

# Kosmologie und Astroteilchenphysik

Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, PD Dr. Daniel Bemmerer, **Felix Ludwig**

- 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 (heute)
- Altersbestimmung des Universums
- **Neutrinos aus der Sonne und ihre Oszillationen (heute)**

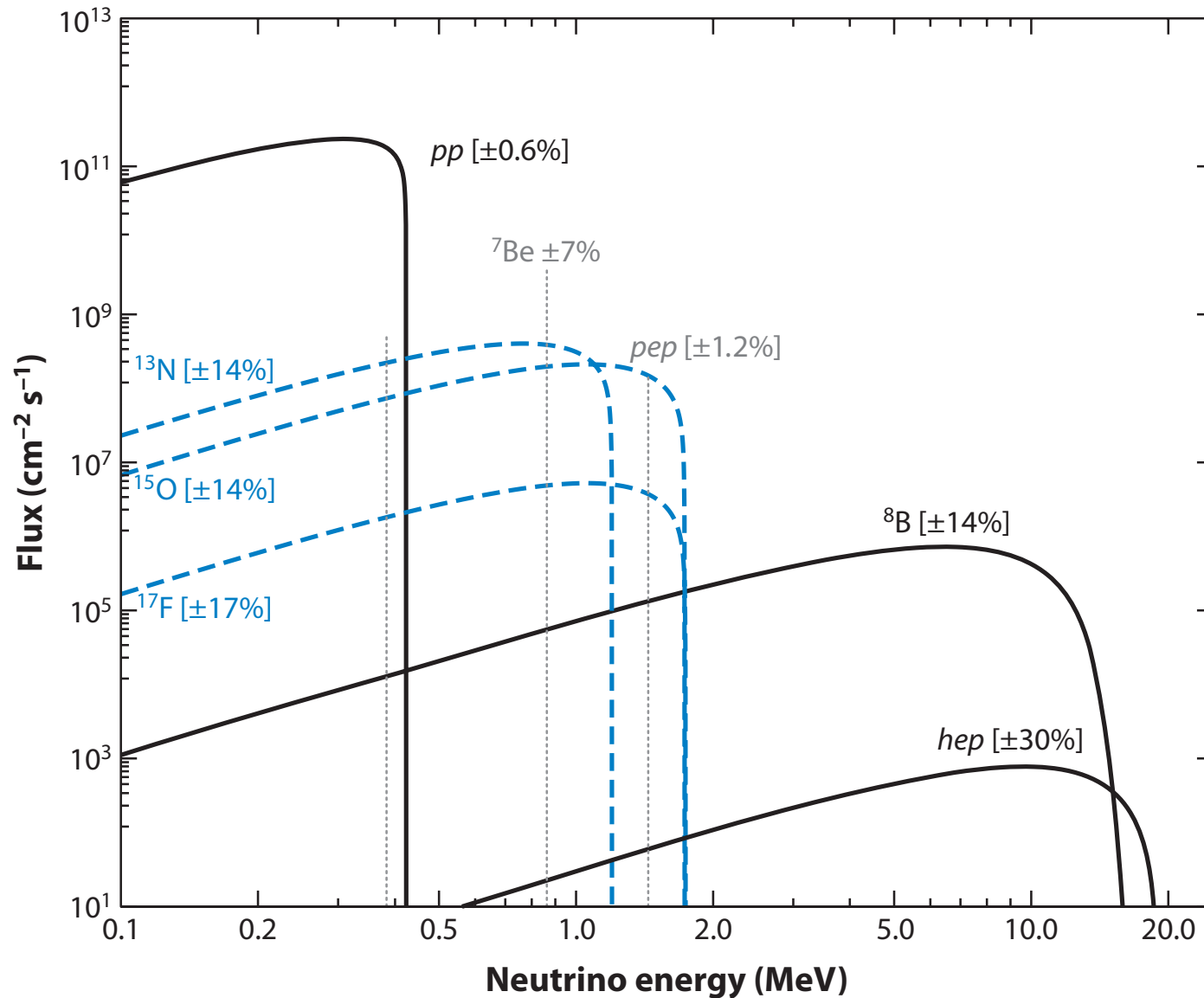
13. Vorlesung, 13.07.2016



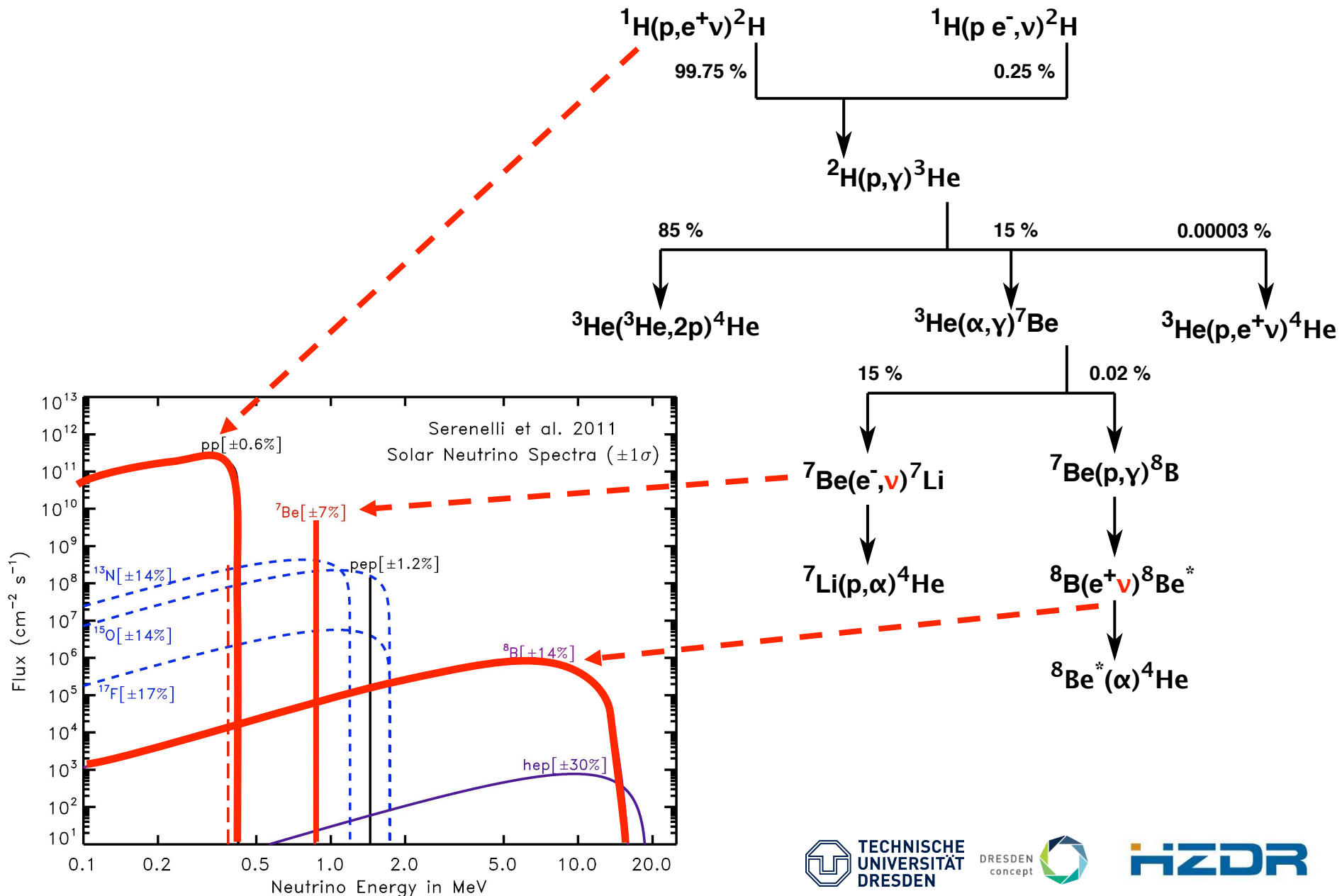
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



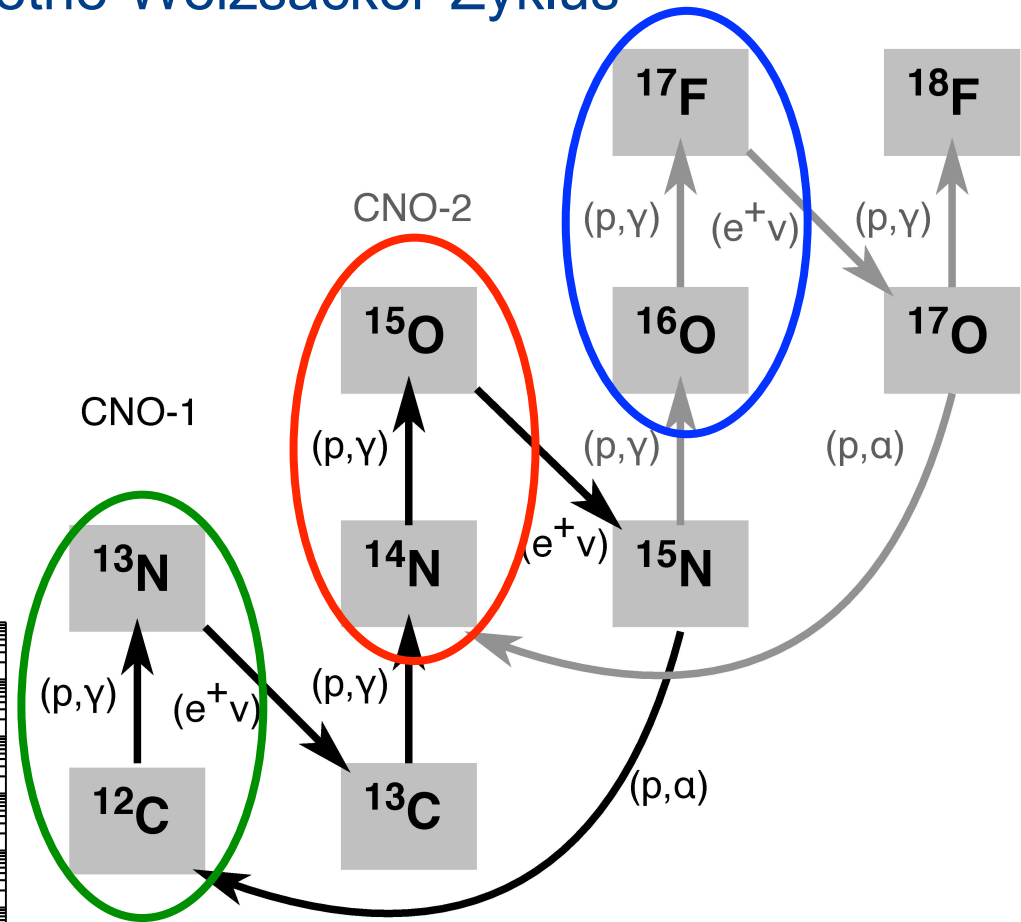
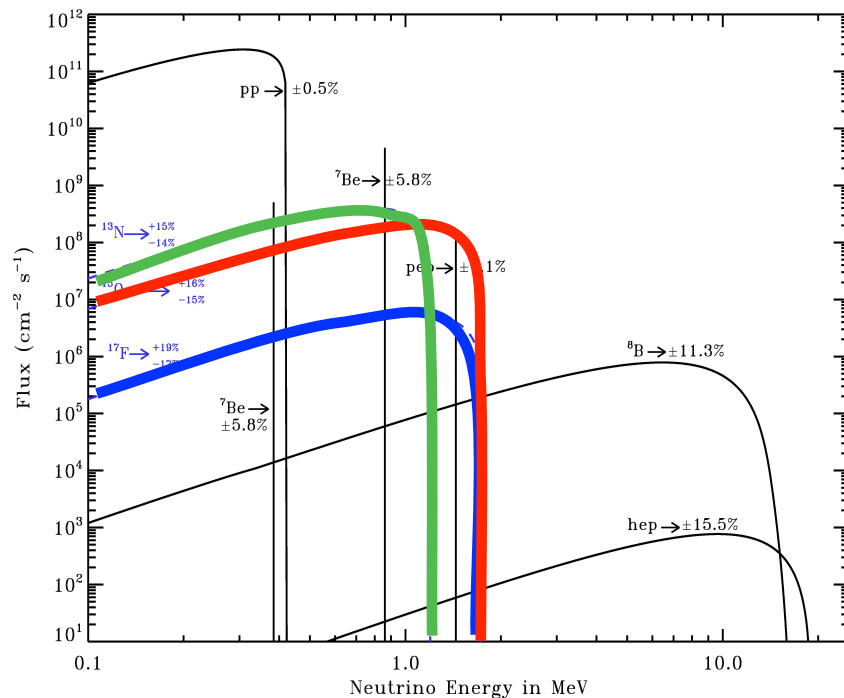
# Vorhergesagtes Sonnenneutrino-Spektrum



# Sonnen-Neutrinos aus der Proton-Proton-Kette

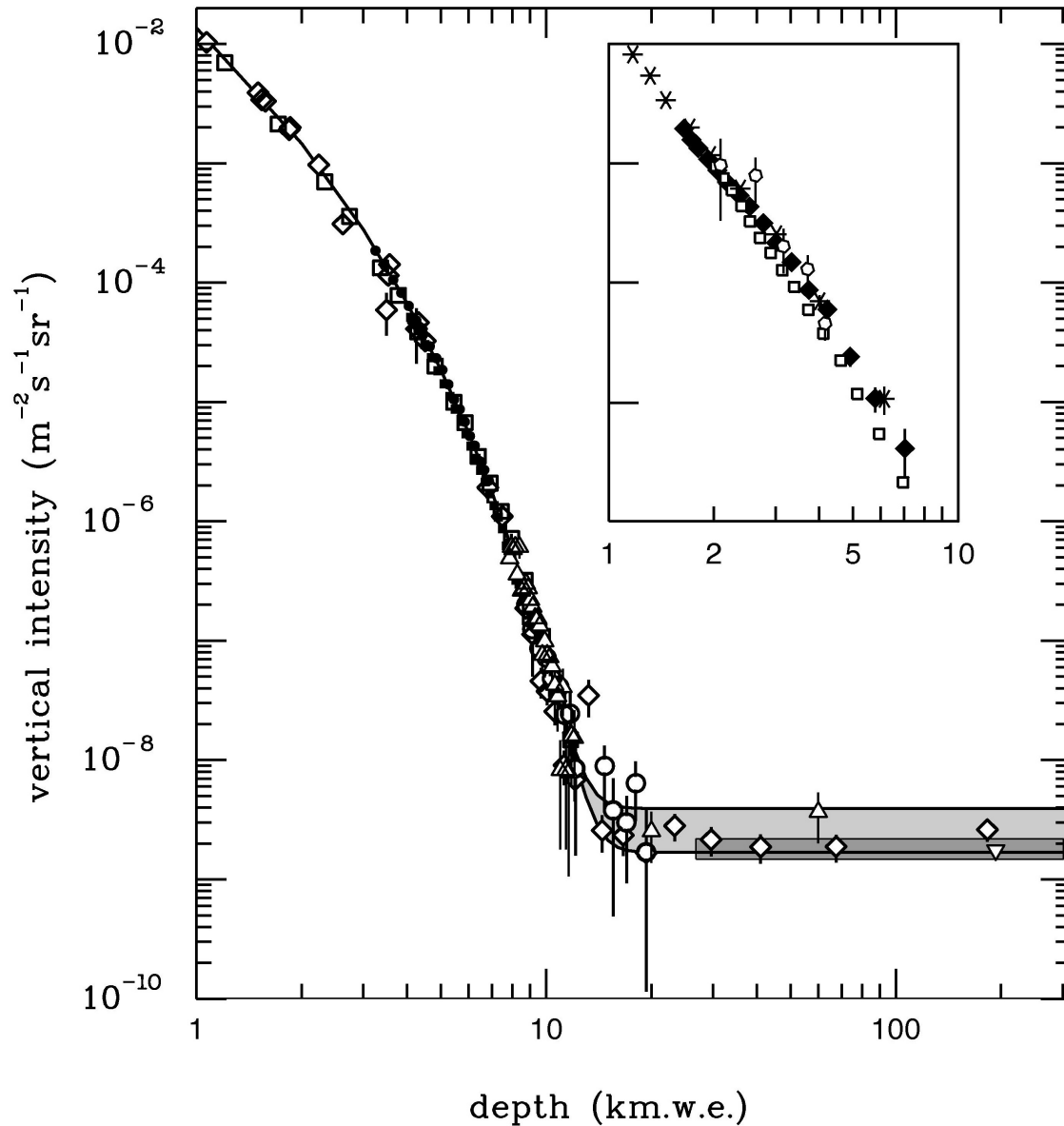


# Sonnen-Neutrinos aus dem Bethe-Weizsäcker-Zyklus





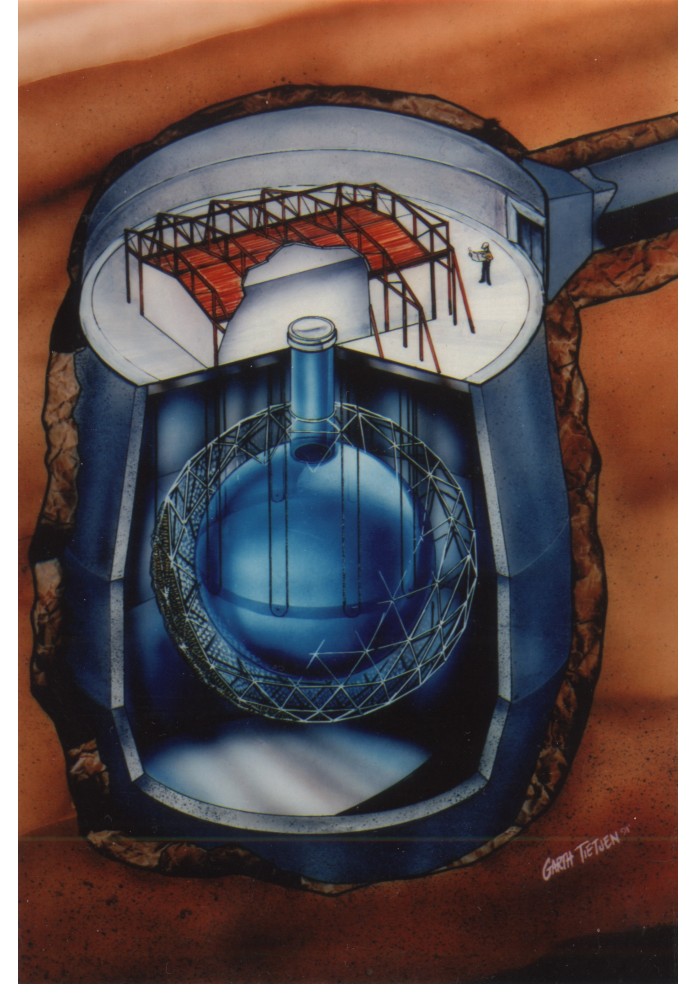
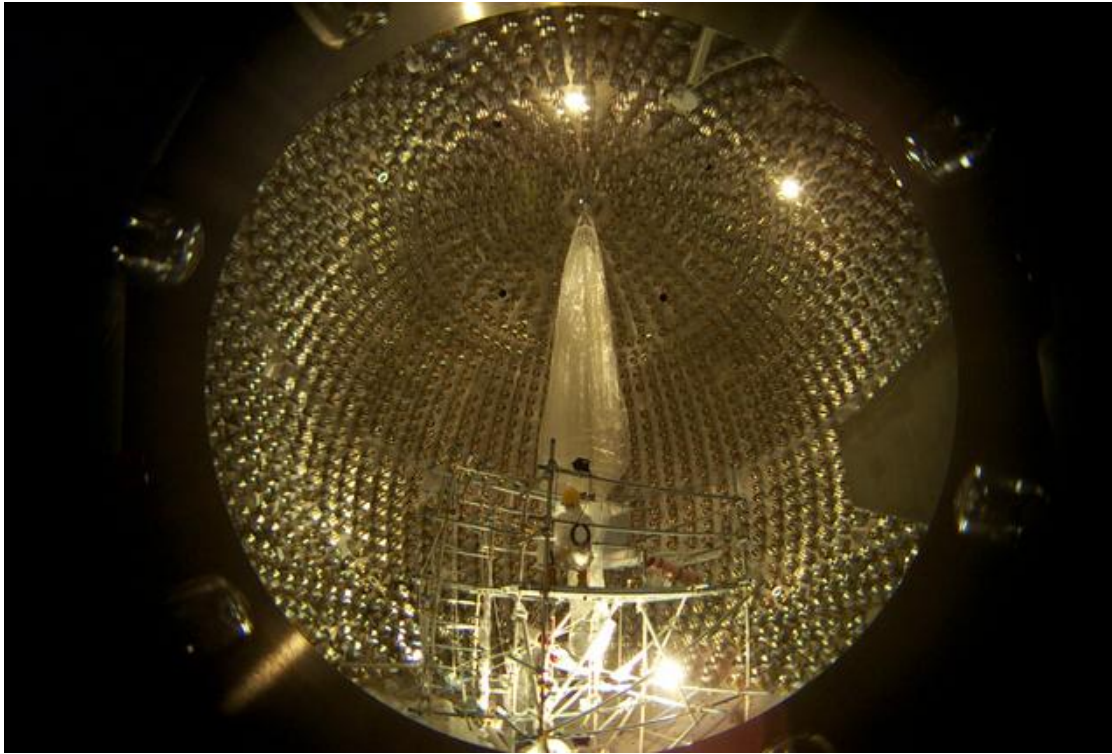
# Abschirmung der kosmischen Strahlung unter Tage (PDG)



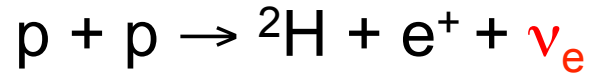
# Neutrinodektoren für ${}^7\text{Be}$ und ${}^8\text{B}$ - Neutrinos

SNO (Sudbury/Kanada):  
 ${}^8\text{B}$  - Neutrinos, schweres Wasser

Borexino (Gran Sasso/Italy):  
pp-,  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos, Flüssigszintillator



# 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

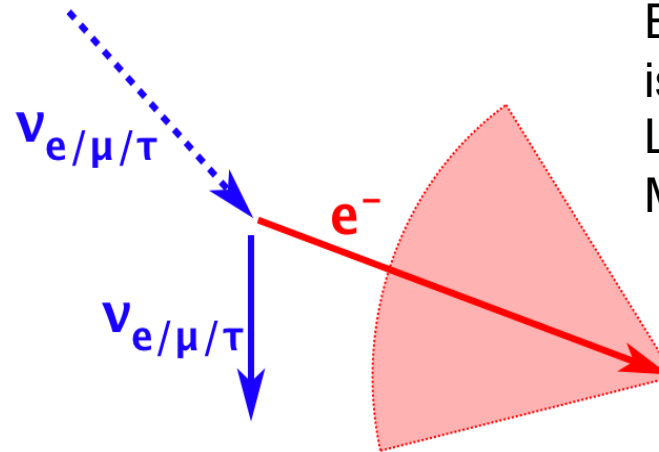


# Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (2)

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada):

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

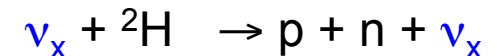
Tscherenkow-Kegel eines Elektrons, das schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium ( $n=1.33$ ).



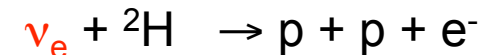
ES = Elastic scattering:

$$\nu_x + e^{-} \rightarrow \nu_x + e^{-}$$

NC = neutral current:



CC = charged current:



# 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

Sonnenmodell: 4.72...5.94

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

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

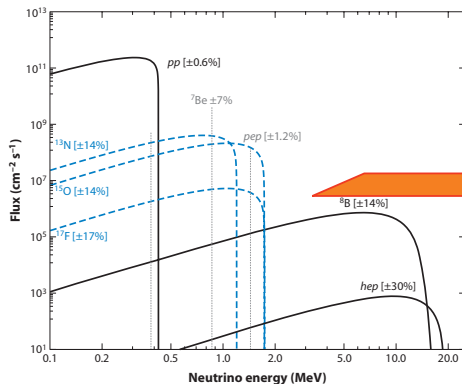
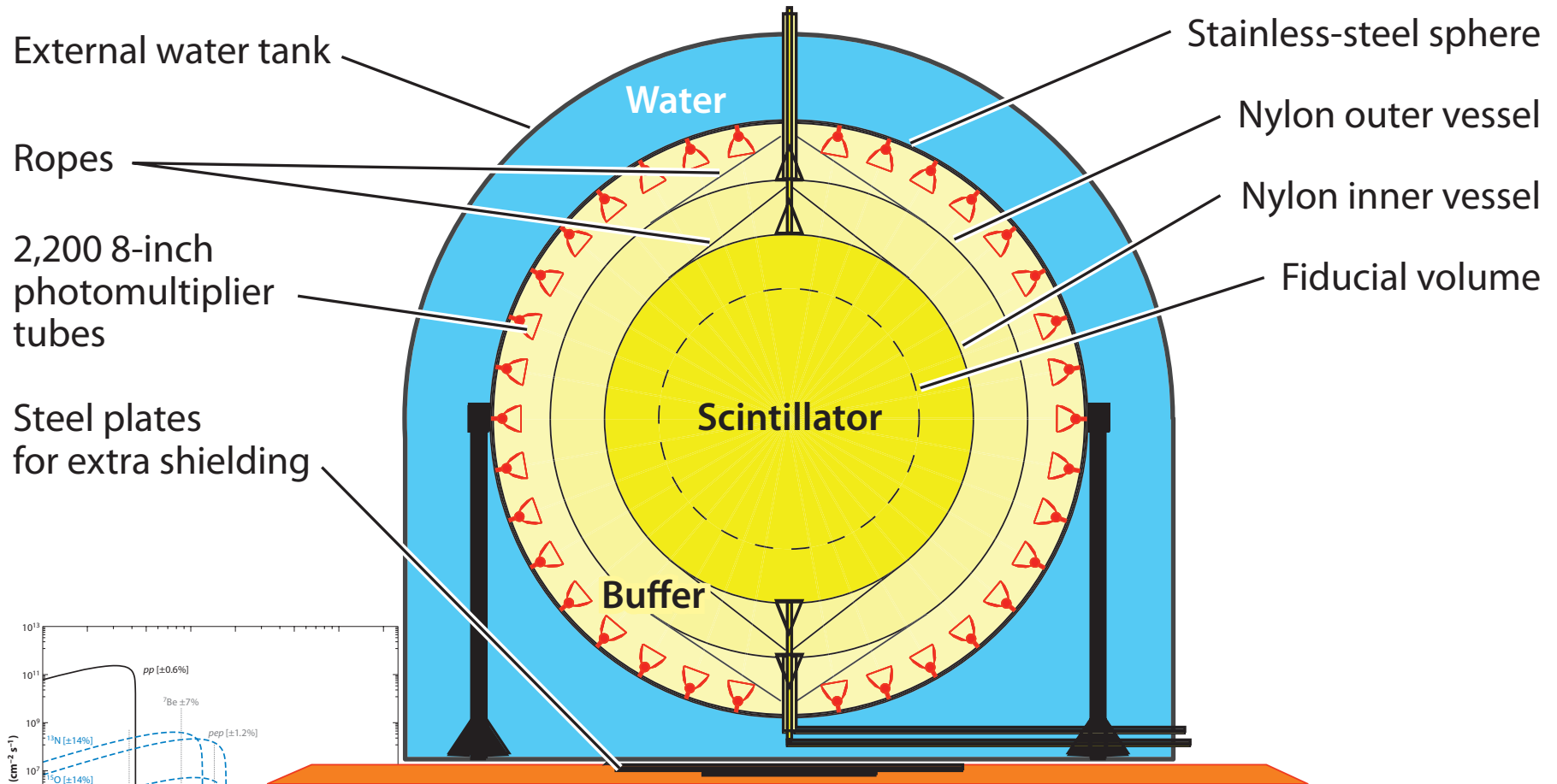
$$\Phi_e + \Phi_{\mu\tau} = 5.17 \pm 0.67 \text{ (stat.+syst.)}$$

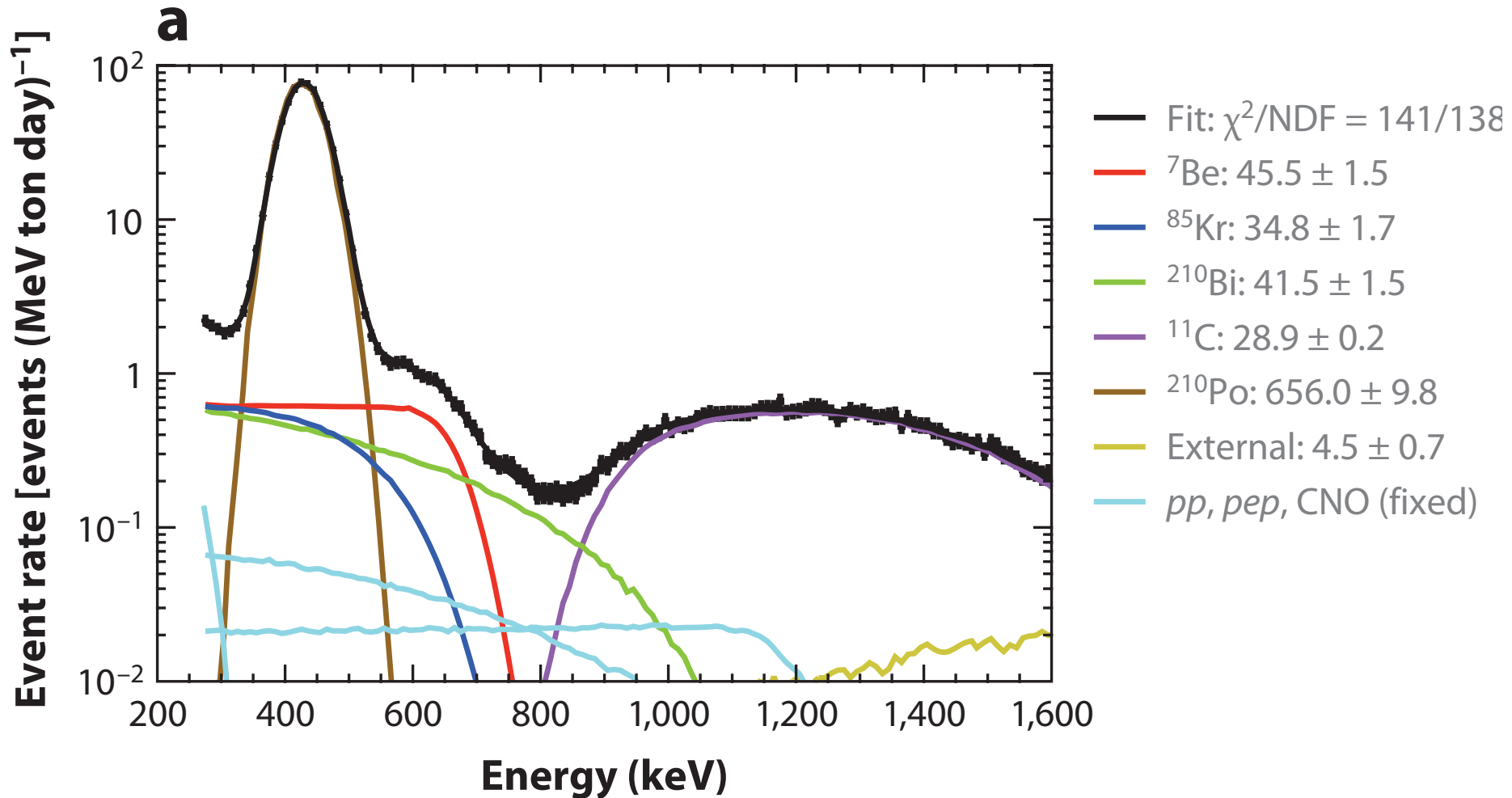
(Experiment, SNO)

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

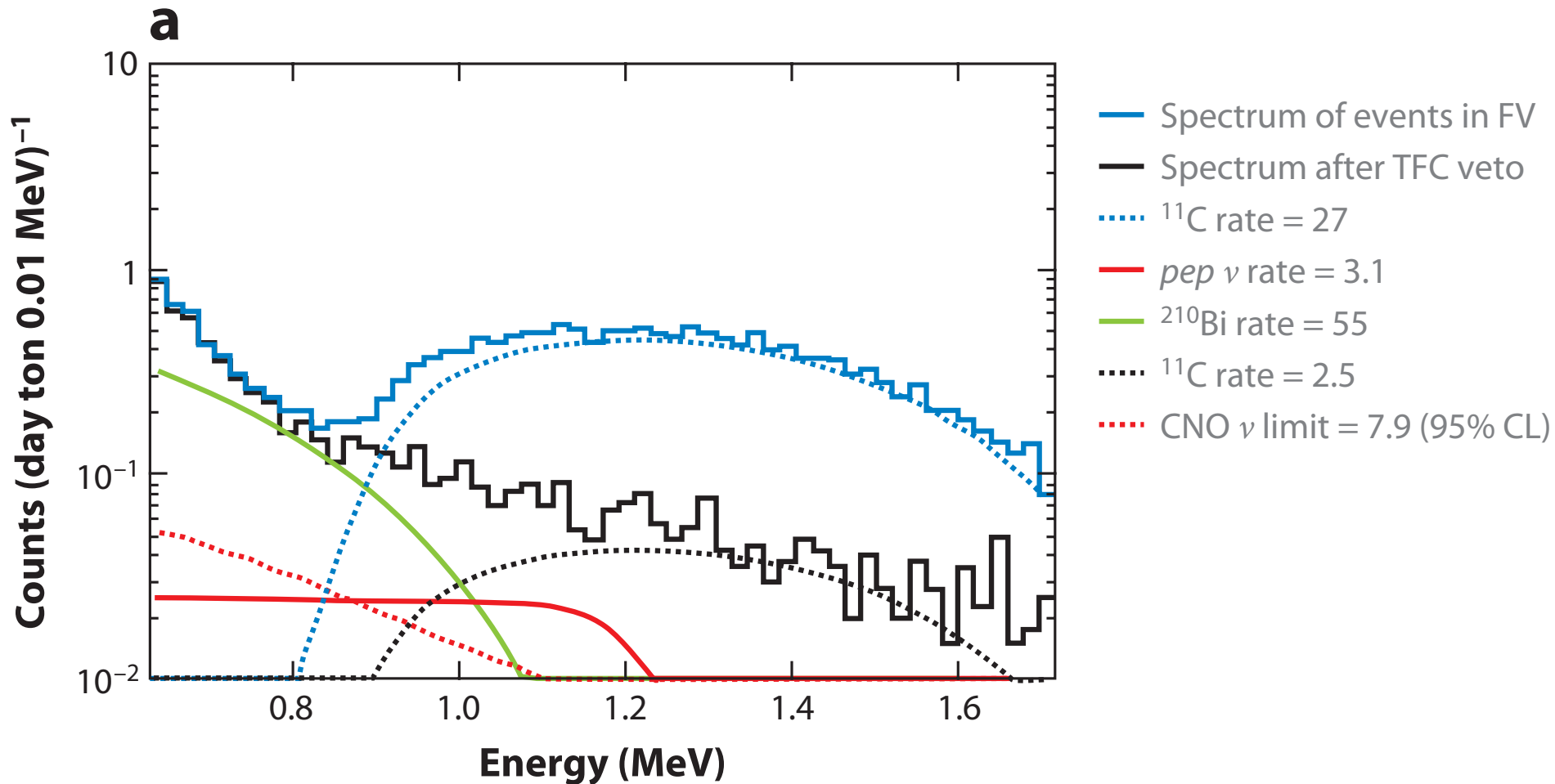
# Borexino-Detektor (pp- und ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos)

## Borexino experiment



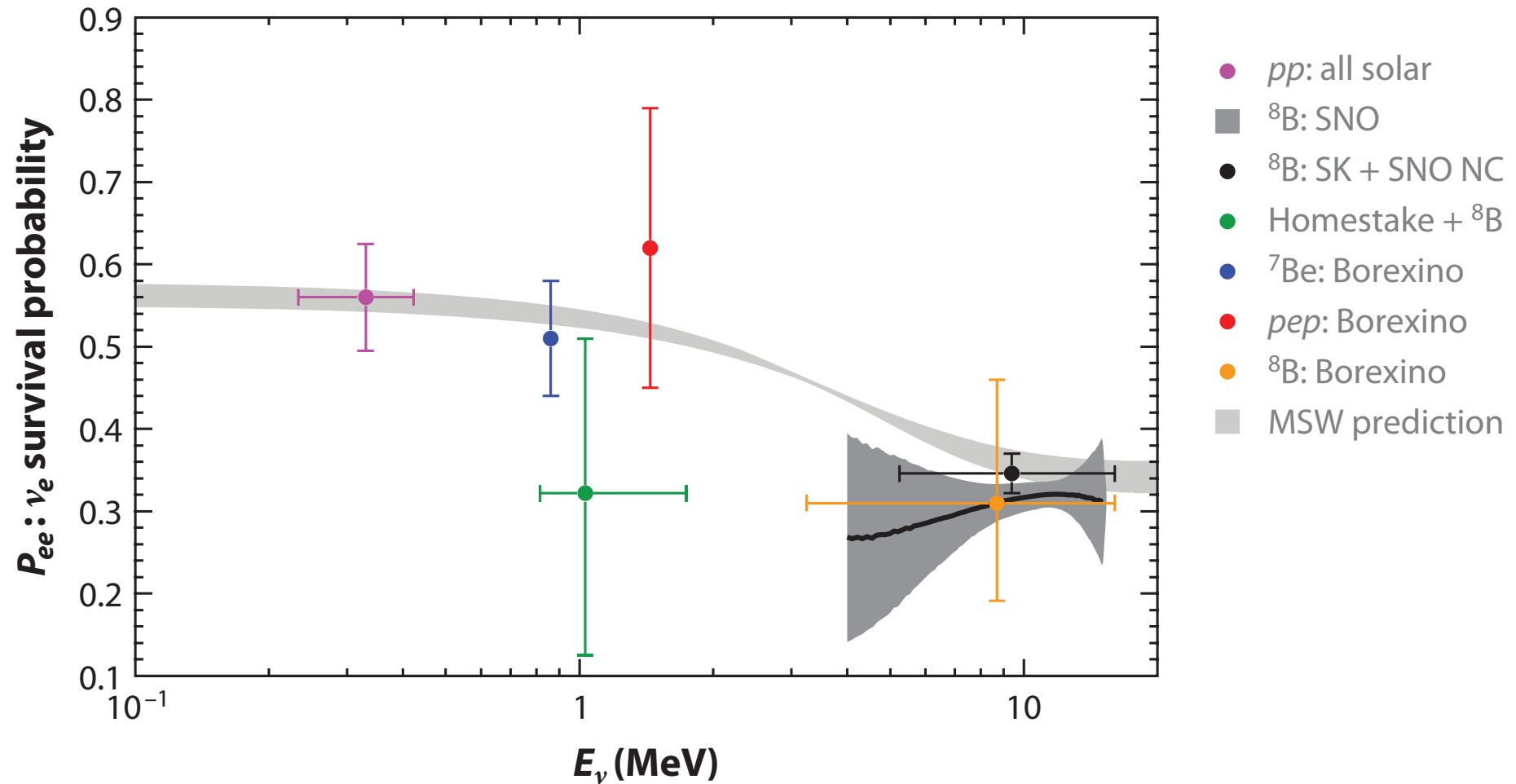


# Borexino, Reduktion des $^{11}\text{C}$ -Untergrunds durch Dreifach-Koinzidenz

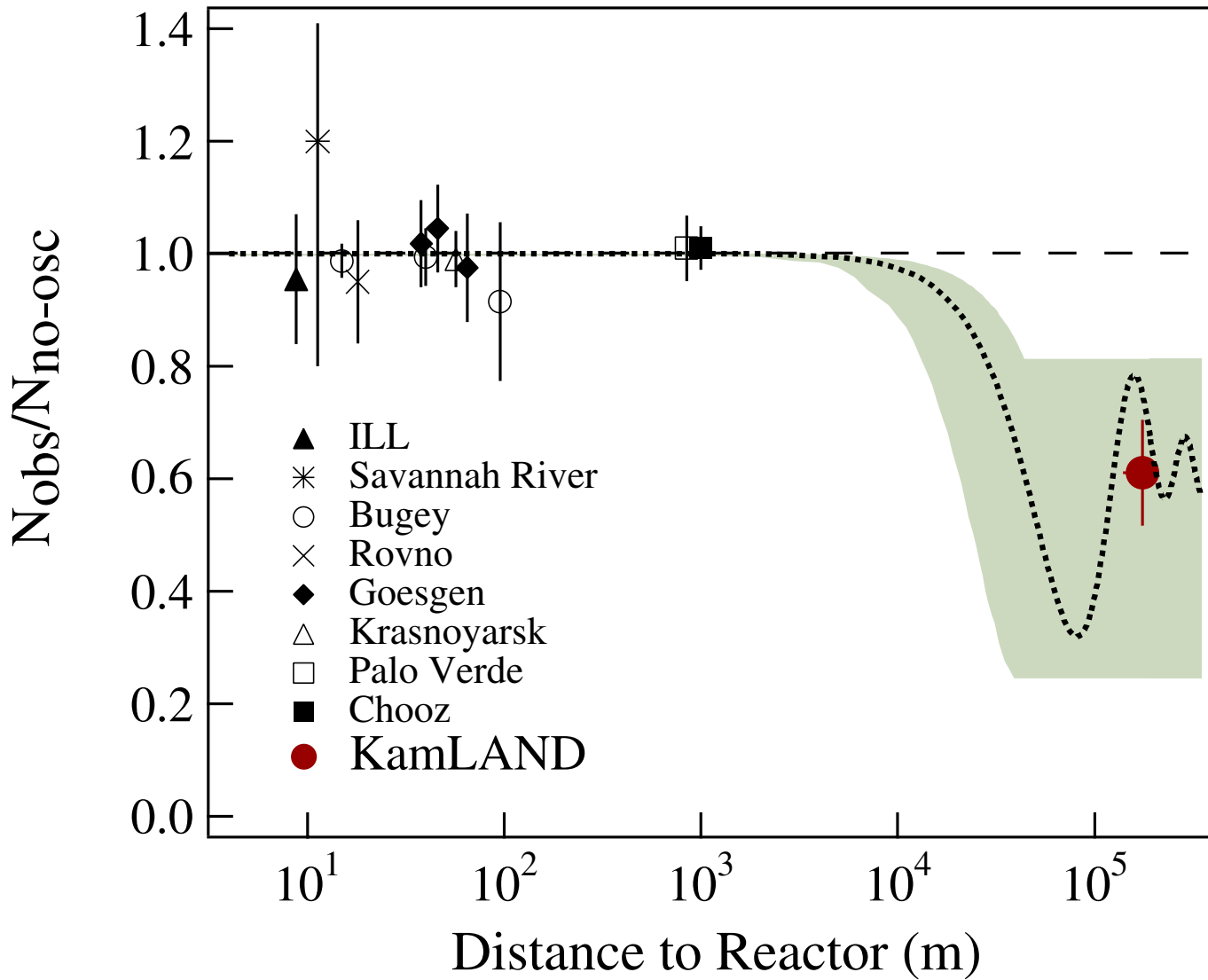




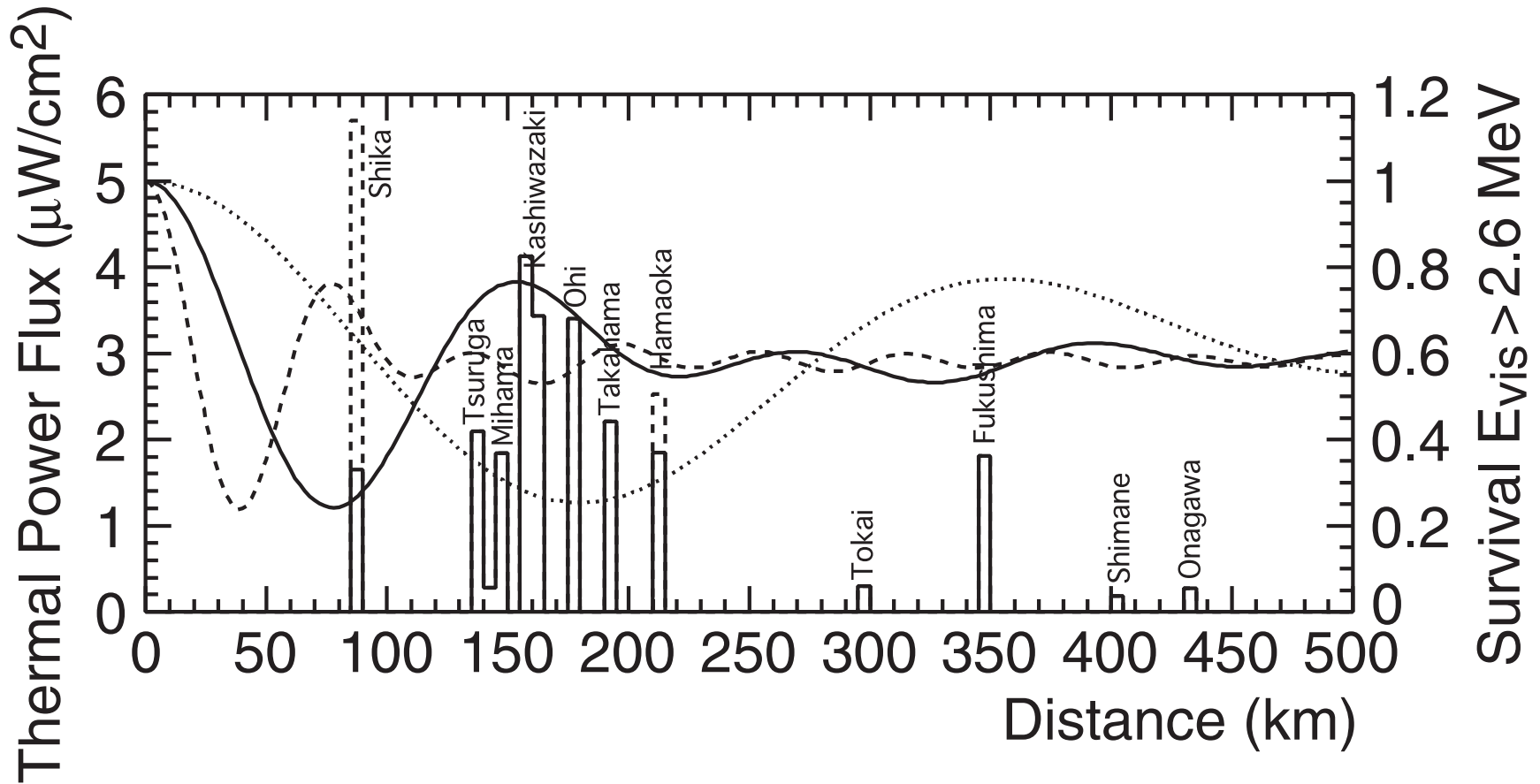
# Oszillationen solarer Neutrinos: Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{ee}$

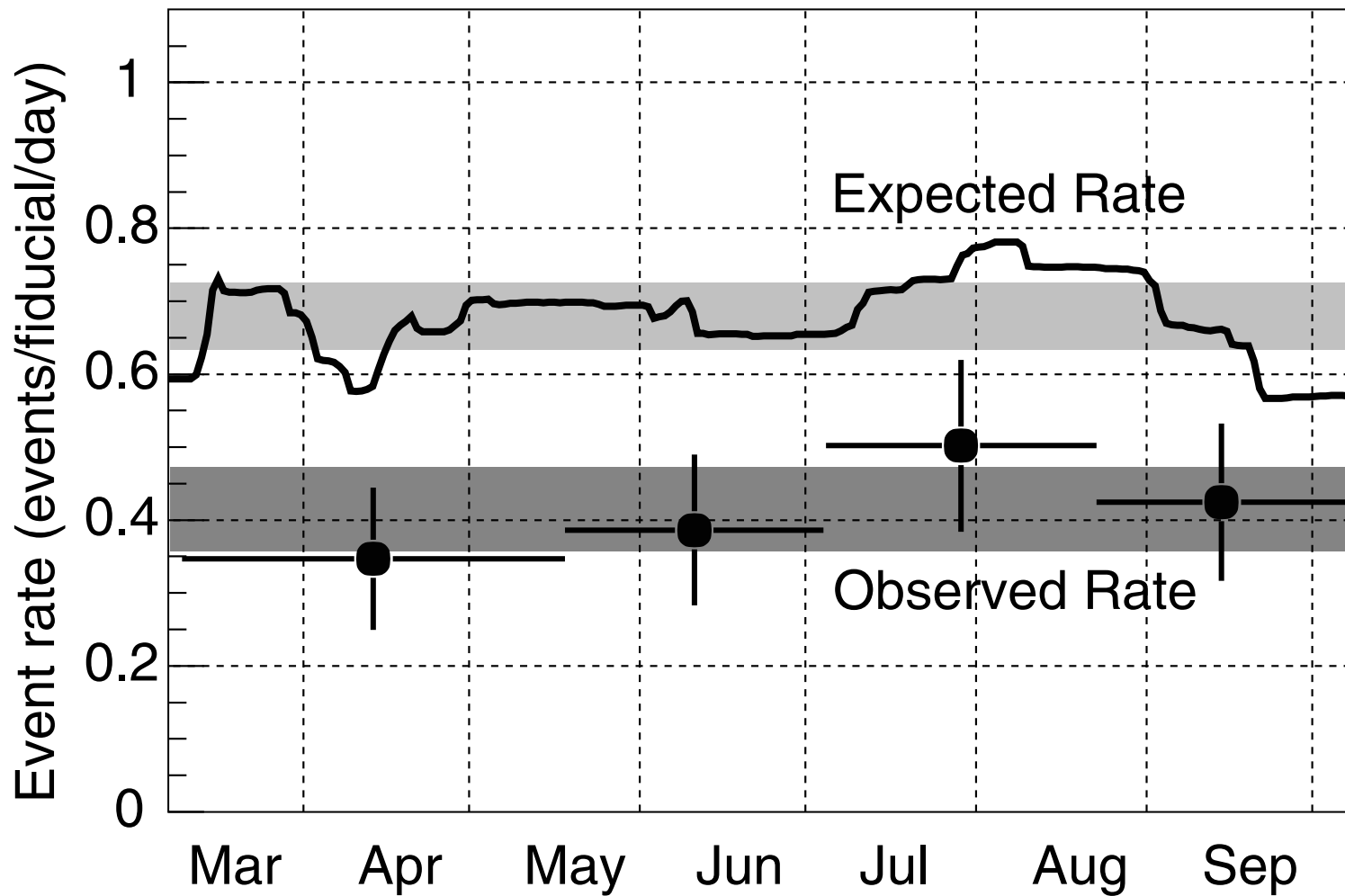


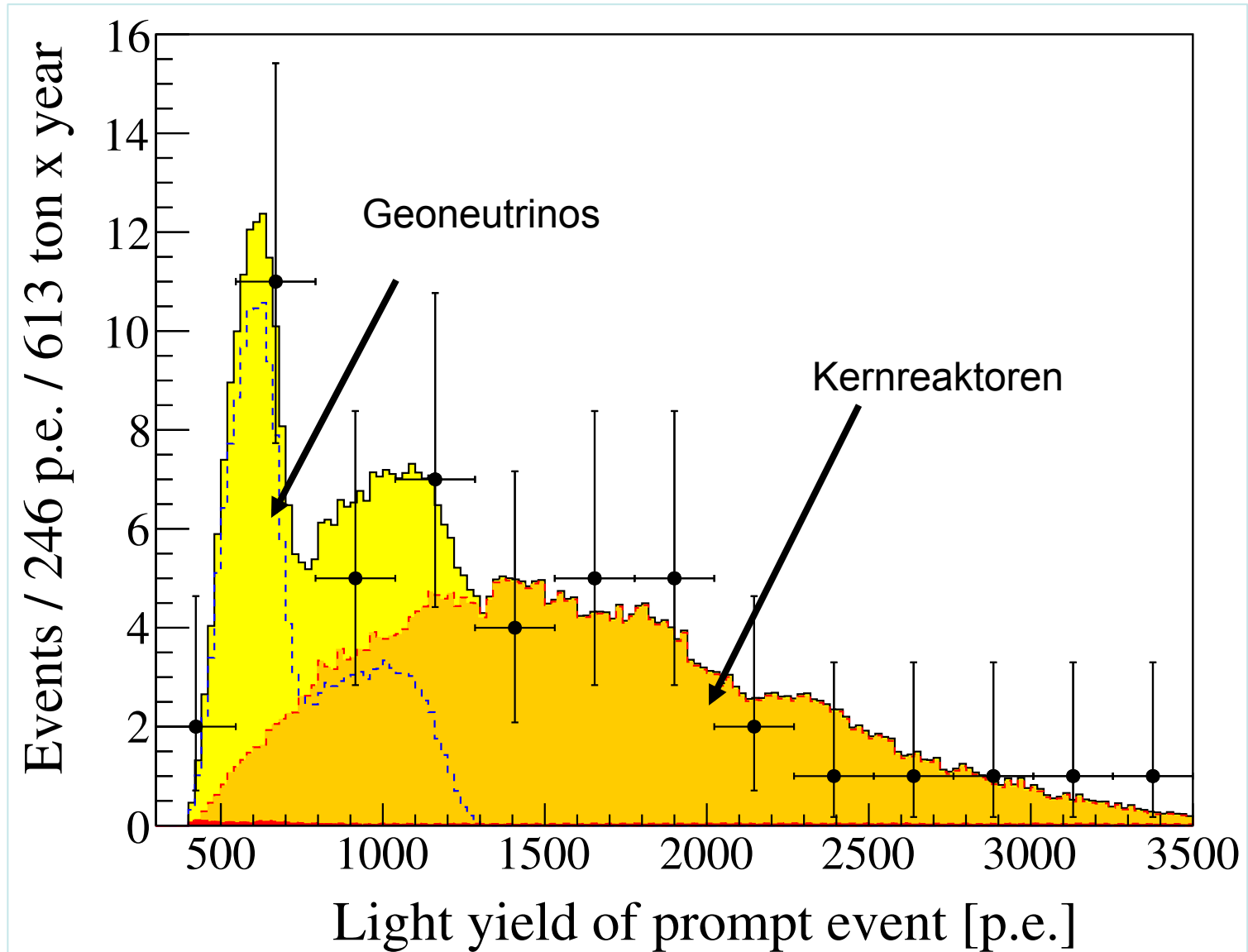
# Oszillationen von Reaktor-Neutrinos



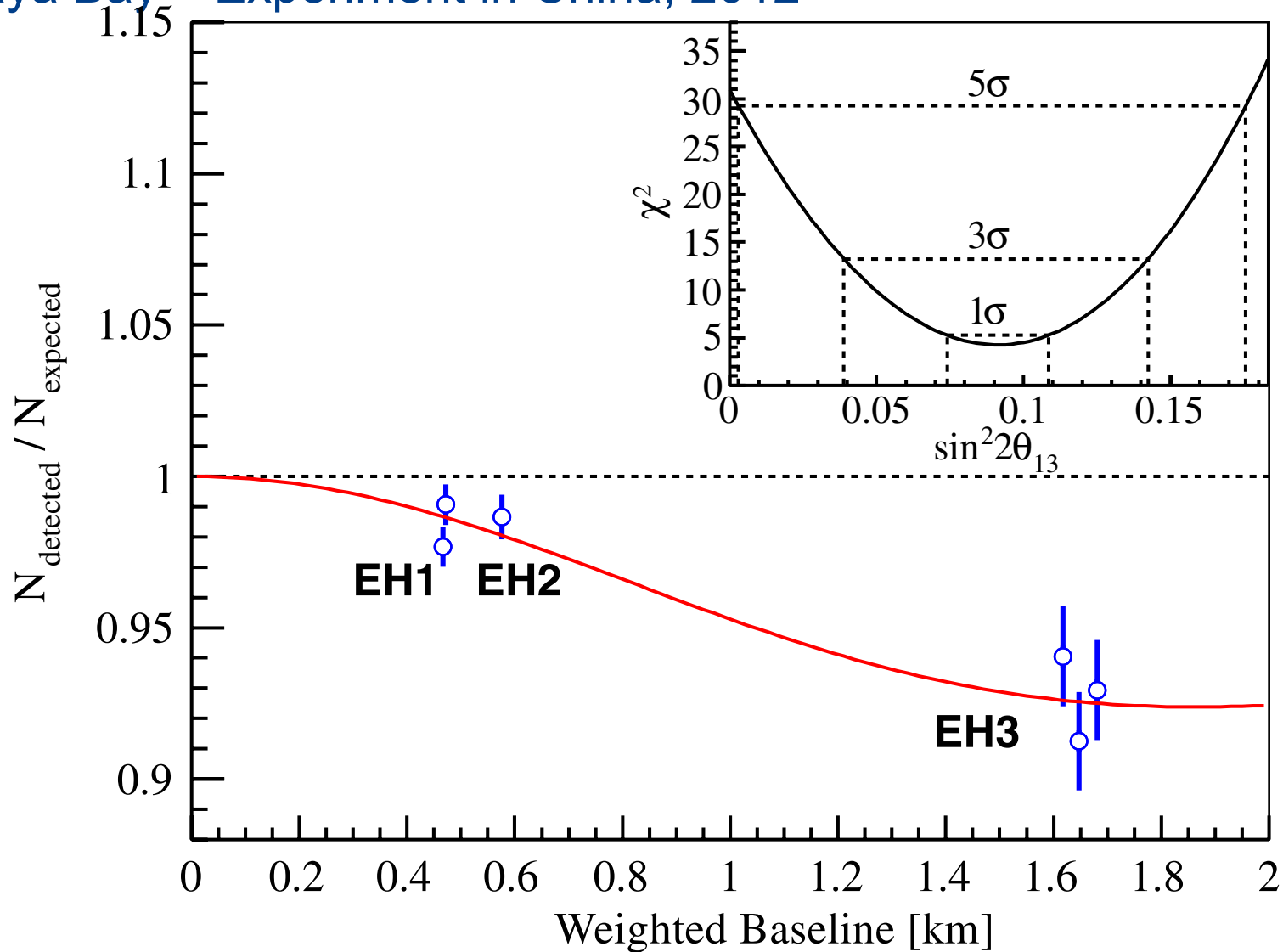
# Oszillationen von Reaktor-Neutrinos, KamLAND Japan (2003)



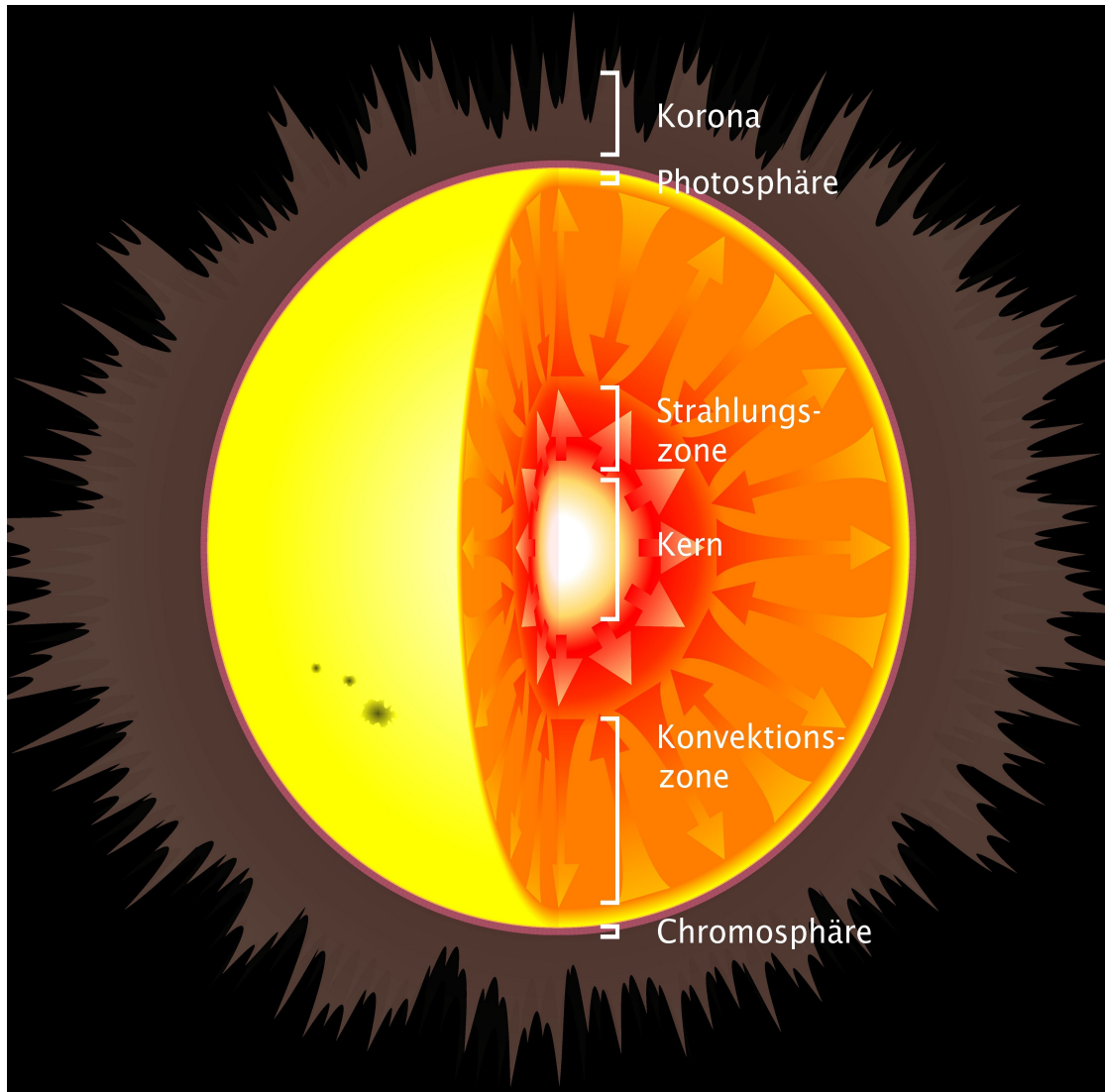




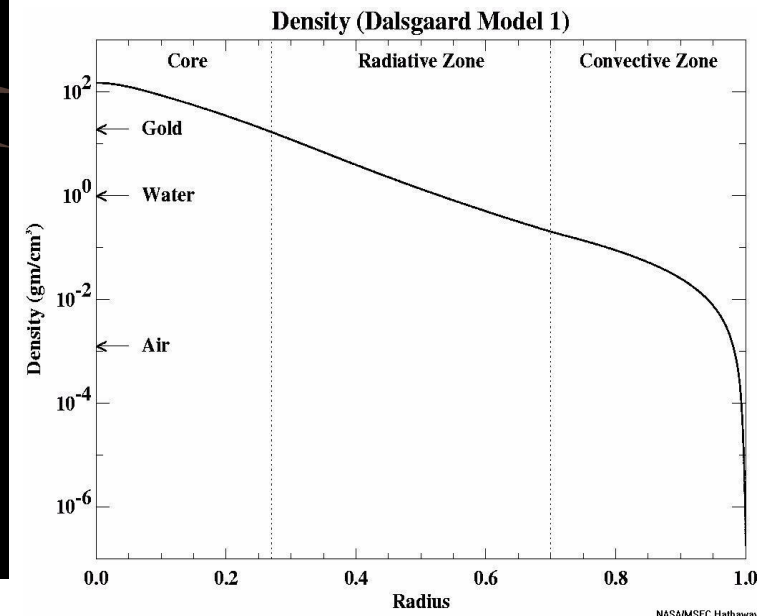
# Reaktorneutrino-Oszillationen: Daya Bay – Experiment in China, 2012



# Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



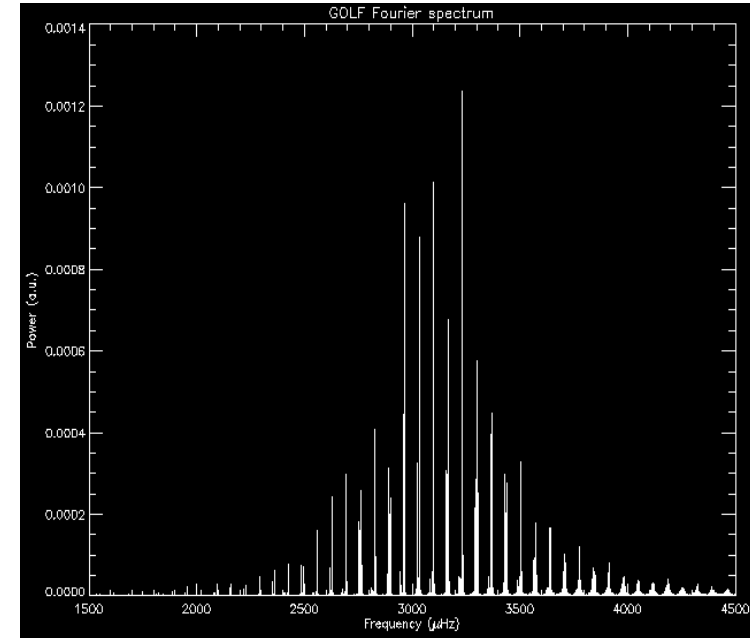
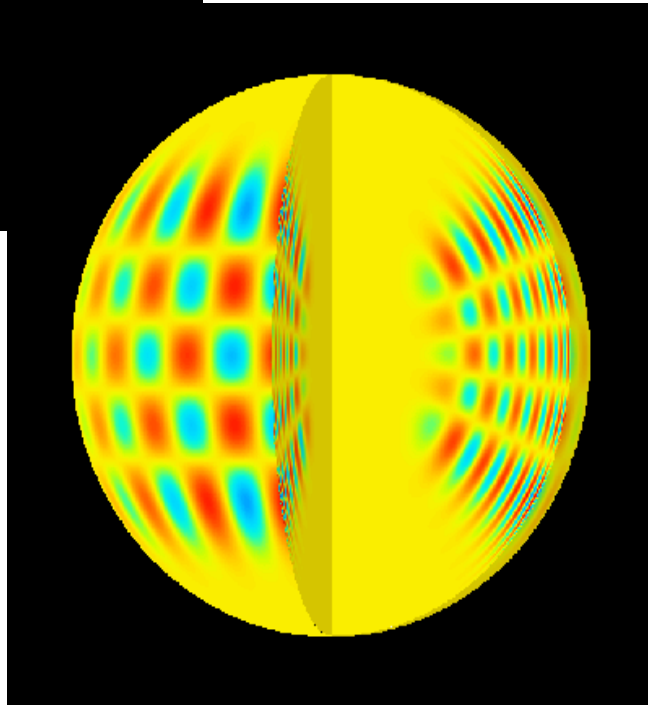
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre  
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone  
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern  
Neutrinos



# Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



Satellit "SoHo"  
(Solar and  
Heliospheric  
Observatory)



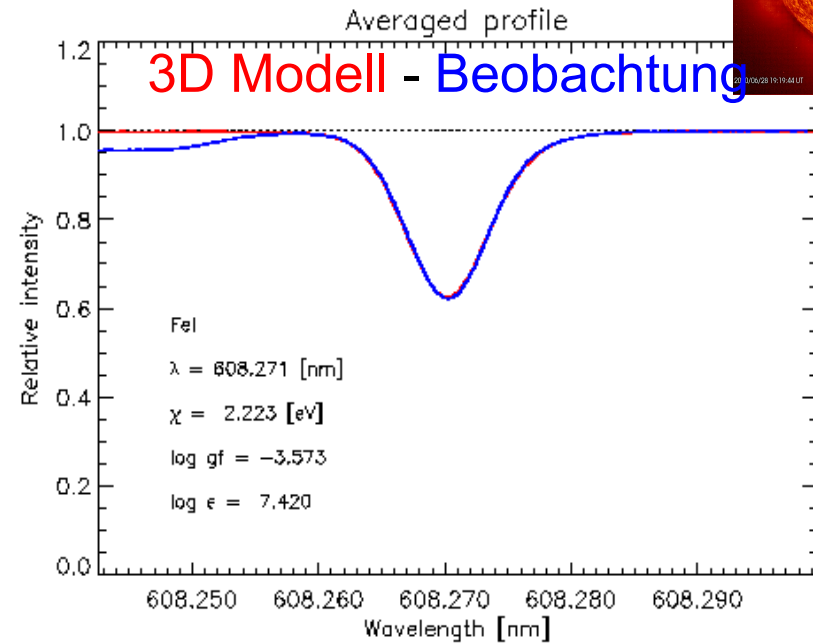
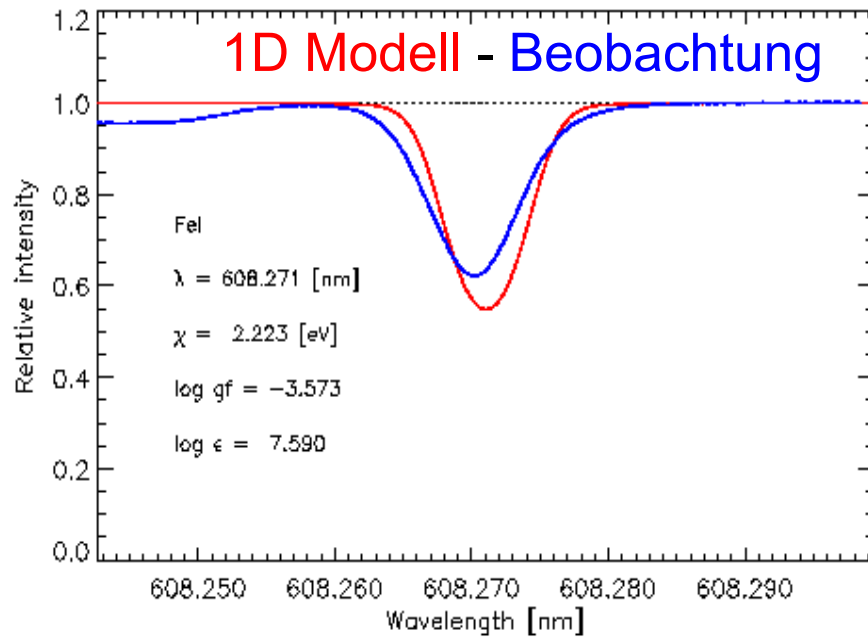
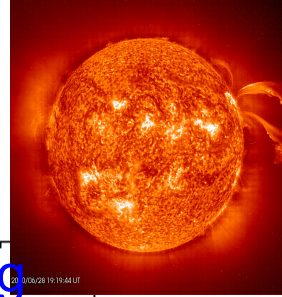
Fourierspektrum des  
GOLF-Instruments auf  
SoHo

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)



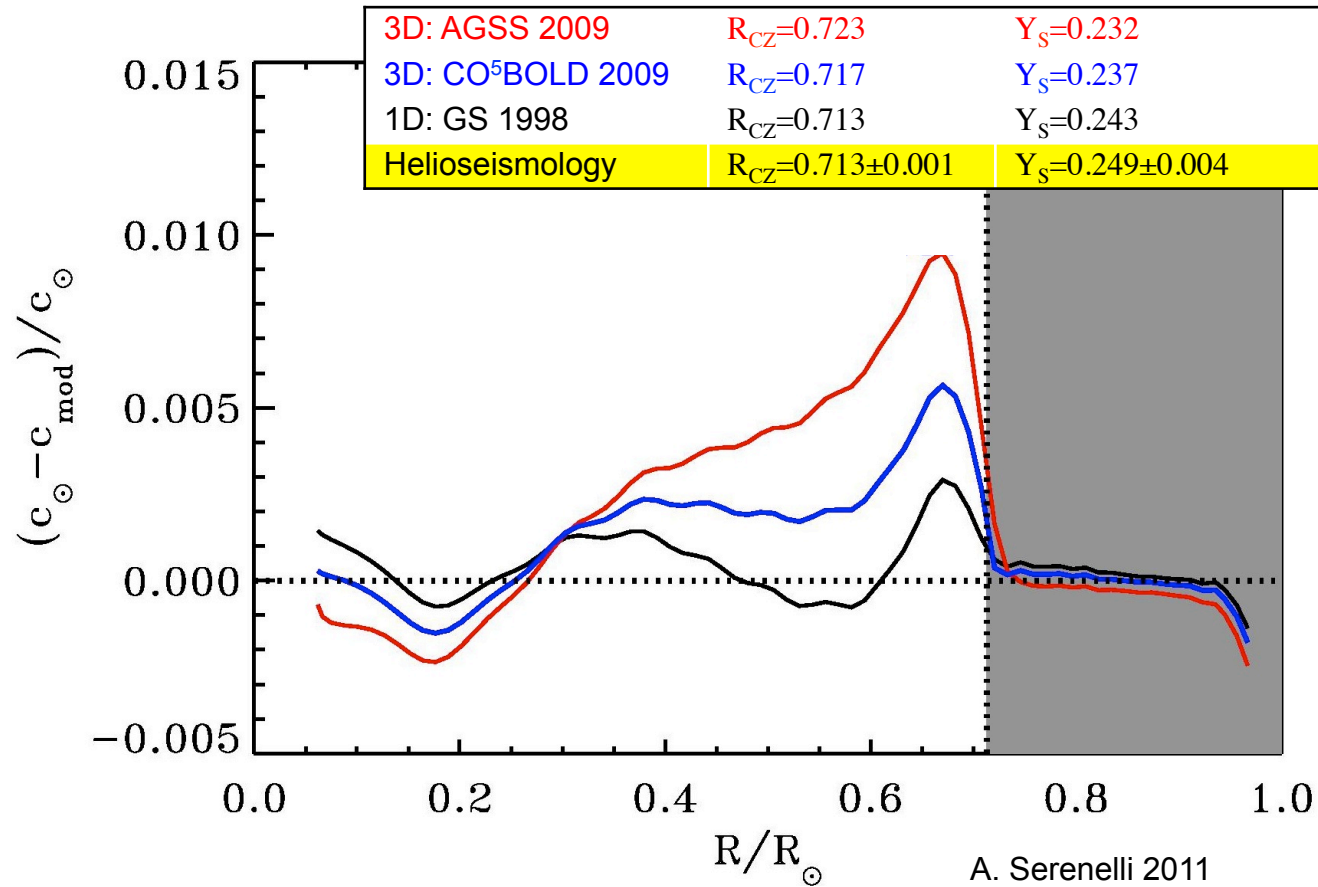
# Das solare Häufigkeitsproblem:

## Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

Standard-Sonnenmodell,  
gerechnet mit  
verschiedenen  
Elementhäufigkeiten.

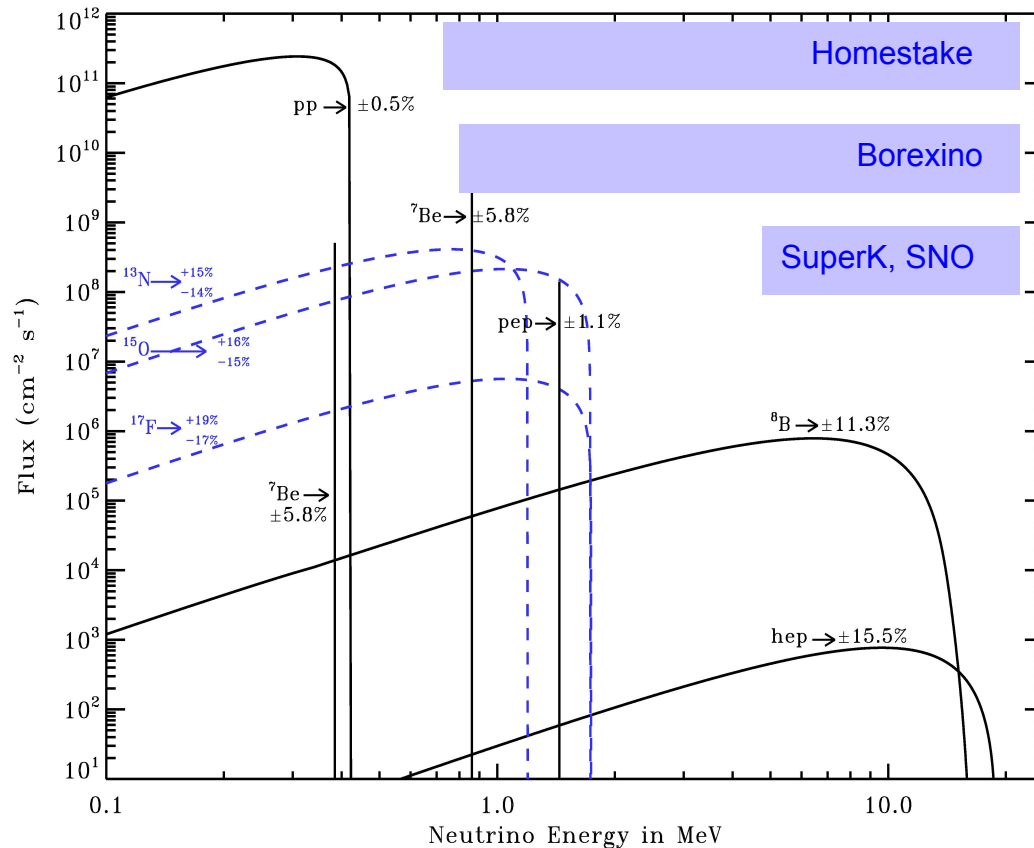
Observable, die  
helioseismologisch  
überprüft werden können:

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



# Was kann die dritte Observable, also Neutrinos, beitragen?

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

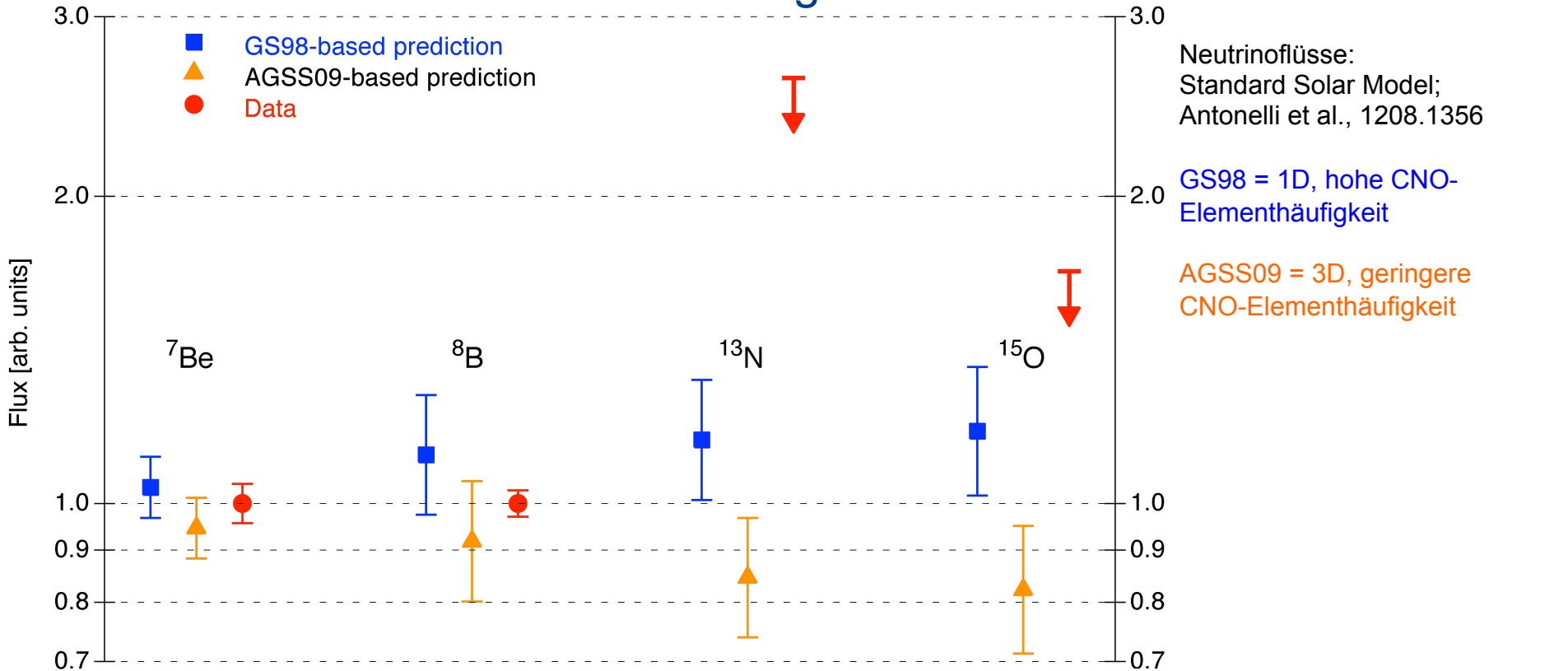


Vorhergesagte Neutrinoflüsse aus dem Standard-Sonnenmodell:

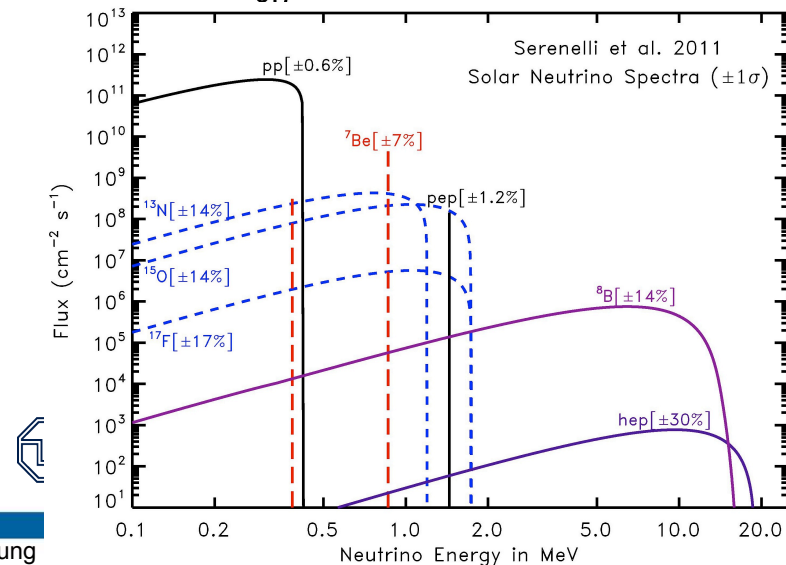
- **GS 1998**  
Alte (<2005) Elementhäufigkeiten  
Konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 5.58$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 2.23$
- **AGS 2009**  
Neue (>2005) Elementhäufigkeiten  
Nicht konsistent mit Helioseismologie  
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.59$        $\Phi(^{15}\text{O}) = 1.56$

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

# 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



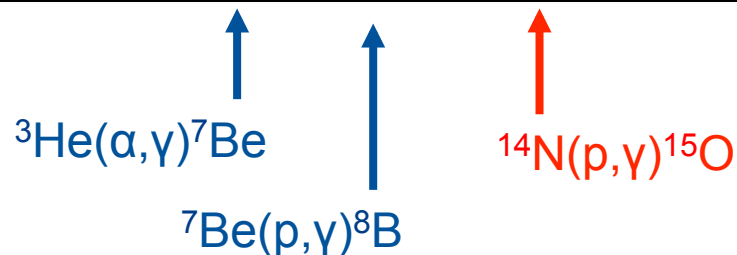
# Woher kommen die großen Fehlerbalken in der Vorhersage?

Nuclear reaction rates

	S <sub>11</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>34</sub>	S <sub>17</sub>	S <sub>1,14</sub>	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
<sup>7</sup> Be	1.1	2.2	4.7	0.0	0.0	3.2	1.9
<sup>8</sup> B	2.7	2.1	4.5	7.7	0.0	6.9	4.0
<sup>13</sup> N	2.1	0.1	0.3	0.0	5.1	3.6	4.9
<sup>15</sup> O	2.9	0.1	0.2	0.0	7.2	5.2	5.7
<sup>17</sup> 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





# 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

