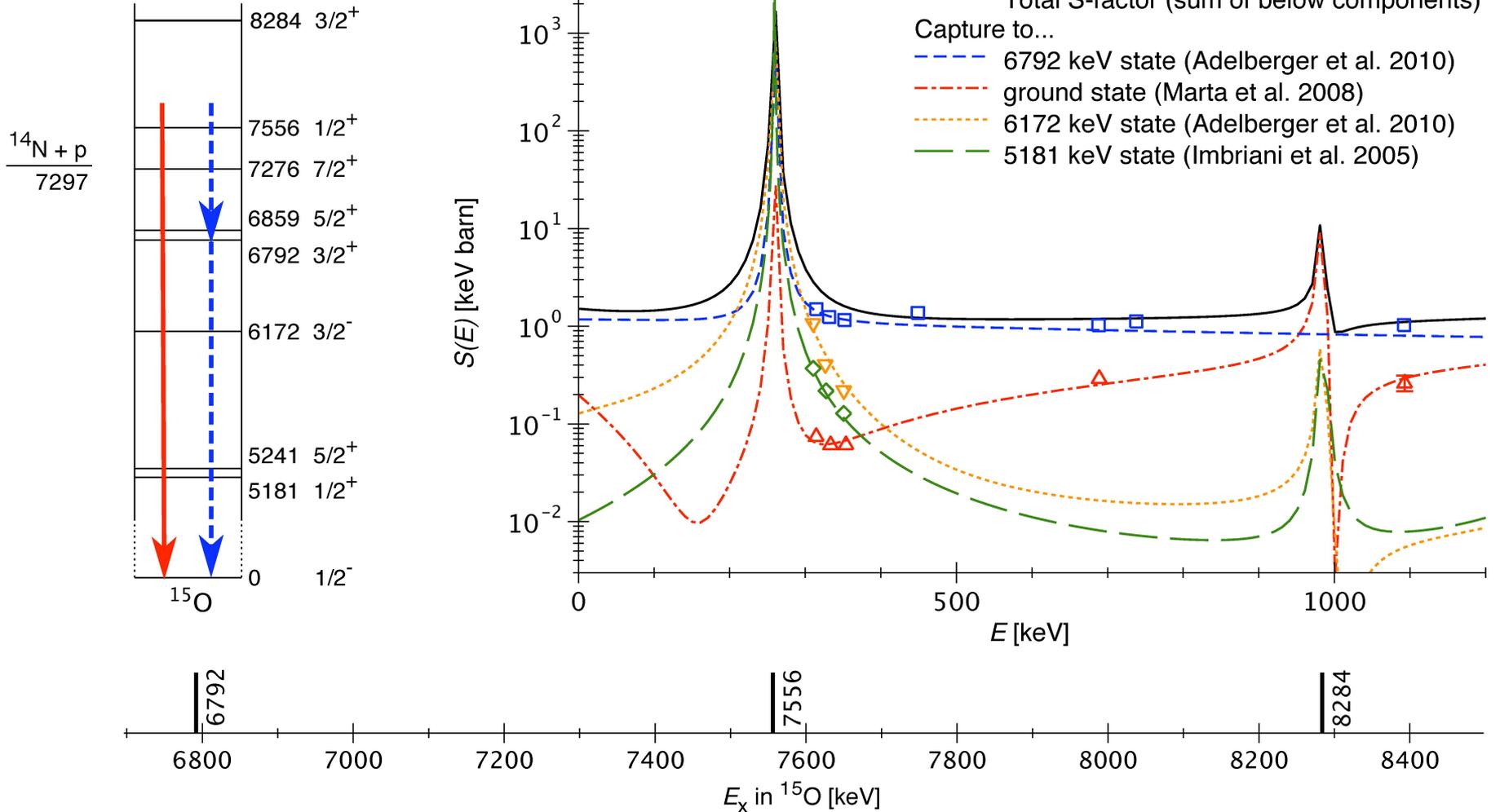
Reaktion	$\frac{\partial \ln \Phi_B}{\partial \ln \sigma}$	$\Delta \Phi_B / \Phi_B$
	${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$	-0.43
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$	0.86	7.5% 4.2%
${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$	1.00	7.5%

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

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

Borexino: 4.6% (syst.+stat.) Präzision für Φ_{Be} 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

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.

