

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)**

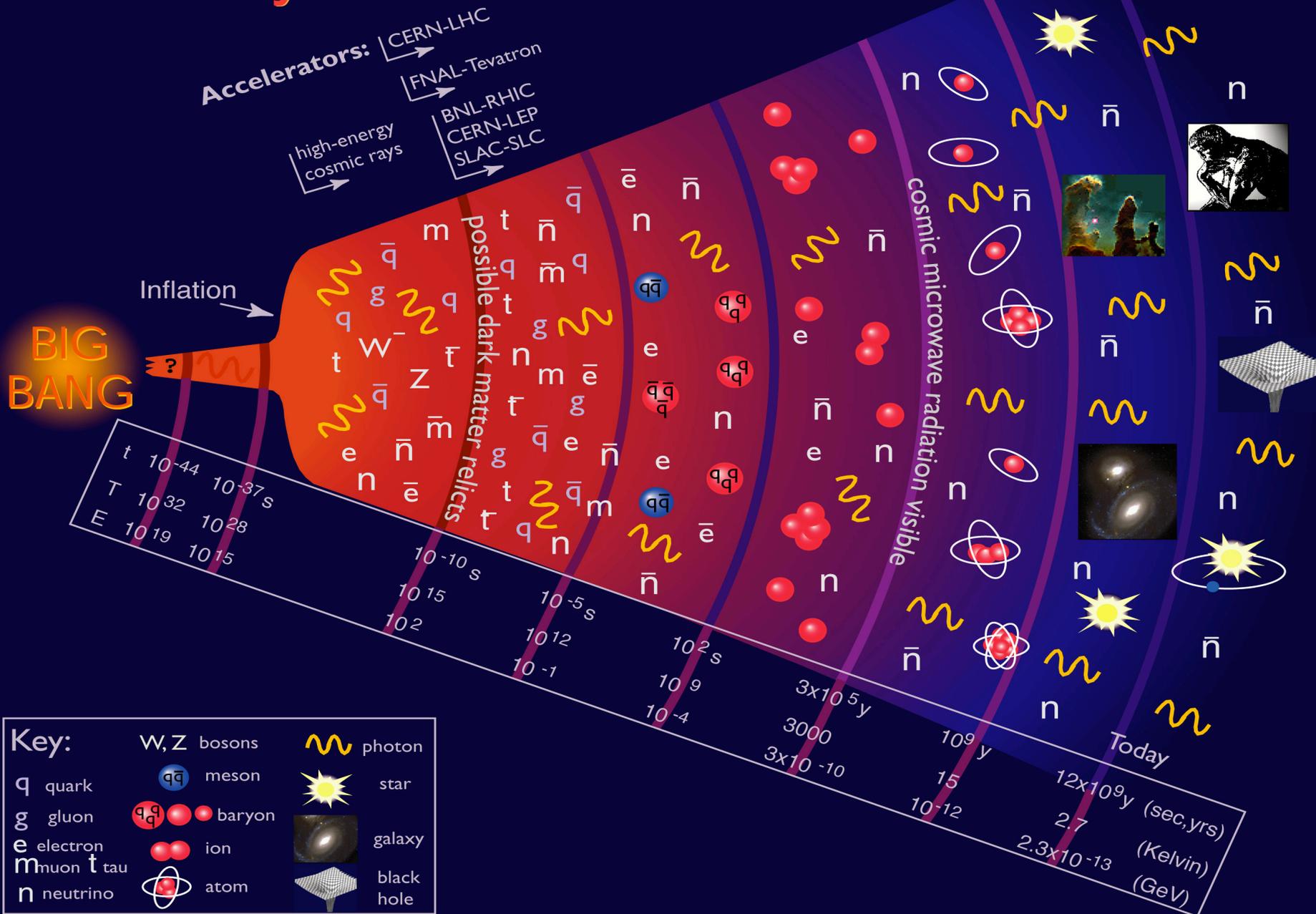
12. Vorlesung, 02.07.2012



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

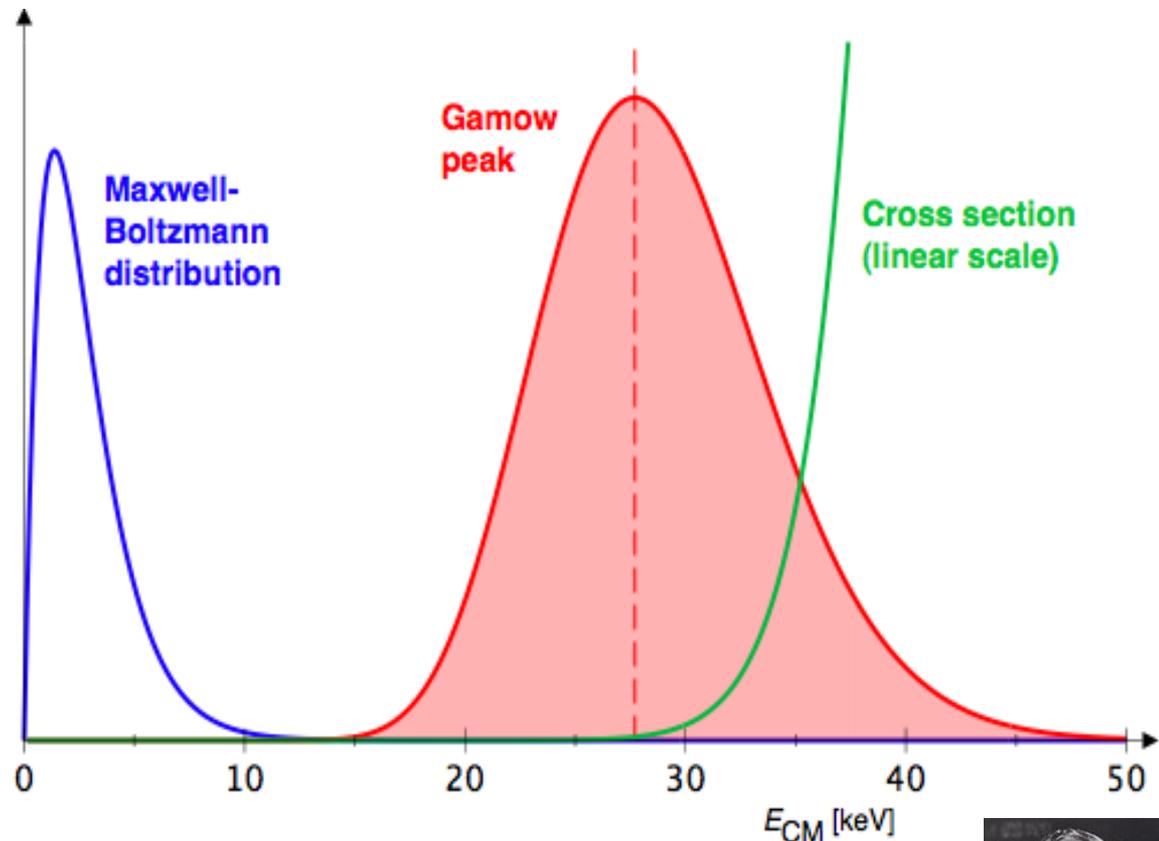


History of the Universe



Der Grund für die Temperaturabhängigkeit der Kern-Reaktionsrate (Wdh.)

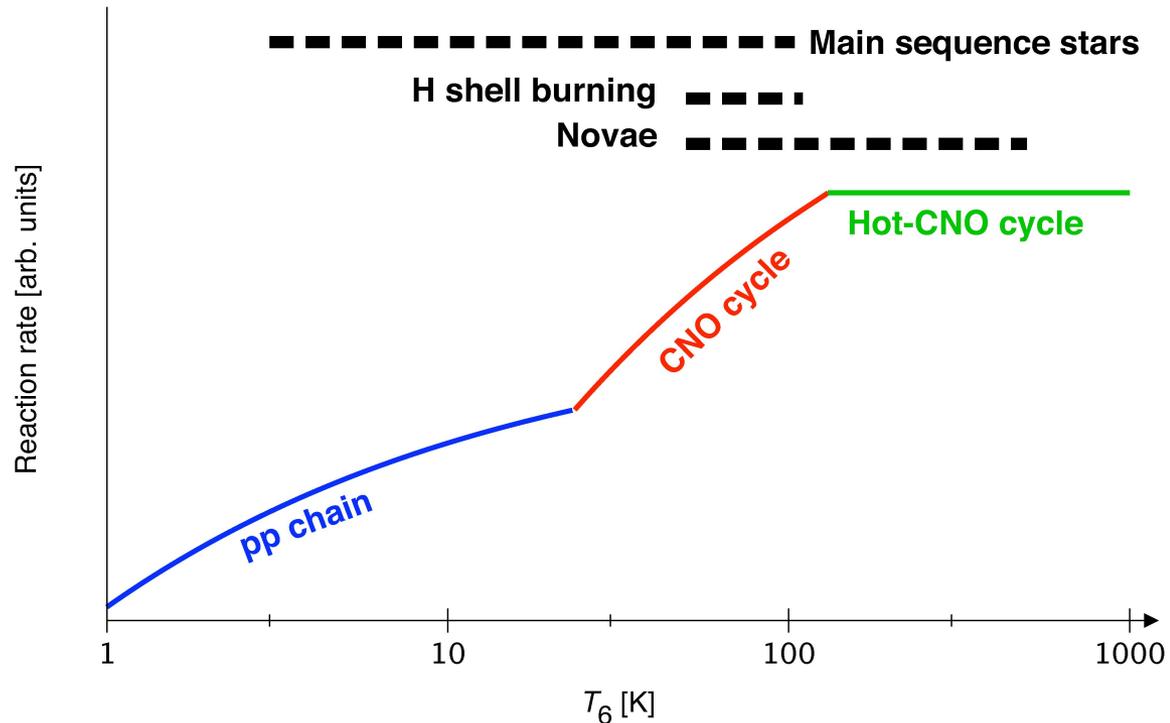
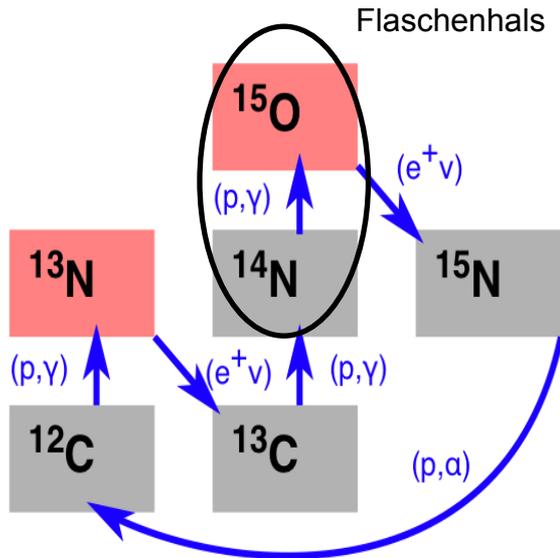
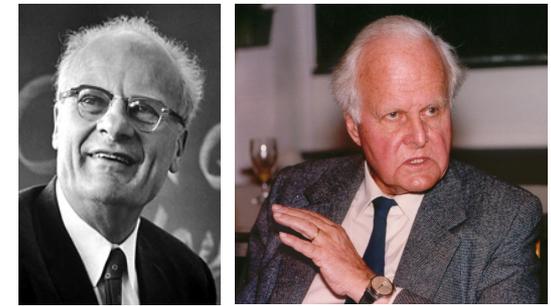
- Das Maximum der thermischen Verteilung (Maxwell-Boltzmann-Verteilung) liegt bei einigen keV, deutlich unter der Coulombschwelle (MeV)
- Die Anzahl der stattfindenden Reaktionen wird bestimmt durch die Faltung zweier stark energieabhängiger Funktionen:
 1. Maxwell-Boltzmann-Verteilung
 2. Wirkungsquerschnitt (bestimmt durch die Wahrscheinlichkeit für das Durchtunnel der Coulombbarriere)
- Die Fläche unter dem Integral gibt die Rate an tatsächlich stattfindenden Reaktionen an.



Entdecker dieses Zusammenhangs:
George Gamow (1904-1968)



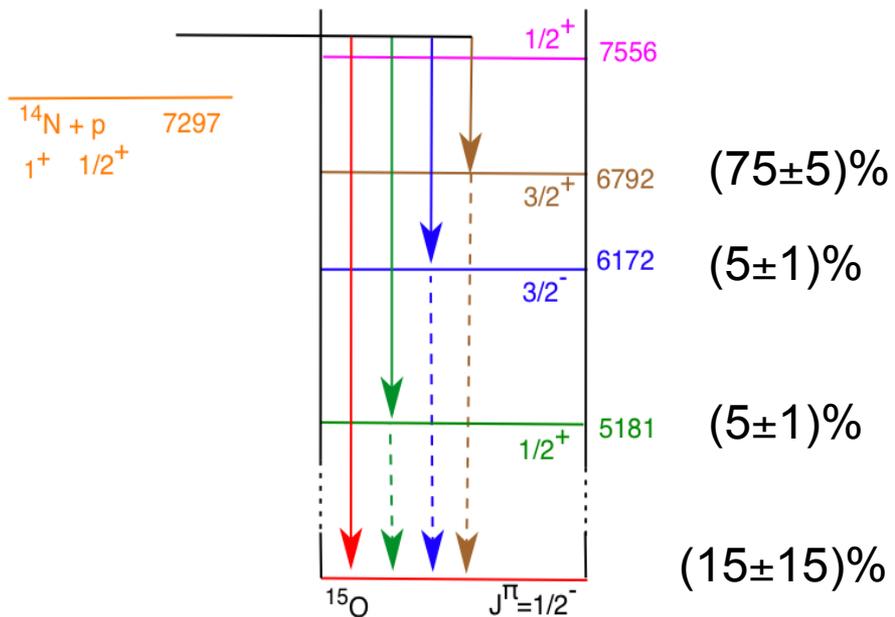
Wasserstoffbrennen: Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)



1938 postuliert

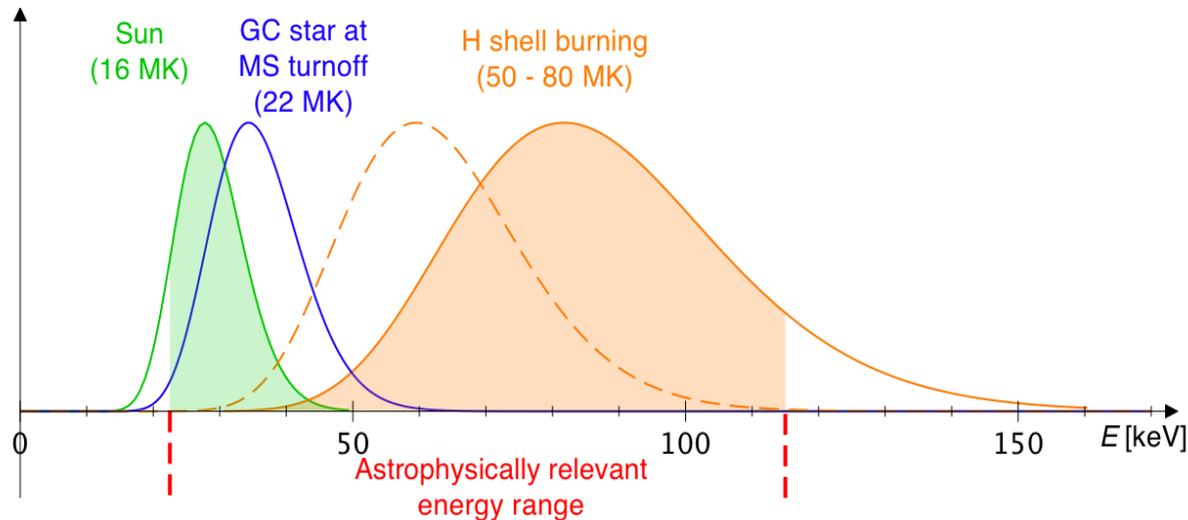
- Flaschenhals: $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$
- 0.8% der Energieproduktion der Sonne
- Bestimmung des Alters von Kugelsternhaufen

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

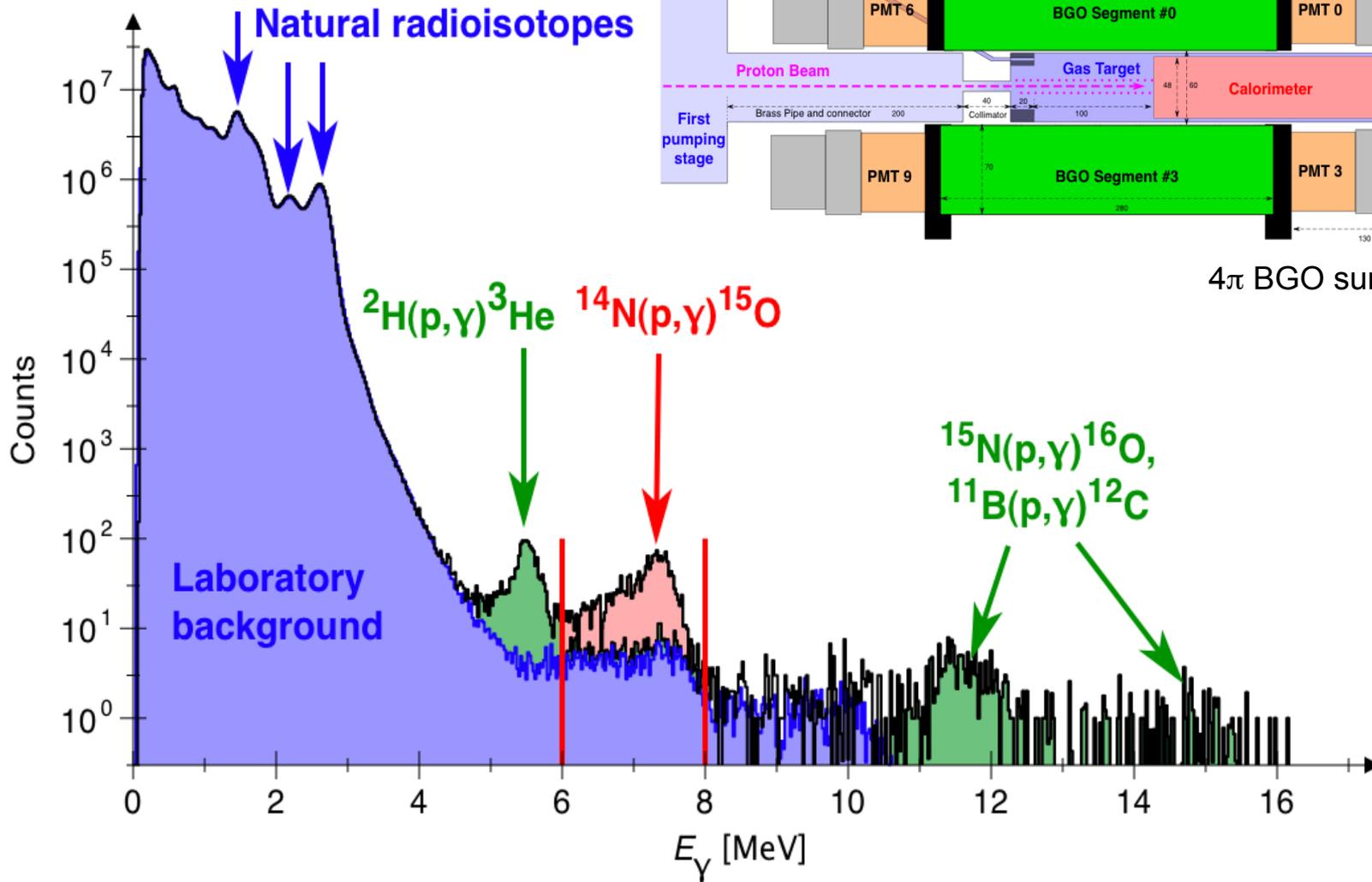


Zwei mögliche Ansätze für Experimente

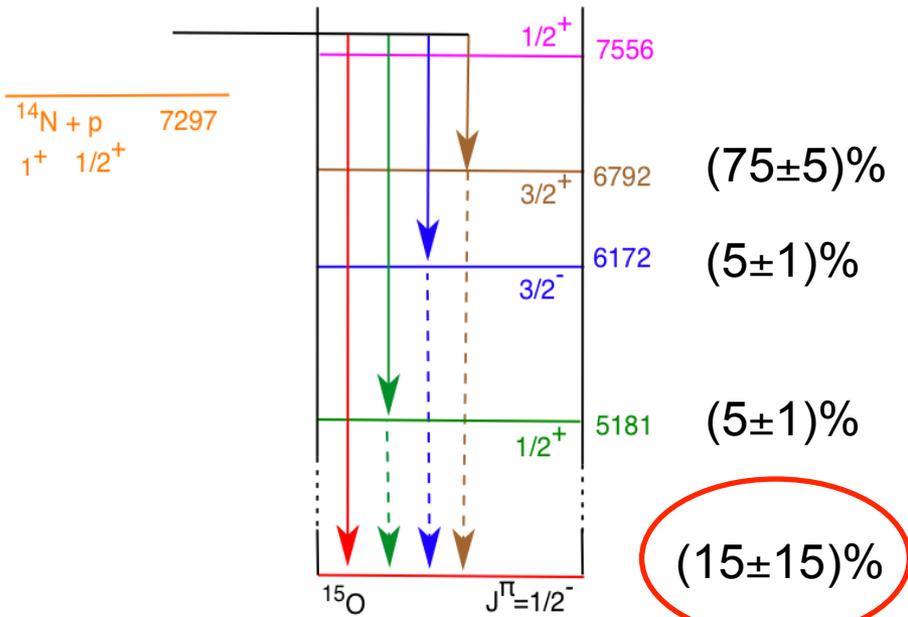
1. Untersuche Einfang in jeden Level im Einzelnen, dann extrapoliere.
2. Untersuche alle Levels gleichzeitig in einem Summendetektor, aber verzichte (gezwungenermaßen) auf die Extrapolation



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



Experiment zum CNO-Zyklus an LUNA 2008: Einfang in den Grundzustand von ^{15}O



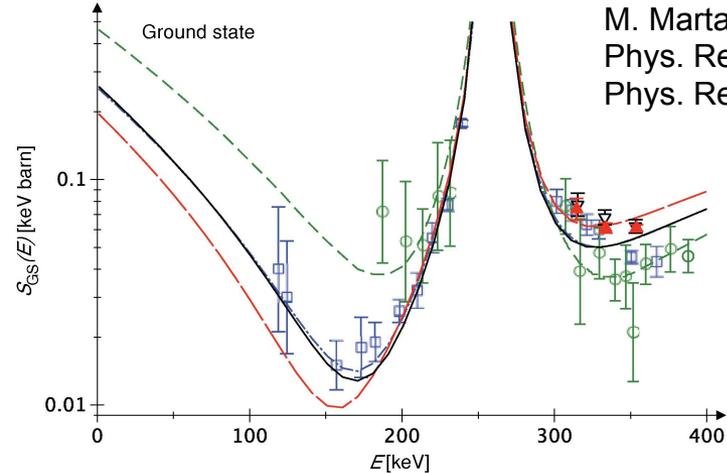
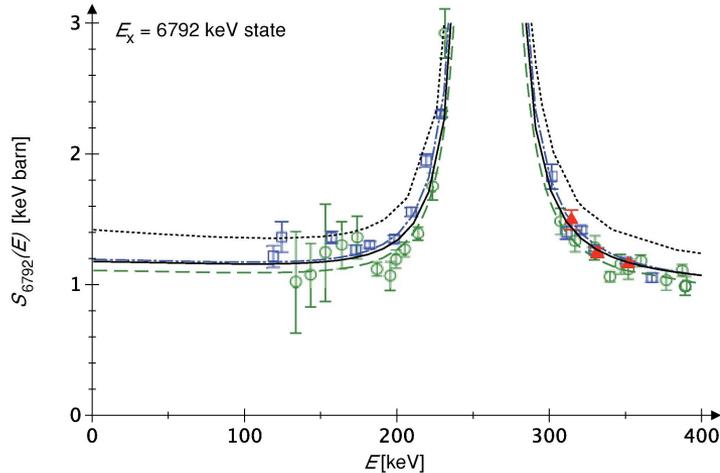
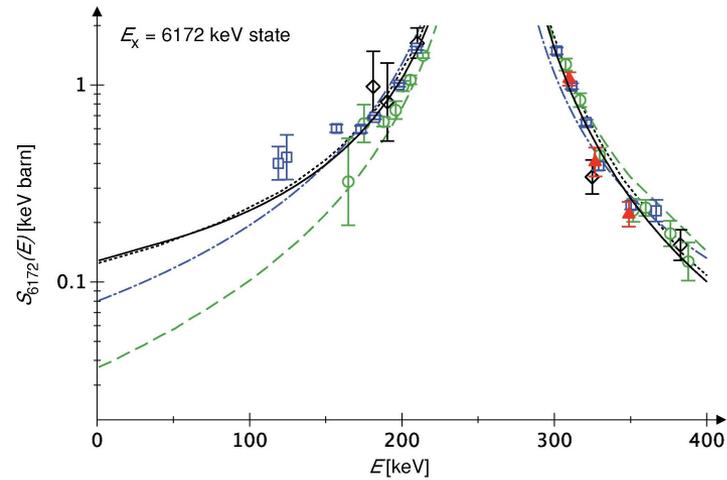
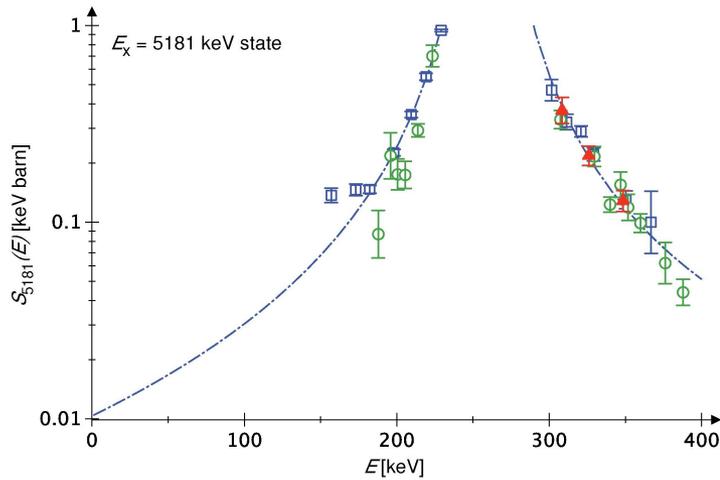
Das Problem (LUNA 2004, TUNL 2005):
Übergänge in angeregte Zustände können im Detektor eine Summationslinie erzeugen:
 $\gamma(800) + \gamma(6800) \longrightarrow \gamma(7600)$

Die Lösung (LUNA 2008, 2011):
 → Größerer Abstand Detektor-Target
 → Segmentierter Detektor

LUNA 2004:	0.25 ± 0.06 keV barn, 250% summing-in
TUNL 2005:	0.49 ± 0.08 keV barn, 240% summing-in

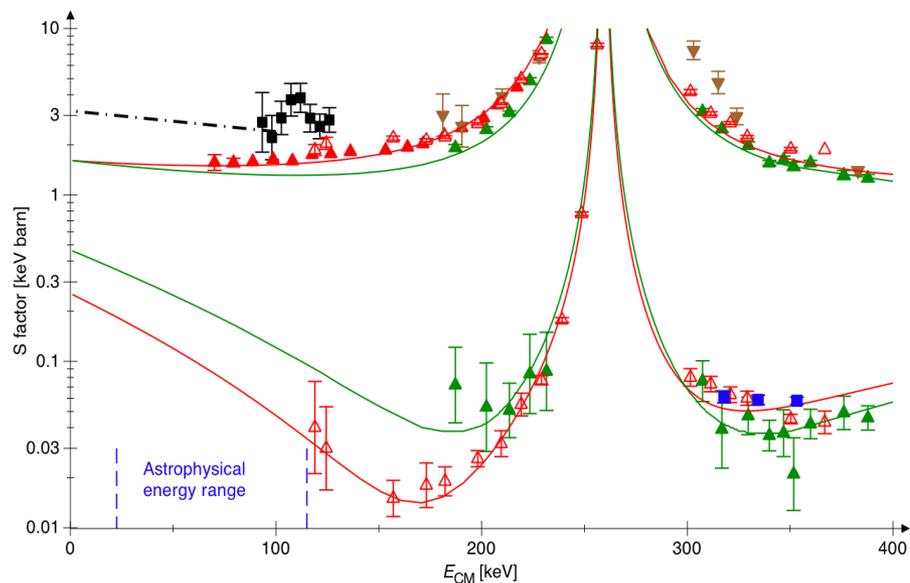
LUNA hat den $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ - Wirkungsquerschnitt halbiert!

Einfang in den...	NACRE Komp.1999	LUNA 2004	TUNL 2005	LUNA 2008, 2011
...Grundzustand von ^{15}O	1.55 ± 0.34	0.25 ± 0.06	0.49 ± 0.08	0.27 ± 0.05
...angeregte Zustände in ^{15}O	1.65 ± 0.05	1.36 ± 0.05	1.27 ± 0.05	(1.39 ± 0.05)
S(0) in keV barn	3.2 ± 0.5 (tot)	1.6 ± 0.2 (tot)	1.8 ± 0.2 (tot)	1.66 ± 0.12 (tot)



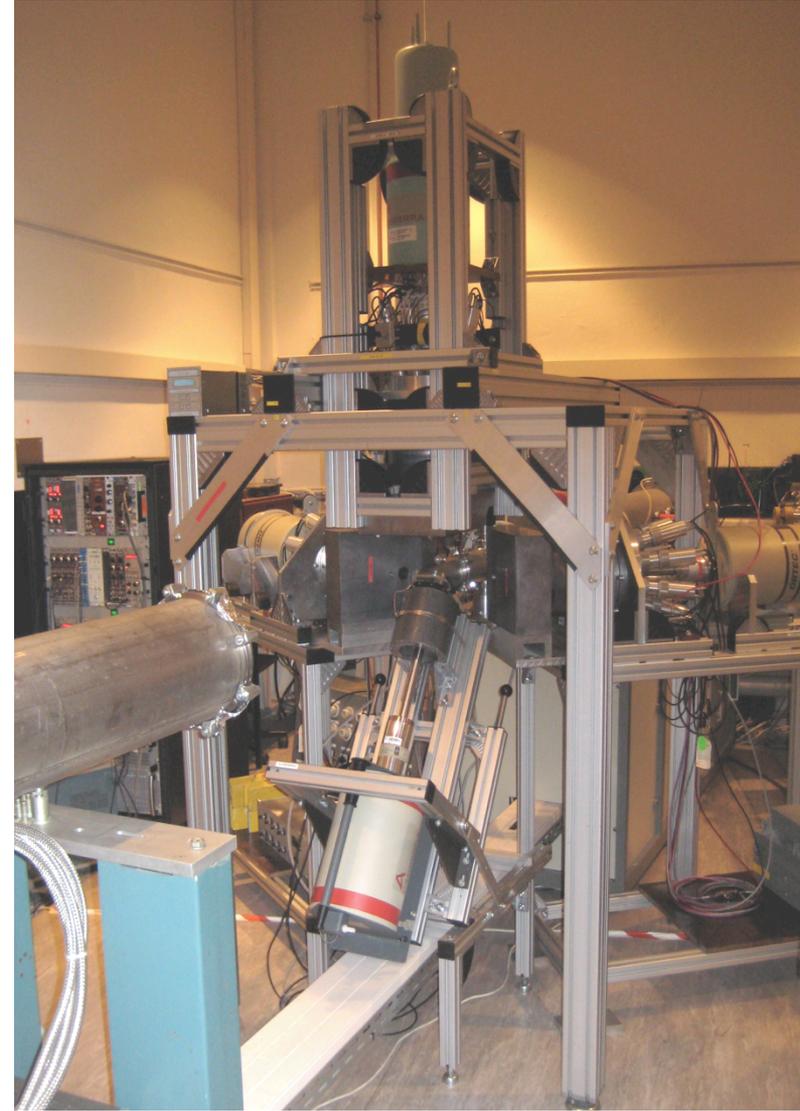
M. Marta et al.,
 Phys. Rev. C 78, 022802 (R) (2008)
 Phys. Rev. C 83, 045804 (2011)

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

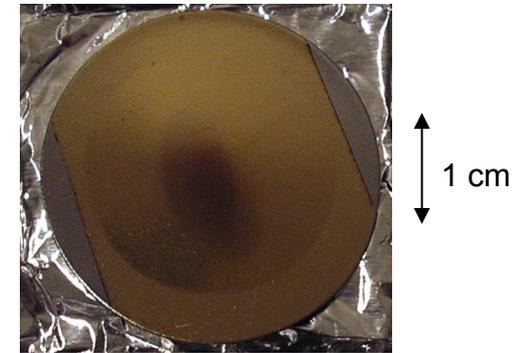
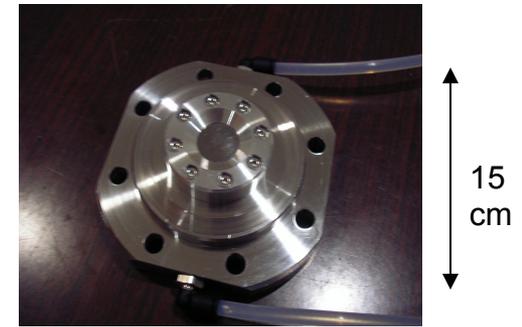
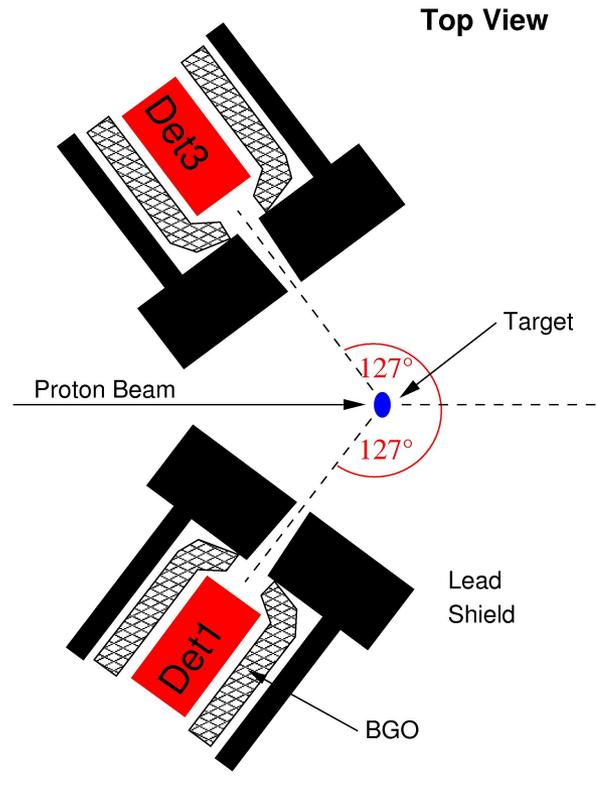
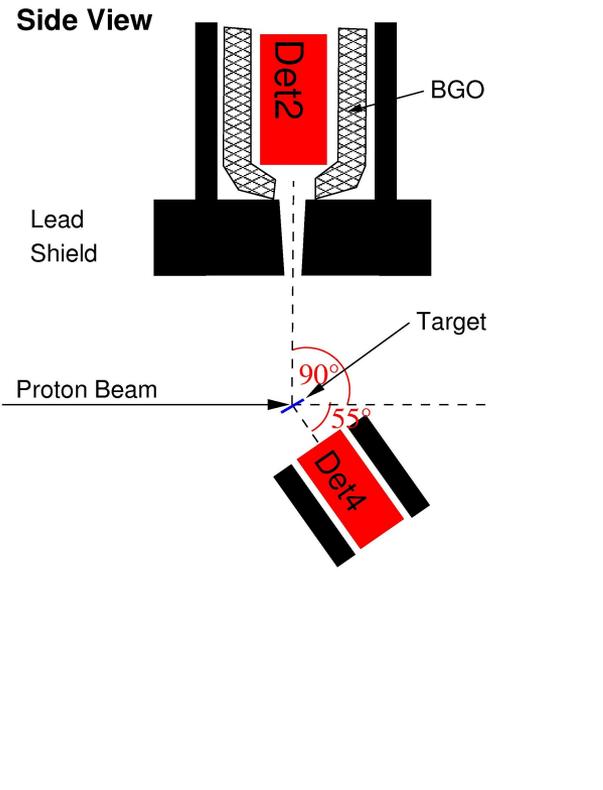
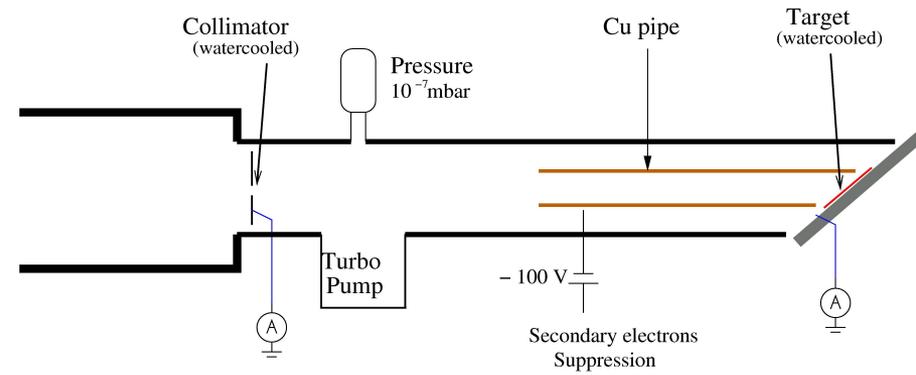


1. Unabhängige untere Schranke für das Alter des Universums: 14 ± 2 Ga.
2. Es ist möglich, den Stickstoffgehalt im Kern der Sonne über die emittierten CNO-Neutrinos zu bestimmen.

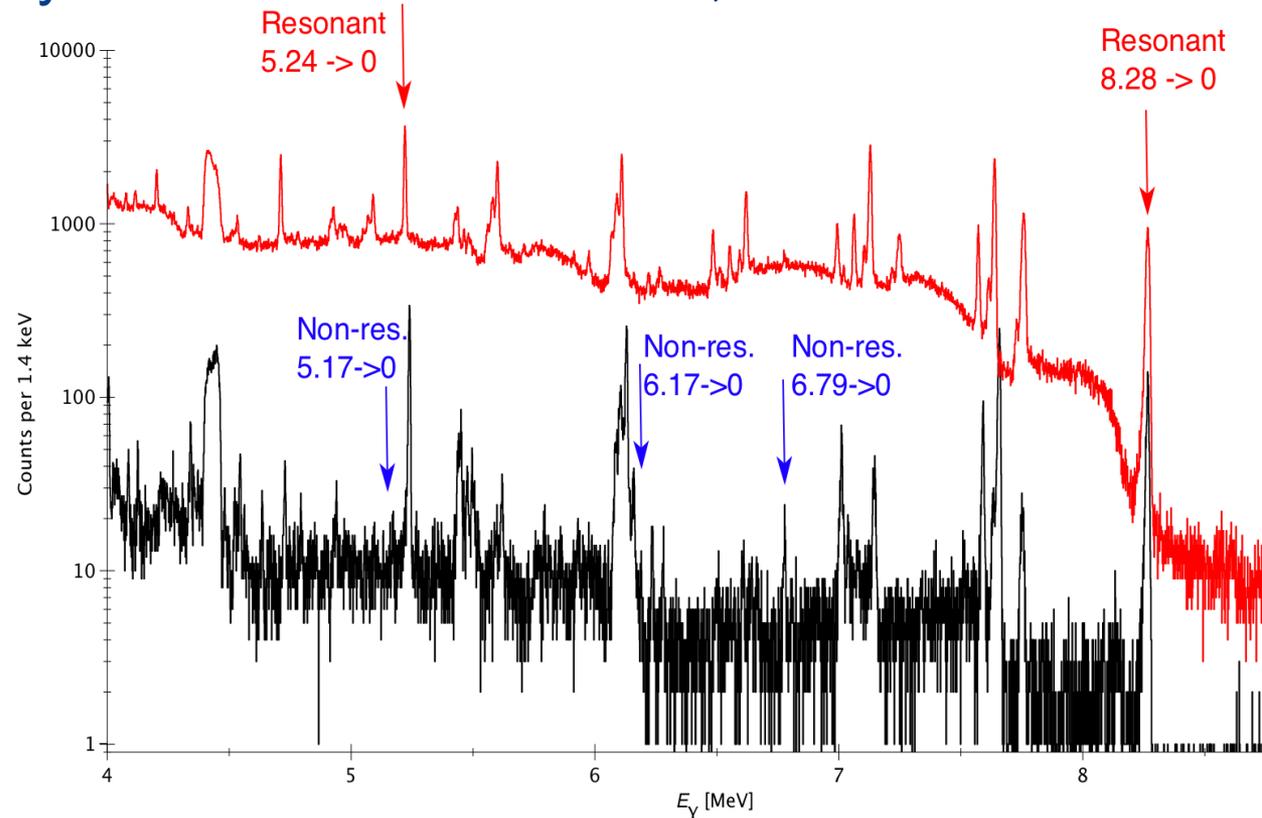
Versuchsaufbau am HZDR Tandetron, Dresden



Detektoren und Targets



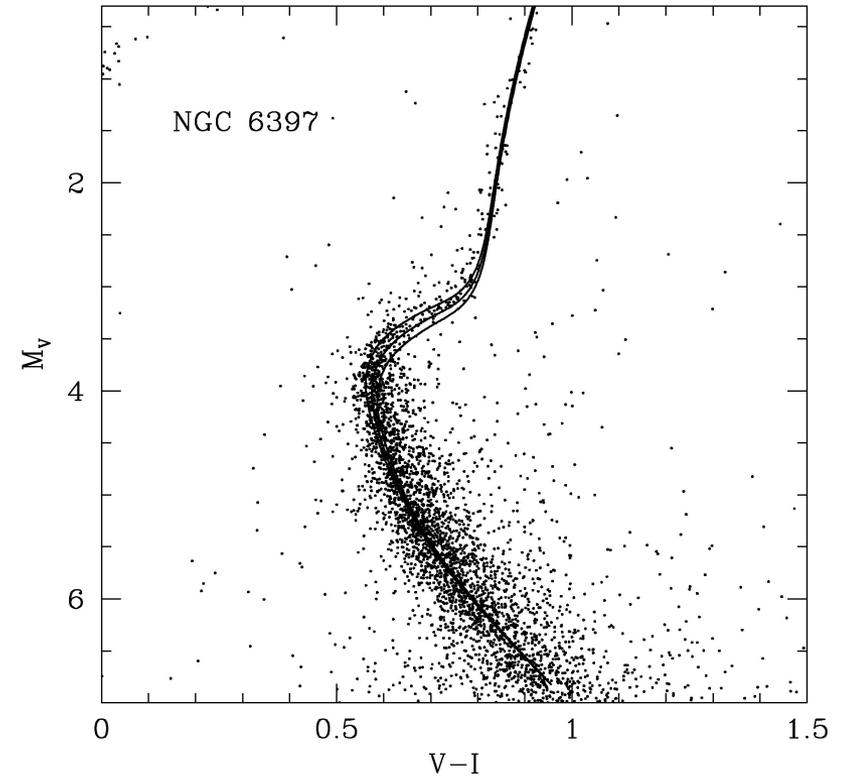
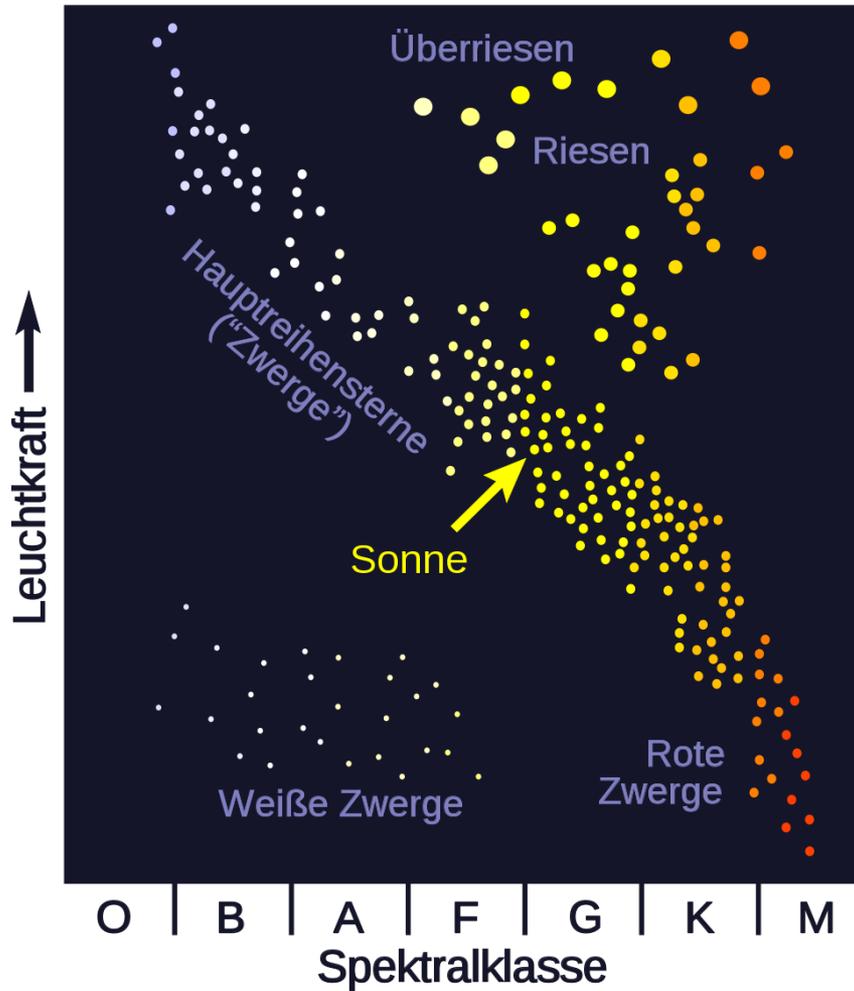
Experiment zum CNO-Zyklus am 3 MV Tandetron, Rossendorf



Reaction	Literature [23, 49]		Present		Literature
	E_p [keV]	Γ_{lab} [keV]	$\omega\gamma_i/\omega\gamma_{278}$	$\omega\gamma$ [eV]	$\omega\gamma$ [eV]
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$	278	1.0	$\stackrel{!}{=}1$	Reference	0.0131 ± 0.0006 [21] ^a
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$	1058	3.9^b	27.5 ± 0.9	0.360 ± 0.020	0.31 ± 0.04 [22]
$^{15}\text{N}(p,\alpha\gamma)^{12}\text{C}$	897	1.57	$(2.77 \pm 0.11) \cdot 10^4$	362 ± 22	293 ± 38 [59]
$^{15}\text{N}(p,\alpha\gamma)^{12}\text{C}$	430	0.1	$(1.73 \pm 0.08) \cdot 10^3$	22.7 ± 1.5	21.1 ± 1.4 [44]

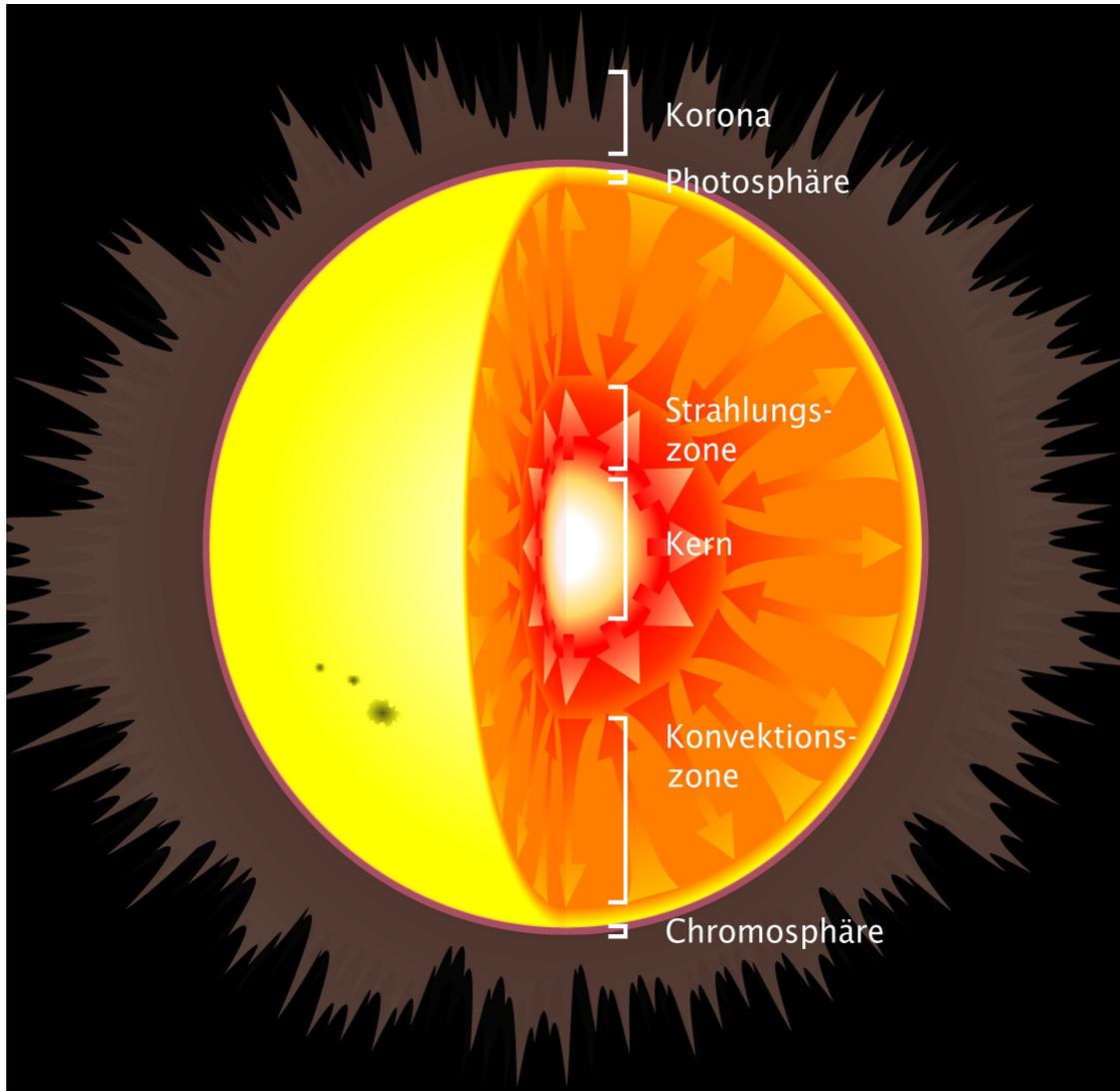
M. Marta et al.,
Phys. Rev. C 81, 055807 (2010)

Altersbestimmung sehr alter Sterne (in Kugelsternhaufen)

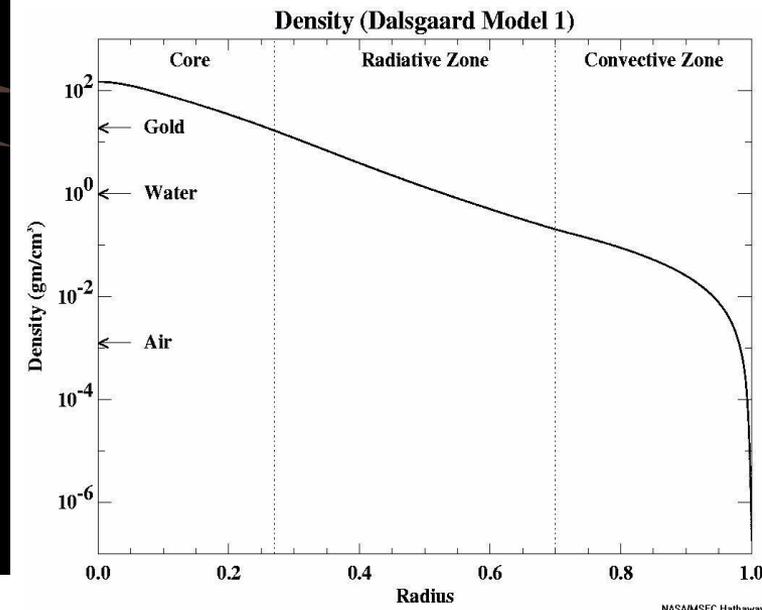


→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe

Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



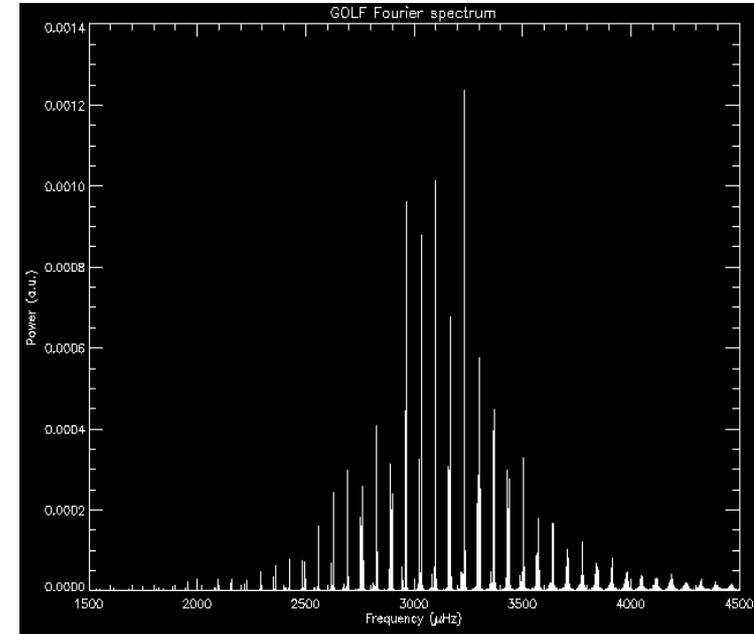
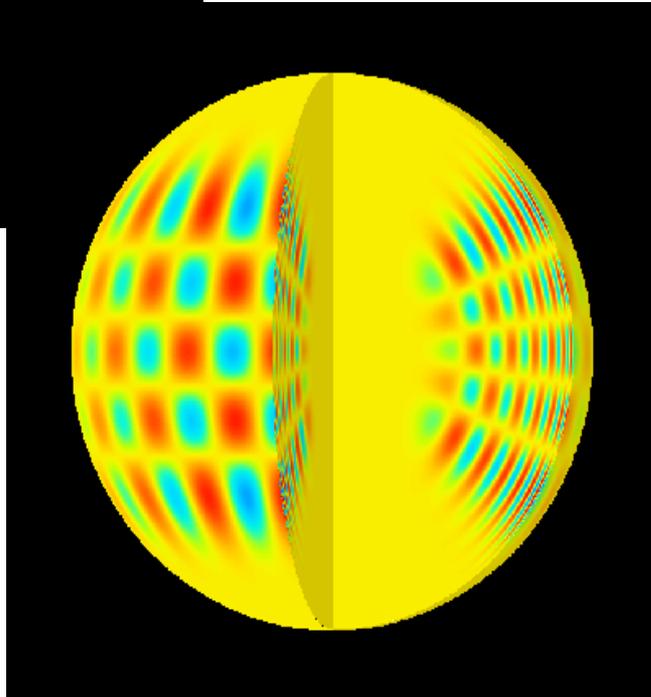
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern
Neutrinos



Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



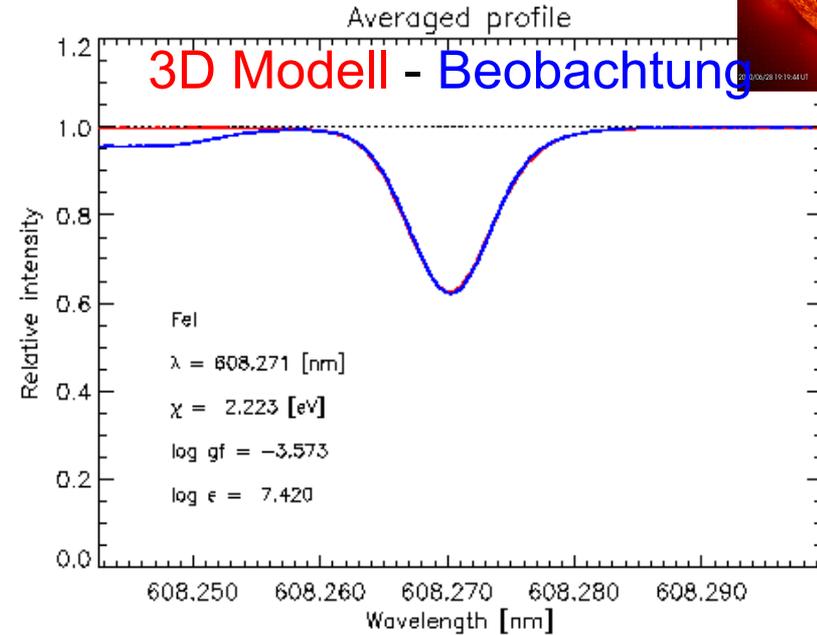
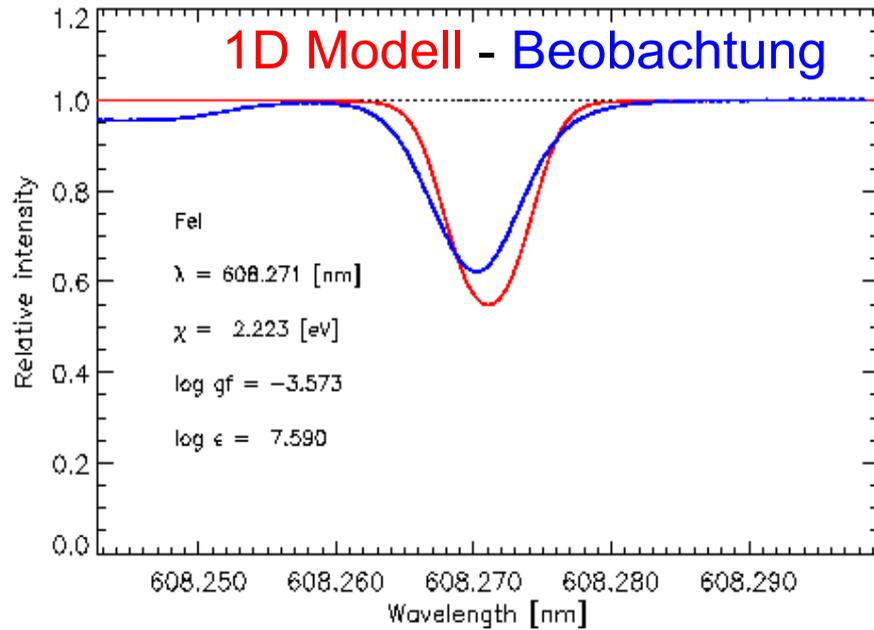
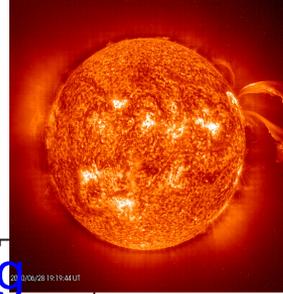
Satellit "SoHo"
(Solar and
Heliospheric
Observatory)



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)

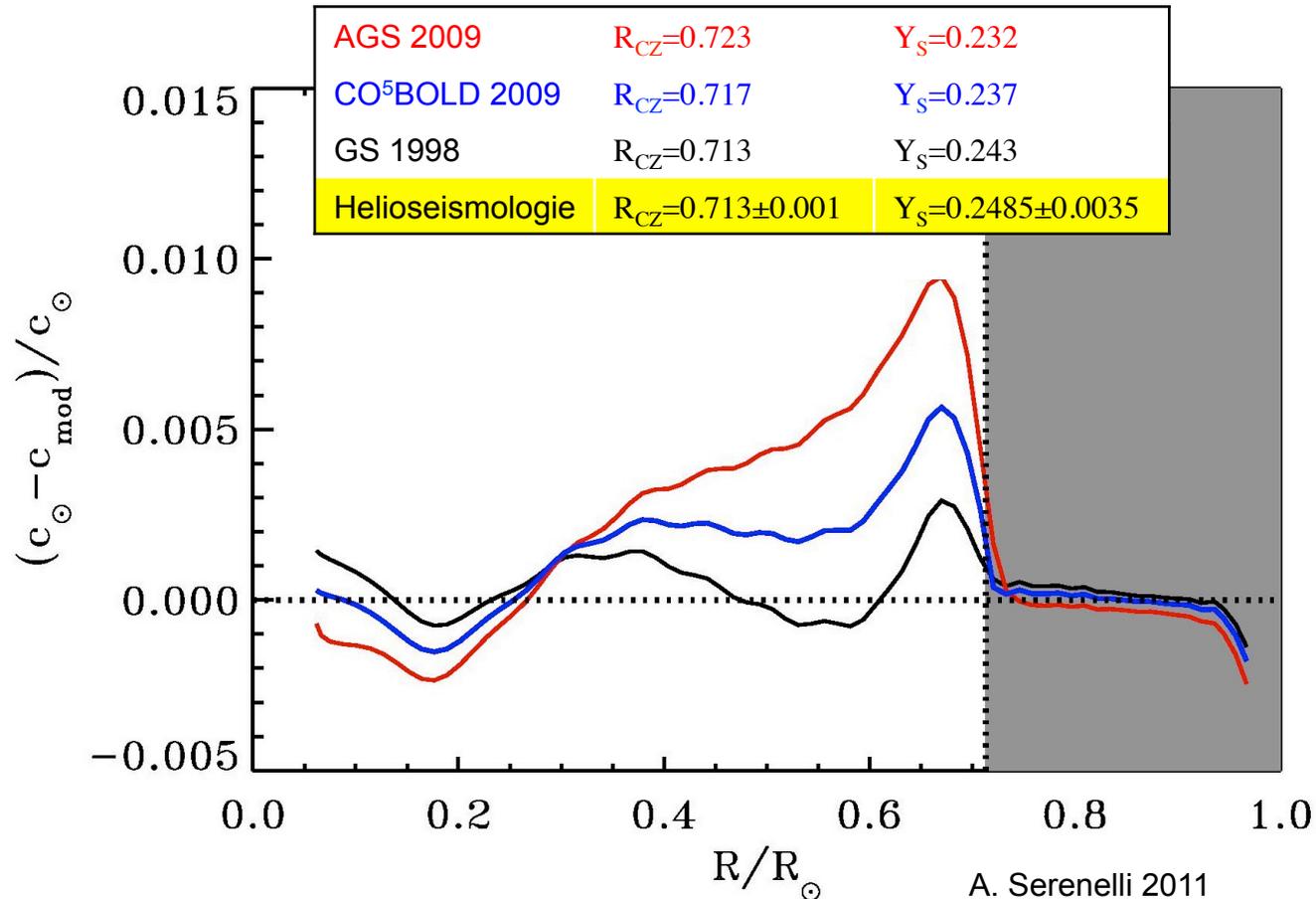
Problem:

Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

Standard-Sonnenmodell,
gerechnet mit
verschiedenen
Elementhäufigkeiten.

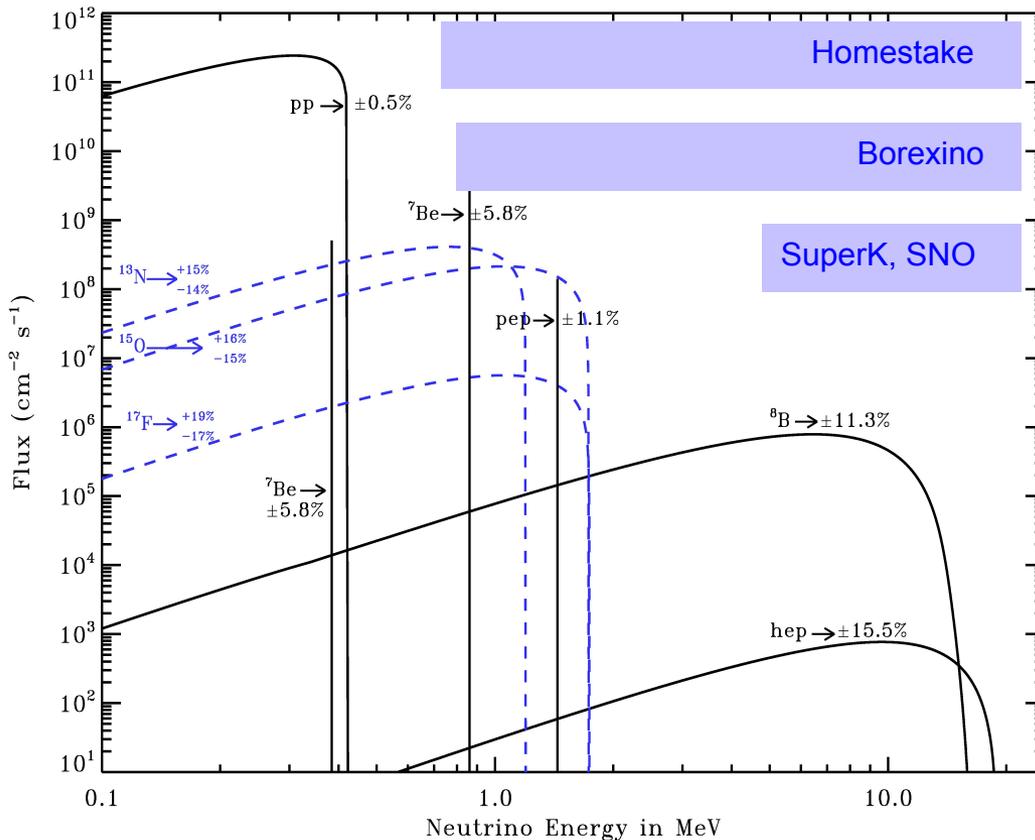
Observable, die
helioseismologisch
überprüft werden können:

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



Neutrino-Vorhersagen des Standard-Sonnenmodells

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

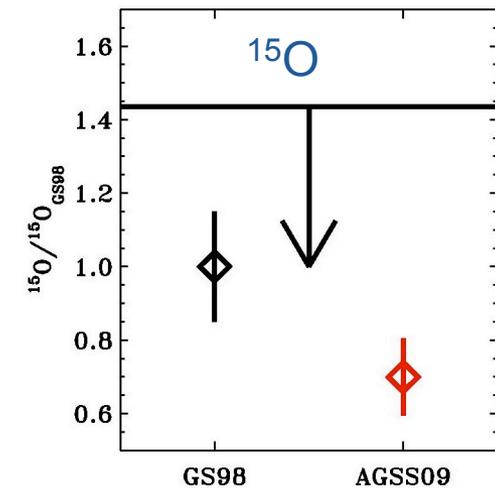
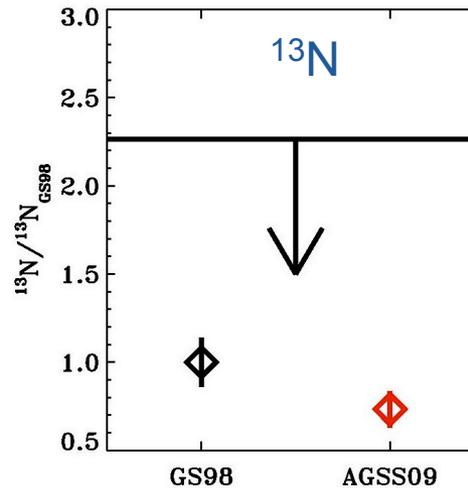
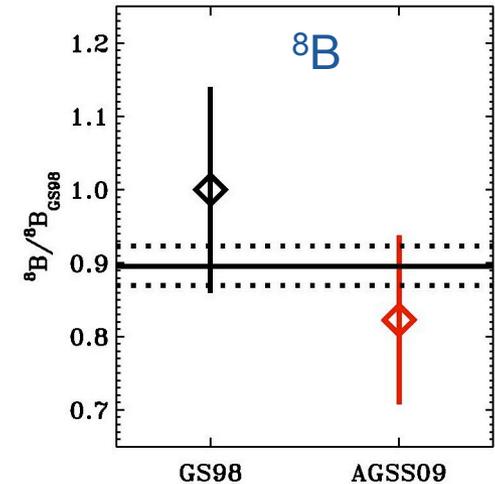
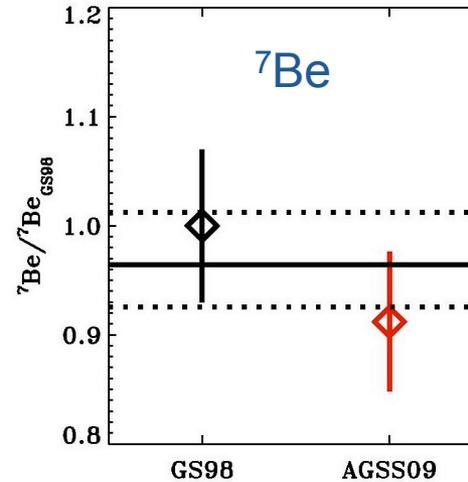


- GS 1998**
 Alte (<2005) Elementhäufigkeiten
 Konsistent mit Helioseismologie
 $\Phi(^8\text{B}) = 5.58$ $\Phi(^{15}\text{O}) = 2.23$
- AGS 2009**
 Neue (>2005) Elementhäufigkeiten
 Nicht konsistent mit Helioseismologie
 $\Phi(^8\text{B}) = 4.59$ $\Phi(^{15}\text{O}) = 1.56$

Neutrino-Flüsse in 10⁶/(cm² s)

Daten zur Sonne (3): Gemessene und berechnete Neutrinoflüsse

- Neutrino-Daten können heute nicht zwischen den beiden Elementhäufigkeiten GS98 und AGS09 unterscheiden.
- Die für die Zukunft erwarteten Daten zu den CNO-Neutrinos könnten das Problem lösen.
- Hierfür ist aber eine höhere Präzision des vorhergesagten Neutrinoflusses vonnöten.

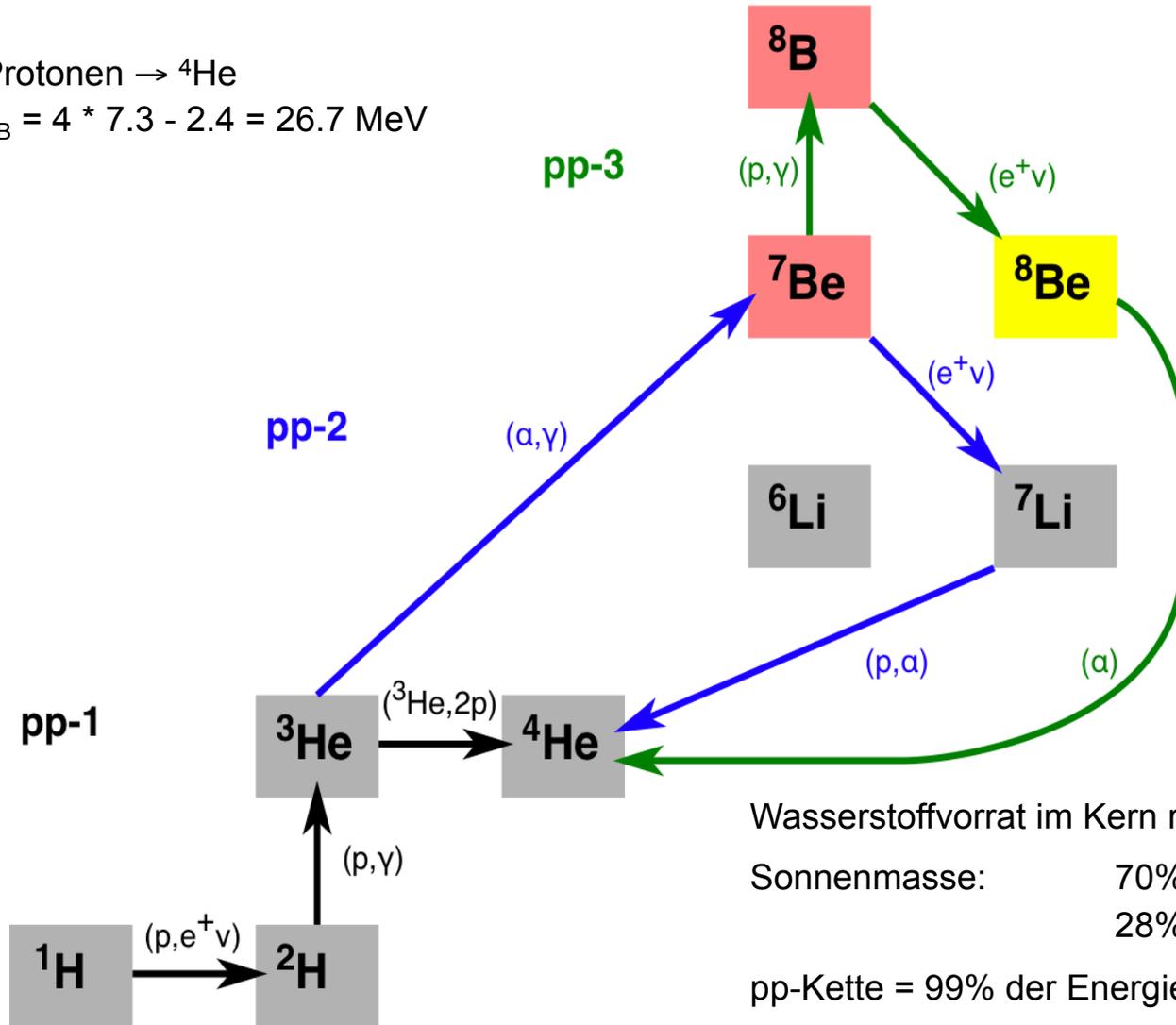


A. Serenelli 2011

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

4 Protonen \rightarrow ^4He

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



Wasserstoffvorrat im Kern reicht für 10^{10} Jahre

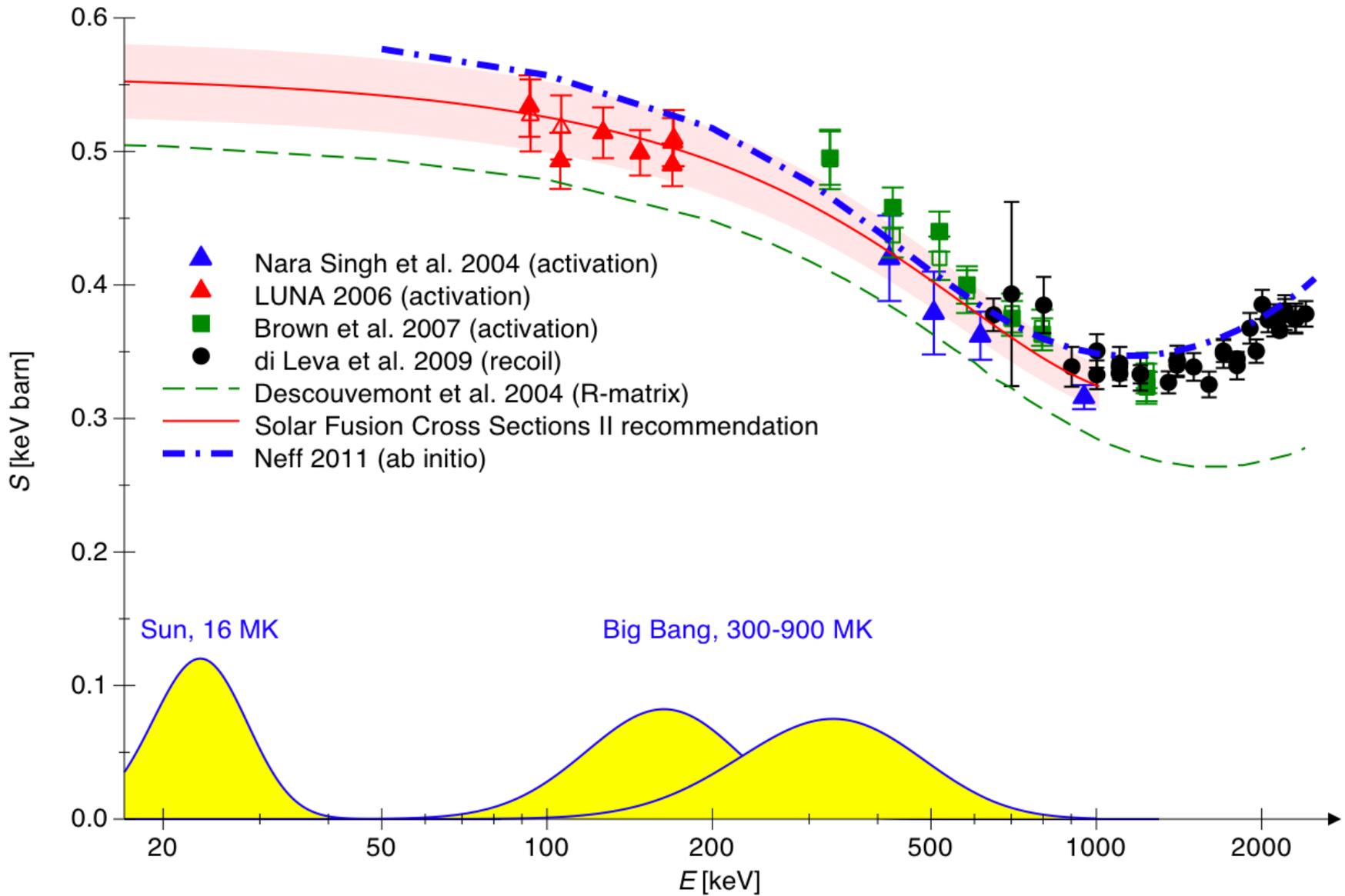
Sonnenmasse:

70% Wasserstoff

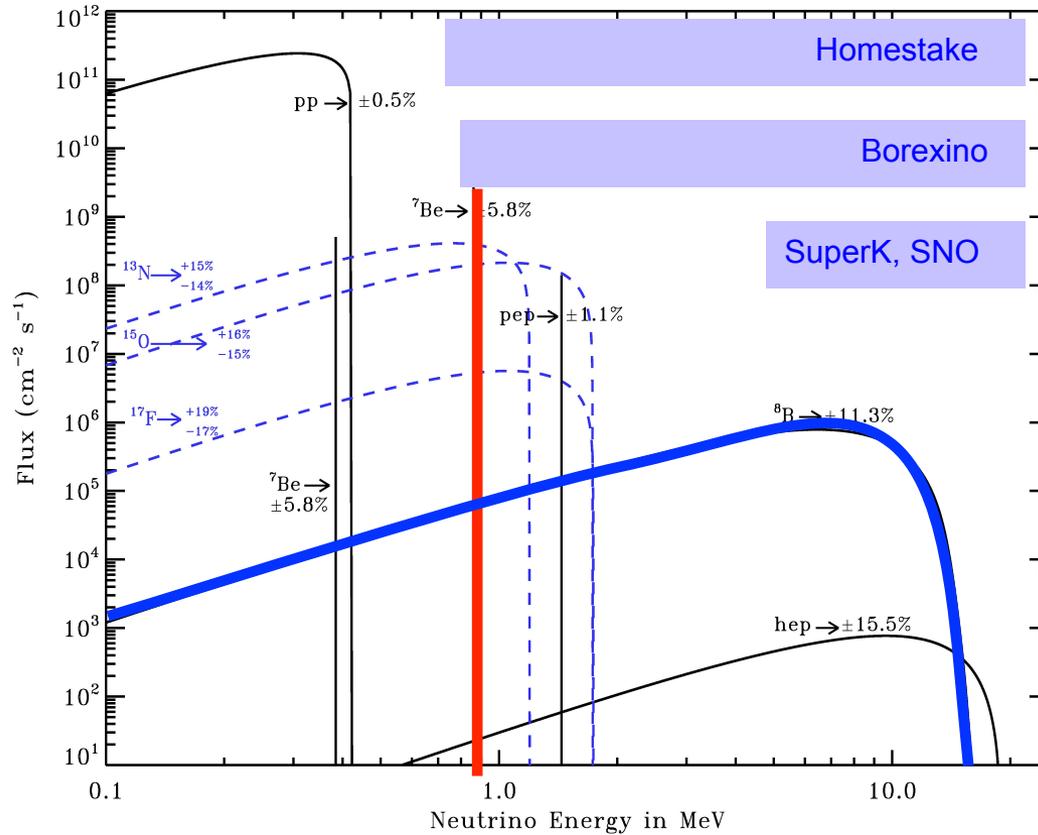
28% Helium (davon 25% primordial)

pp-Kette = 99% der Energieproduktion der Sonne

${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ 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	1.8%
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$	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

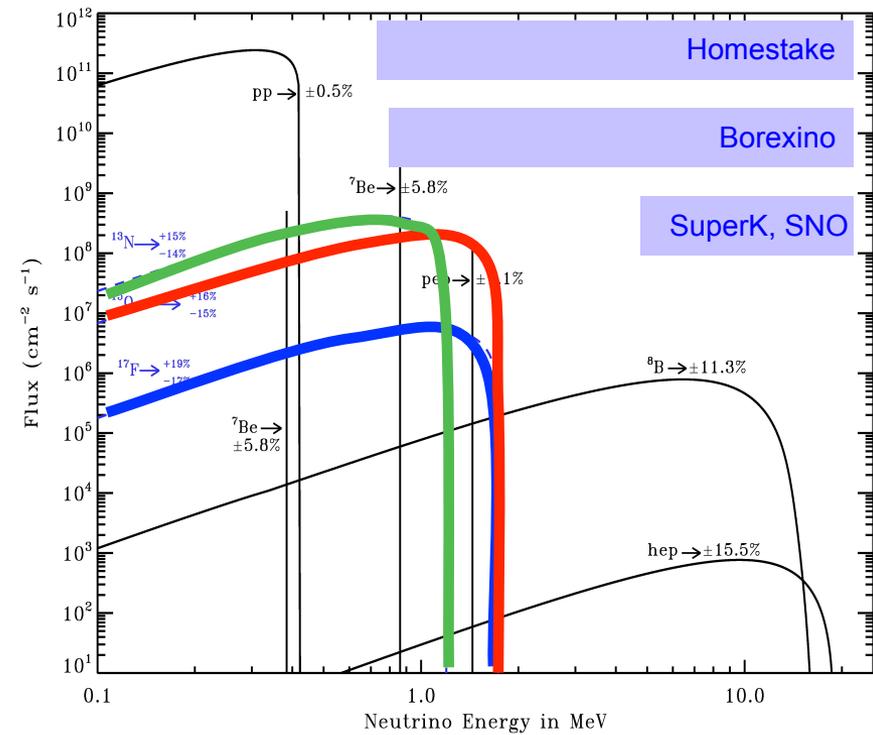
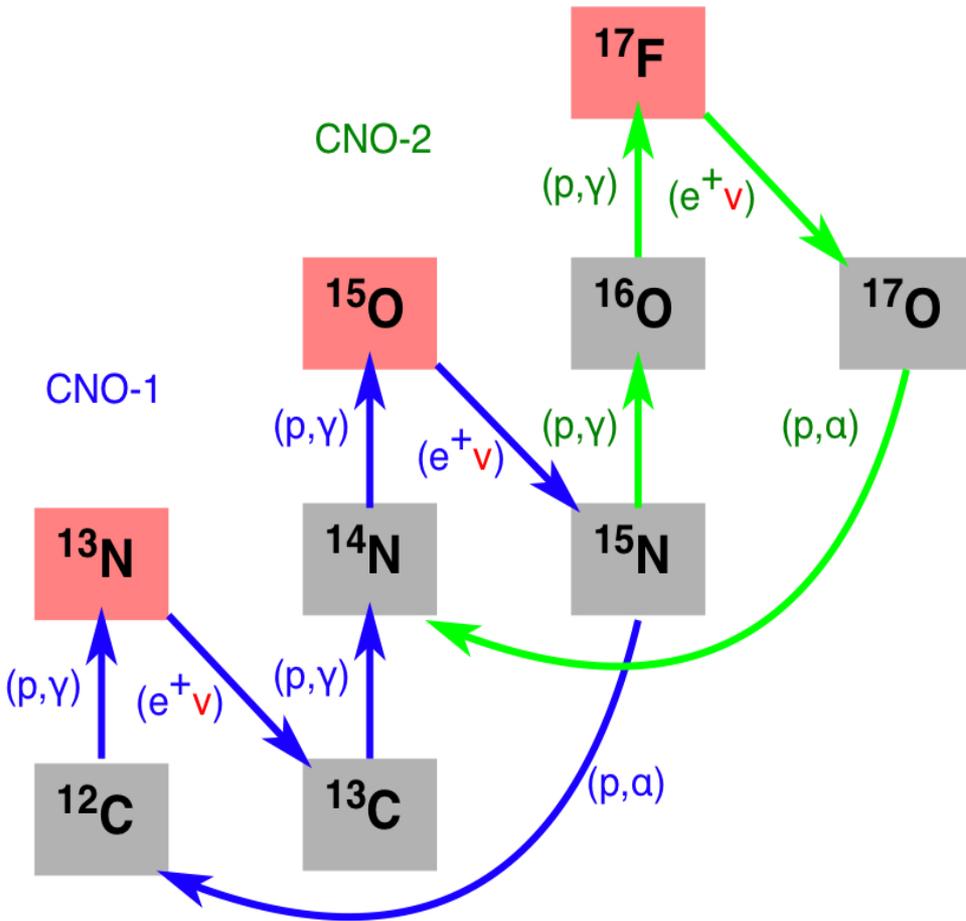
Borexino: 4.6% (syst.+stat.) Präzision für Φ_{Be} nach 3 Jahren Datennahme

Neutrinos aus dem CNO-Zyklus

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

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

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



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

Zusammenfassung

- Bestimmung des Alters von Kugelsternhaufen mittels des CNO-Zyklus
- Neutrinos von der Sonne

