Kosmologie und Astroteilchenphysik

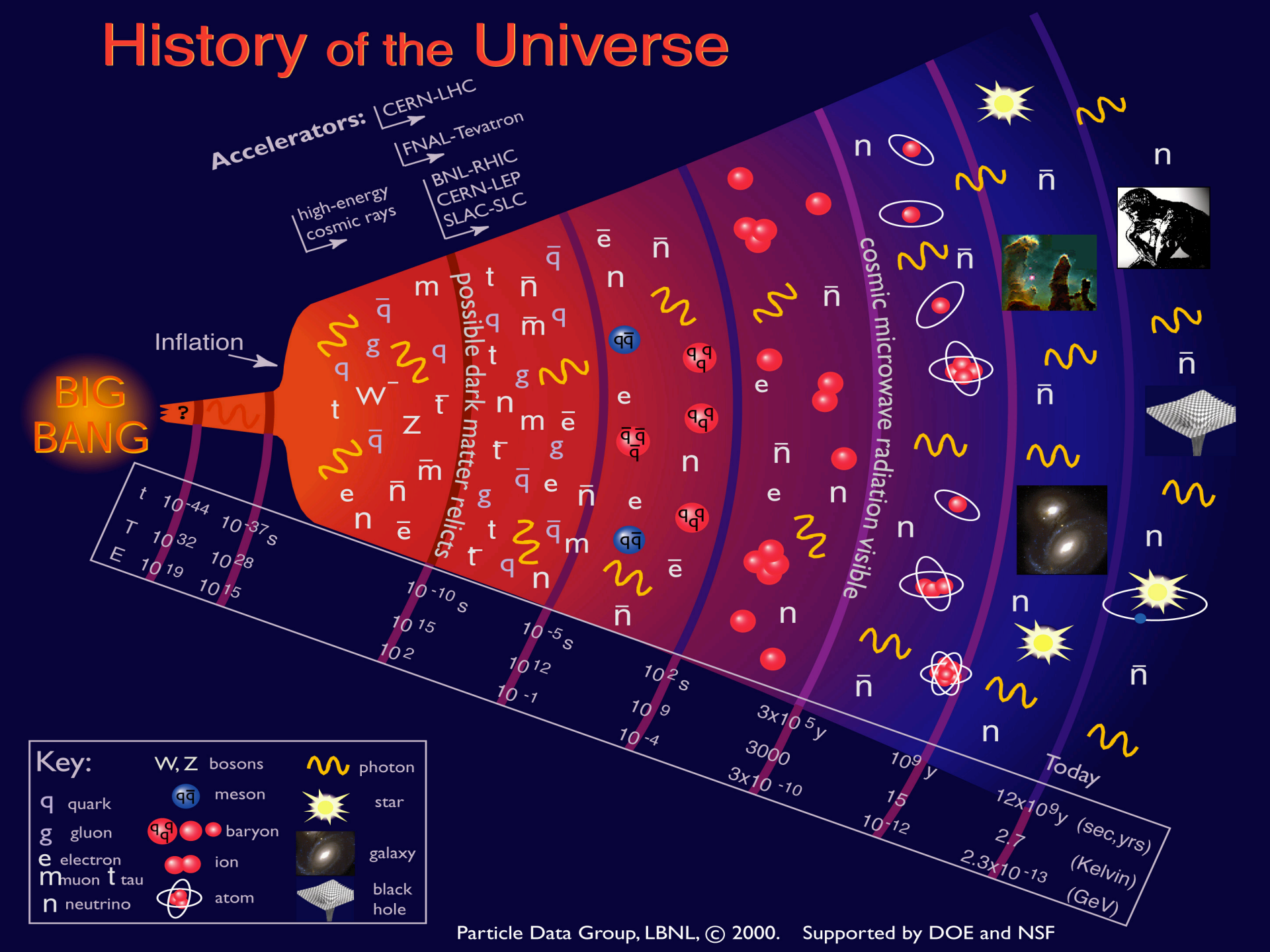
Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, PD Dr. Daniel Bemmerer

- 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 (heute)**
- Fundamentale Physik und die Sonne

11. Vorlesung, 24.06.2013

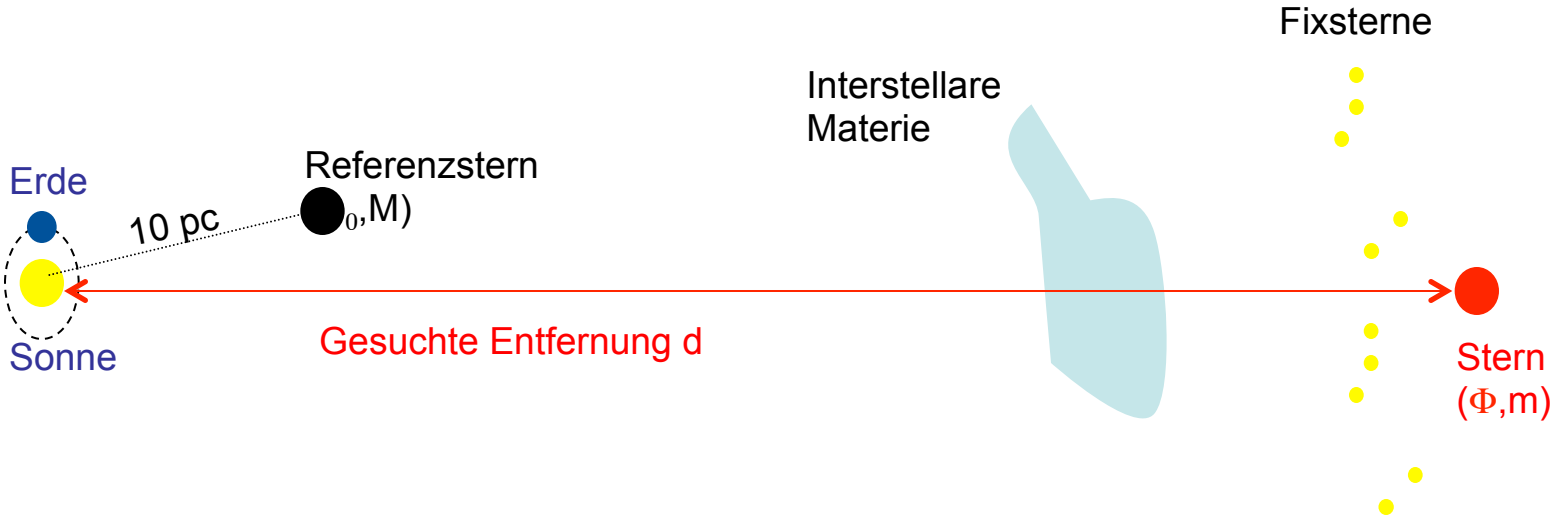
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Partner von DRESDEN concept exzellenz-dresden.de
HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF
Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Entfernungsmessung mittels Standardkerze: Prinzip



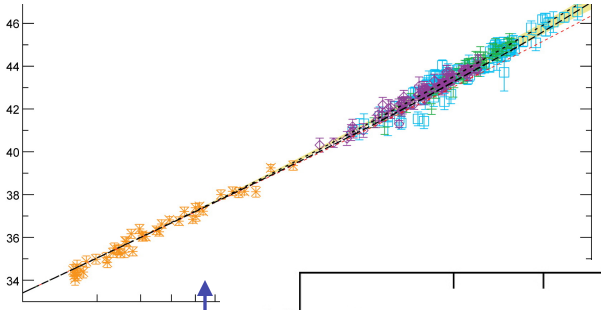
- Quadratisches Abstandsgesetz: $\Phi \sim d^{-2}$
- Helligkeit in Magnituden m: $m = -2.5 \log_{10}\Phi + C$
- Referenzstern in 10 pc Abstand: Fluss Φ_0, Helligkeit M

$$d = 10\,\mathrm{pc} \cdot 10^{(m-M)/5}$$

Standardkerzen mit empirischer Kalibrierung sind zum Beispiel:

- Veränderliche Sterne (Cepheiden, M hängt linear von der Periode ab)
- Supernovae vom Typ Ia (Helligkeit M im Maximum hängt von der Form der Lichtkurve ab)

Entfernungsmessung und Kosmologie (1)



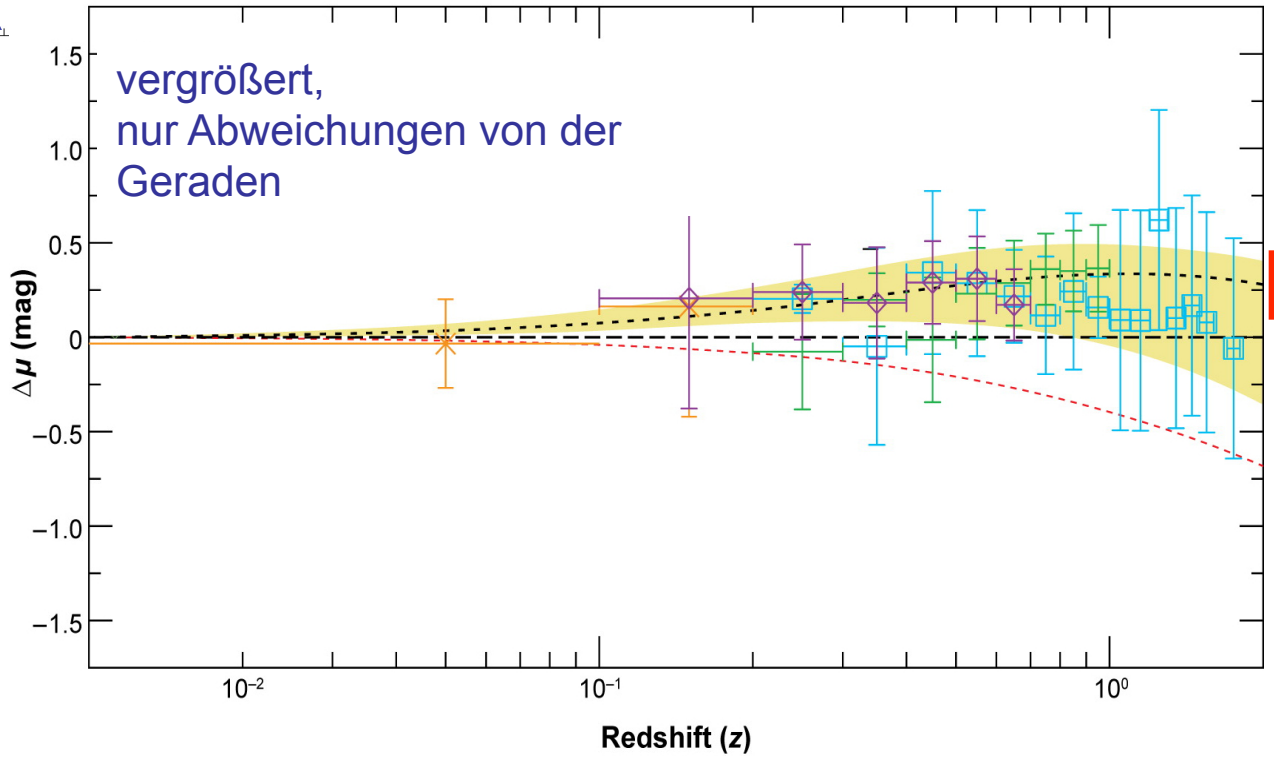
Weit entfernte Supernovae sind lichtschwächer als erwartet!

Evidenz für eine kosmologische Konstante $\Omega_\Lambda > 0$.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}\left(\rho c^2 + 3p\right)$$

Licht-
schwächer

vergrößert,
nur Abweichungen von der
Geraden



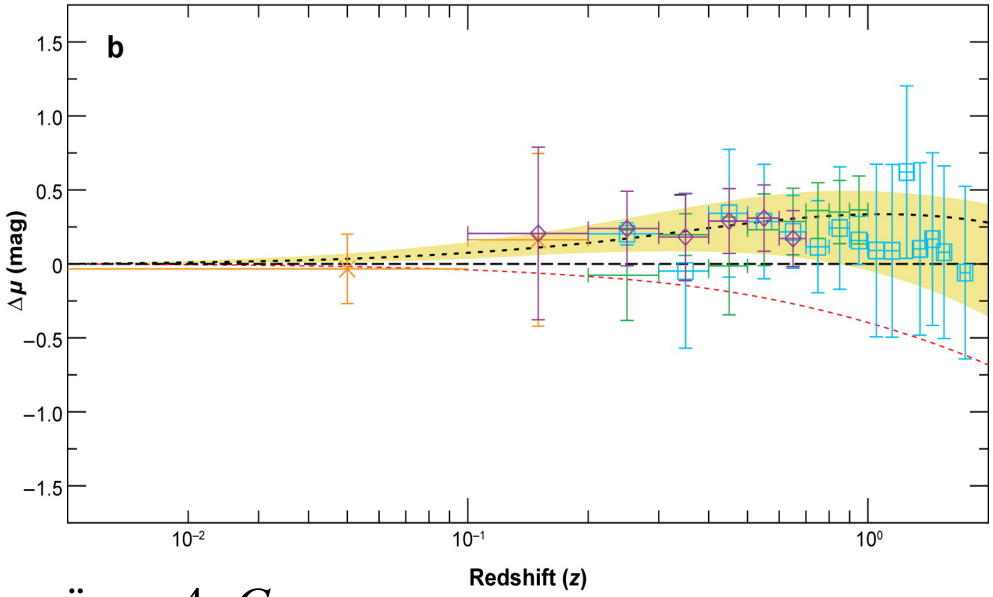
$\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$

$\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.0$

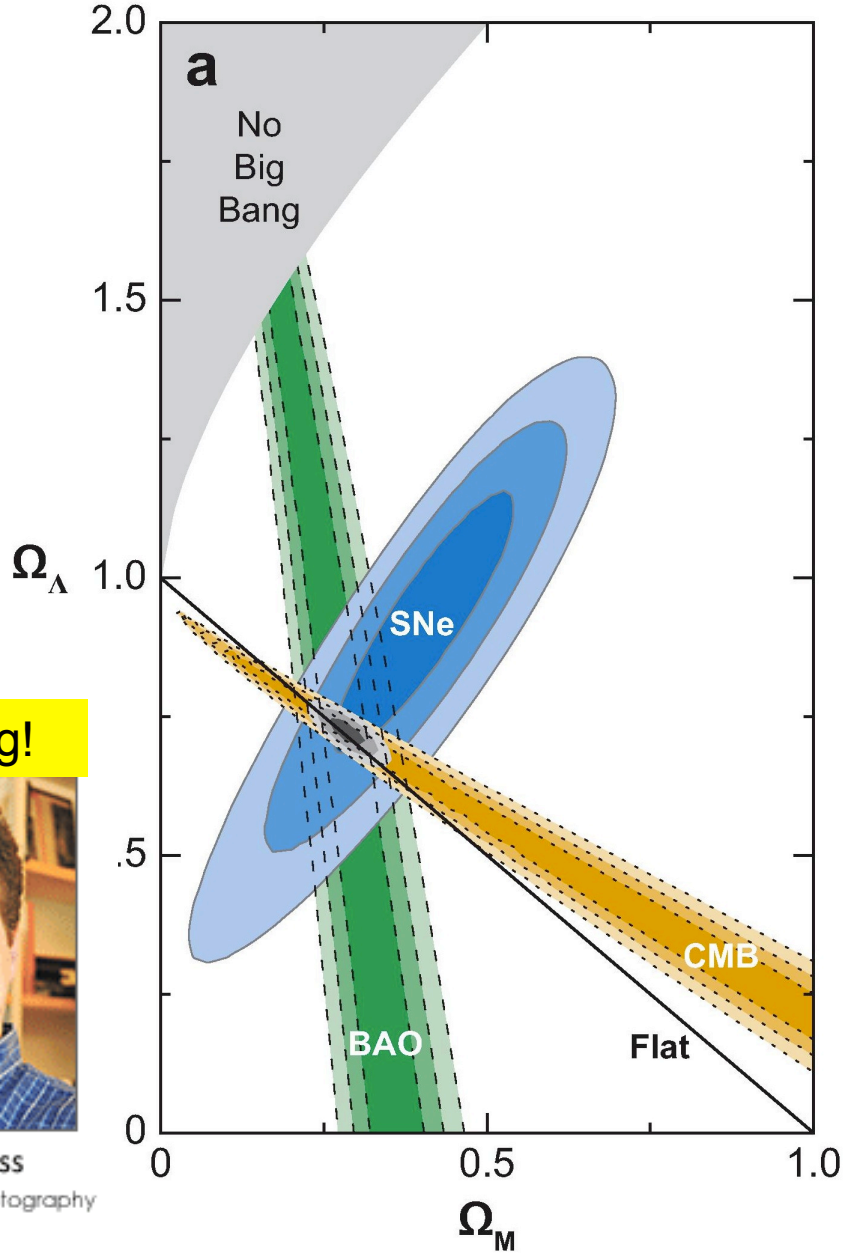
$\Omega_M=1.0$, $\Omega_\Lambda=0.0$

schneller

Entfernungsmessung und Kosmologie (2)



$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2}\left(\rho c^2 + 3p\right)$$



Physik-Nobelpreis 2011 für diese Entdeckung!

Saul Perlmutter

Credit: Lawrence Berkeley Nat'l Lab
Roy Kalschmidt, photographer

Brian P. Schmidt

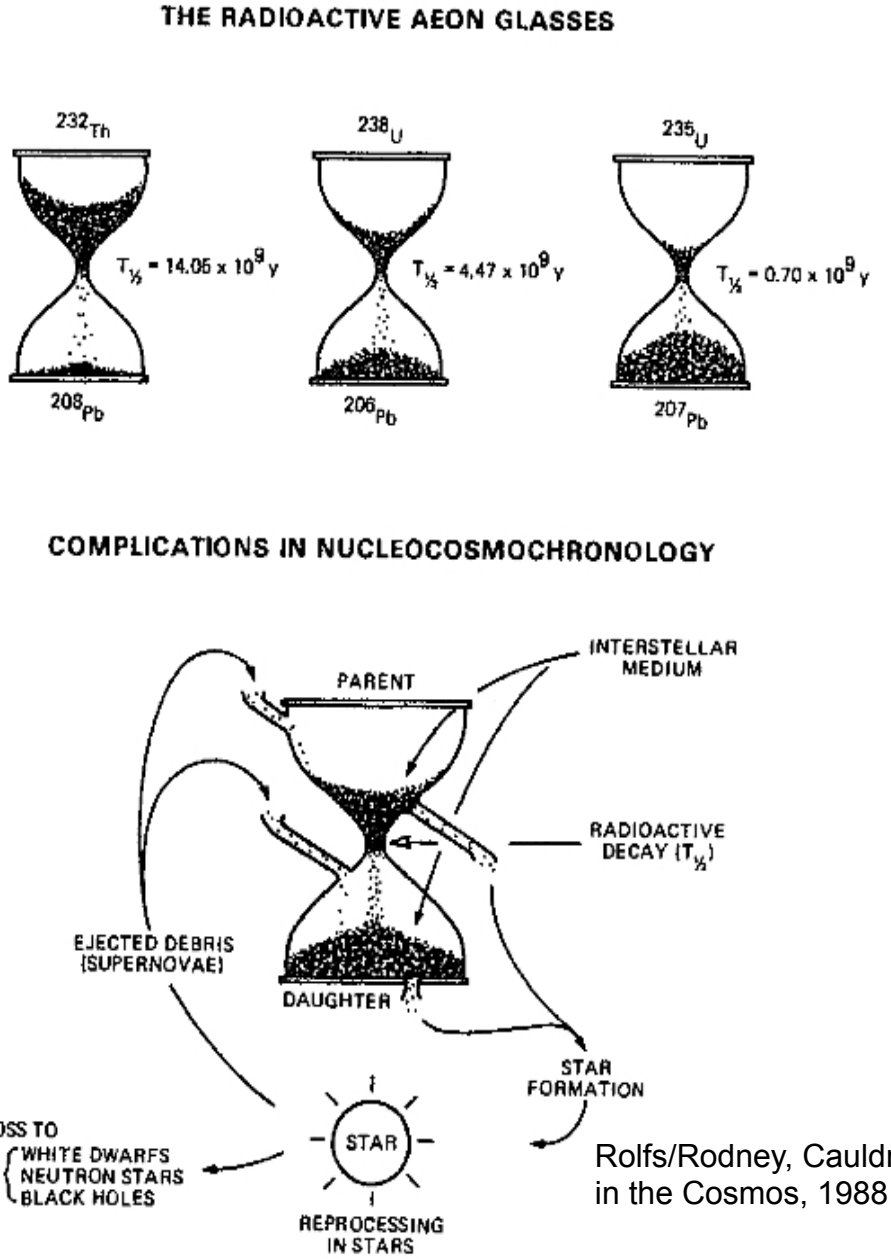
Credit: Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University

Adam G. Riess

Credit: Homewood Photography

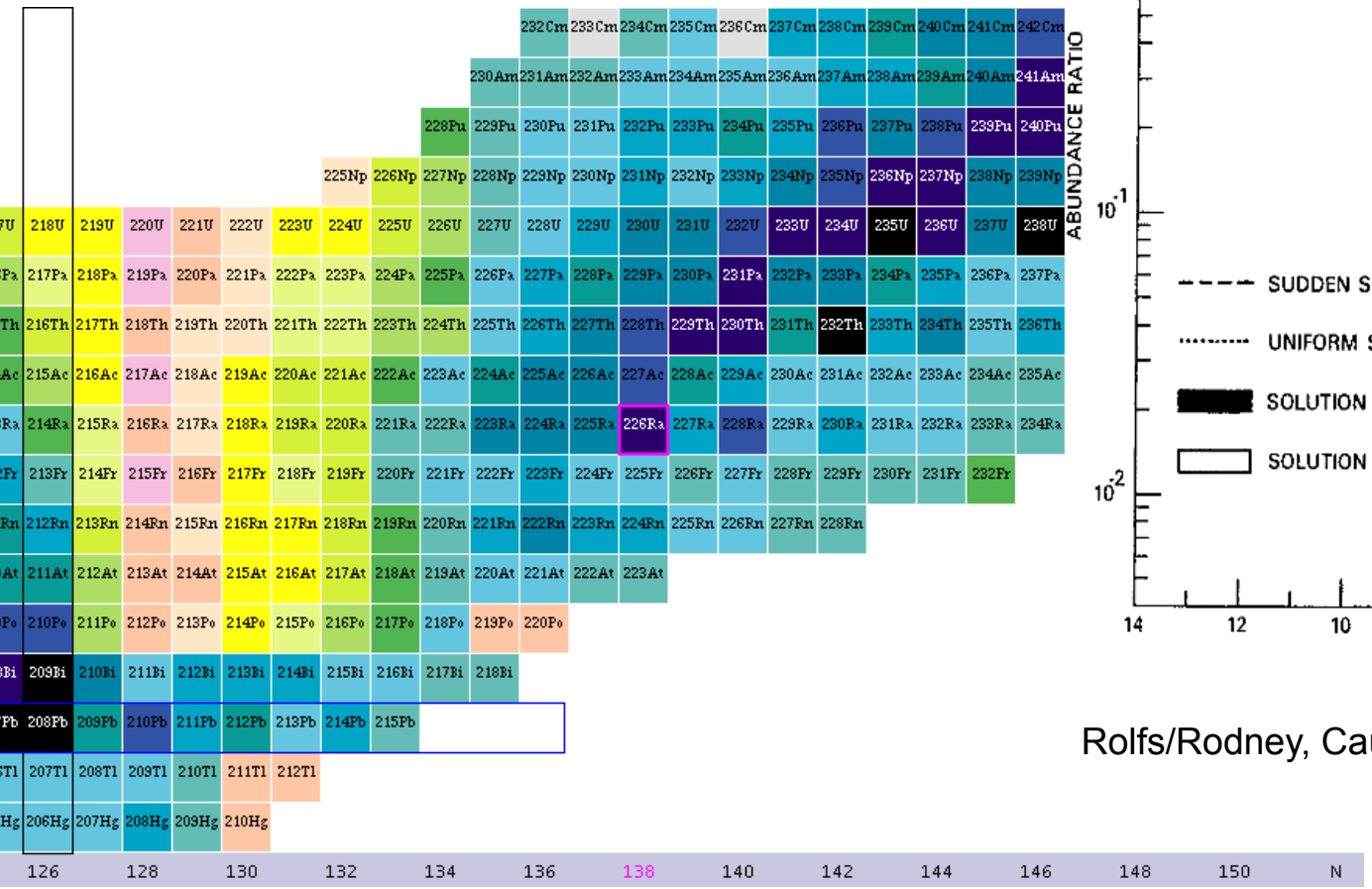
Nukleokosmochronologie (1)

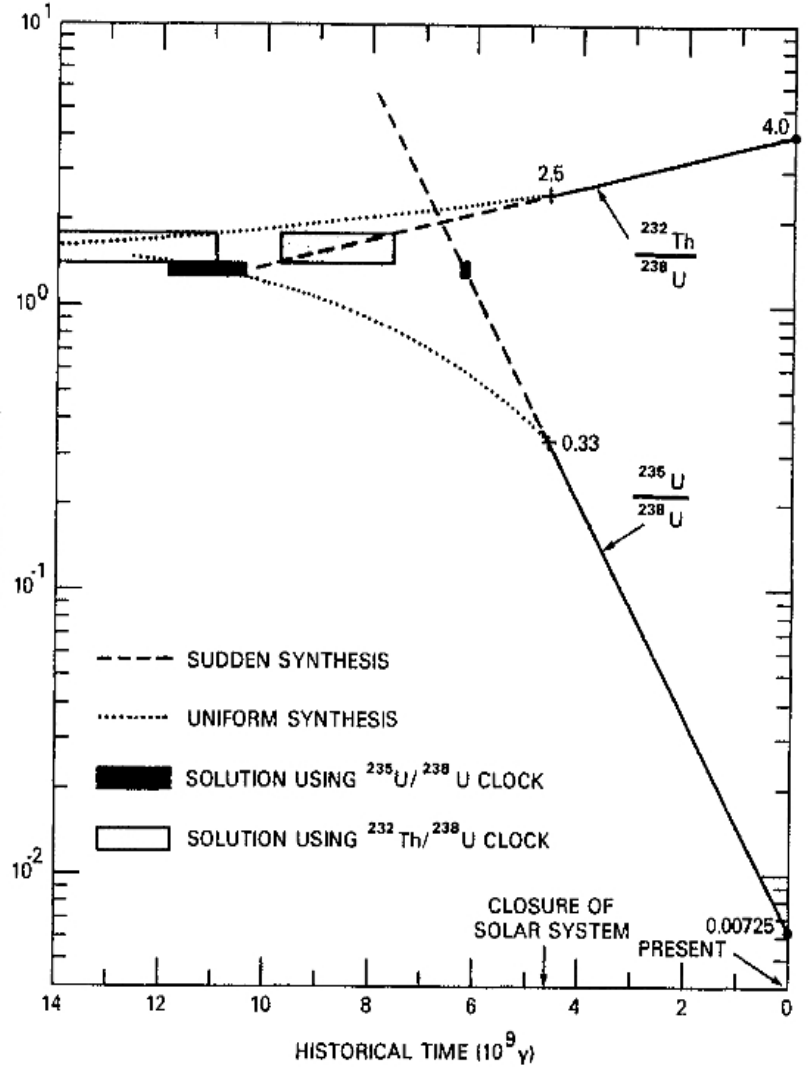
233U 1.592E+5 Y α: 100.00% SF < 6.0E-9%	234U 2.455E+5 Y 0.0054% α: 100.00% SF: 1.6E-9%	235U 7.04E+8 Y 0.7204% α: 100.00% SF: 7.0E-9%	236U 2.342E7 Y α: 100.00% SF: 9.4E-8%	237U 6.75 D β-: 100.00%	238U 4.468E9 Y 99.2742% α: 100.00% SF: 5.5E-5%
232Pa 1.32 D β-: 100.00% ε: 3.0E-3%	233Pa 26.975 D β-: 100.00%	234Pa 6.70 H β-: 100.00%	235Pa 24.44 M β-: 100.00%	236Pa 9.1 M β-: 100.00%	237Pa 8.7 M β-: 100.00%
231Th 25.52 H β-: 100.00% α≈ 4E-11%	232Th 1.40E10 Y 100% α: 100.00% SF: 1.1E-9%	233Th 21.83 M β-: 100.00%	234Th 24.10 D β-: 100.00%	235Th 7.2 M β-: 100.00%	236Th 37.3 M β-: 100.00%
230Ac 122 S β-: 100.00% β-: 1.2E-6%	231Ac 7.5 M β-: 100.00%	232Ac 119 S β-: 100.00%	233Ac 145 S β-: 100.00%	234Ac 44 S β-: 100.00%	235Ac 60 S β-: 100.00%
141	142	143	144	145	146



Rolfs/Rodney, Cauldrons in the Cosmos, 1988

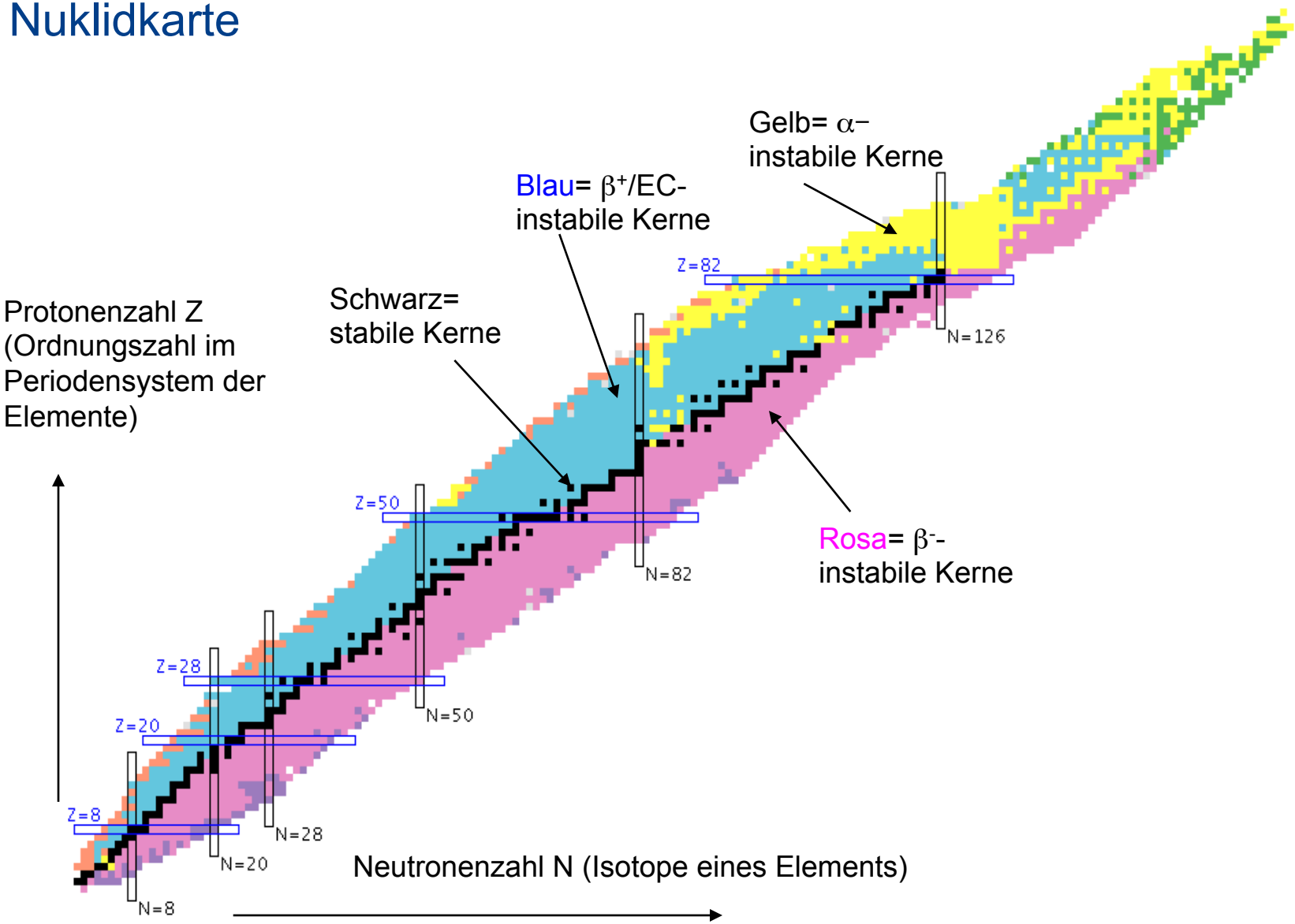
Nukleokosmochronologie (2)



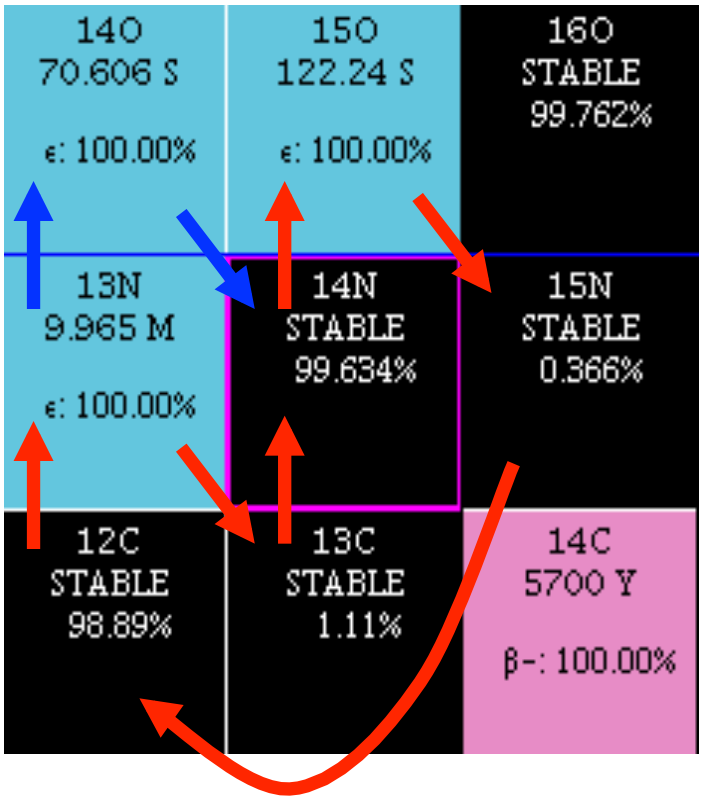


Rolfs/Rodney, Cauldrons in the Cosmos, 1988

Nuklidkarte



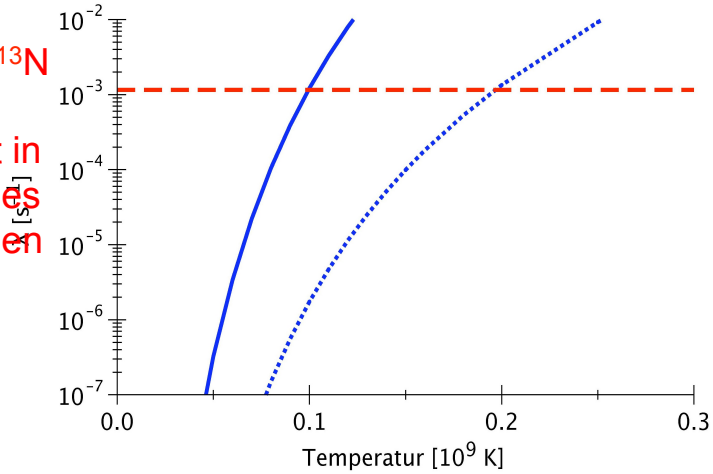
Beispiel für Konkurrenz zwischen Kernzerfall und Kernreaktion: Heißer CNO-Zyklus



Rot = normaler ("kalter") Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)

Blau = Heißer CNO-Zyklus

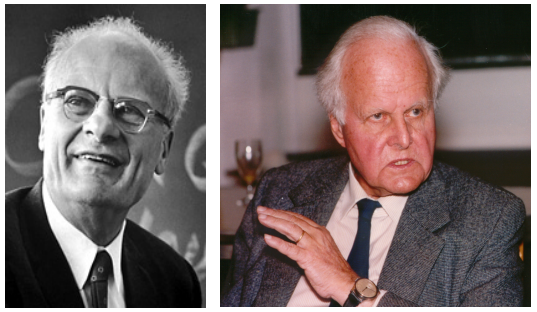
Rot: β-Zerfall von ^{13}N (normaler CNO-Zyklus; ^{13}N zerfällt in aller Regel, bevor es ein Proton einfangen kann)

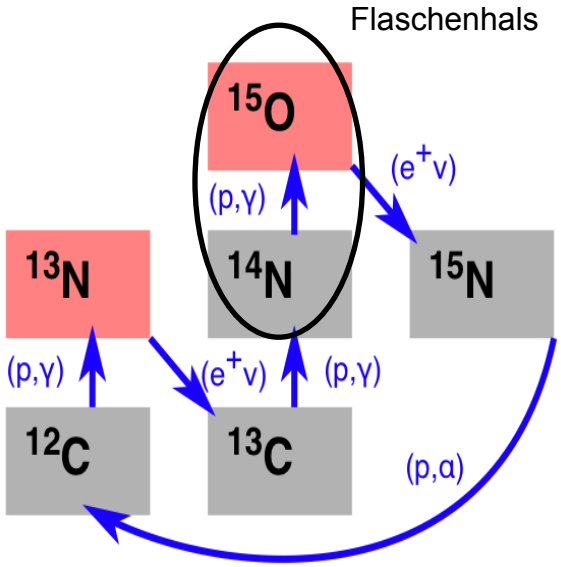


Blau: Rate für den Protoneneinfang an ^{13}N für zwei verschiedene Dichten des Sterns, in Abhängigkeit von der Temperatur
(heißer CNO-Zyklus, spielt nur eine Rolle bei hohen Temperaturen, daher der Name)

- Bei astrophysikalischen Temperaturen sind Kernreaktionsraten stark temperaturabhängig,
- Analog zur Rate von chemischen Reaktionen: Höhere Temperatur, höhere Rate

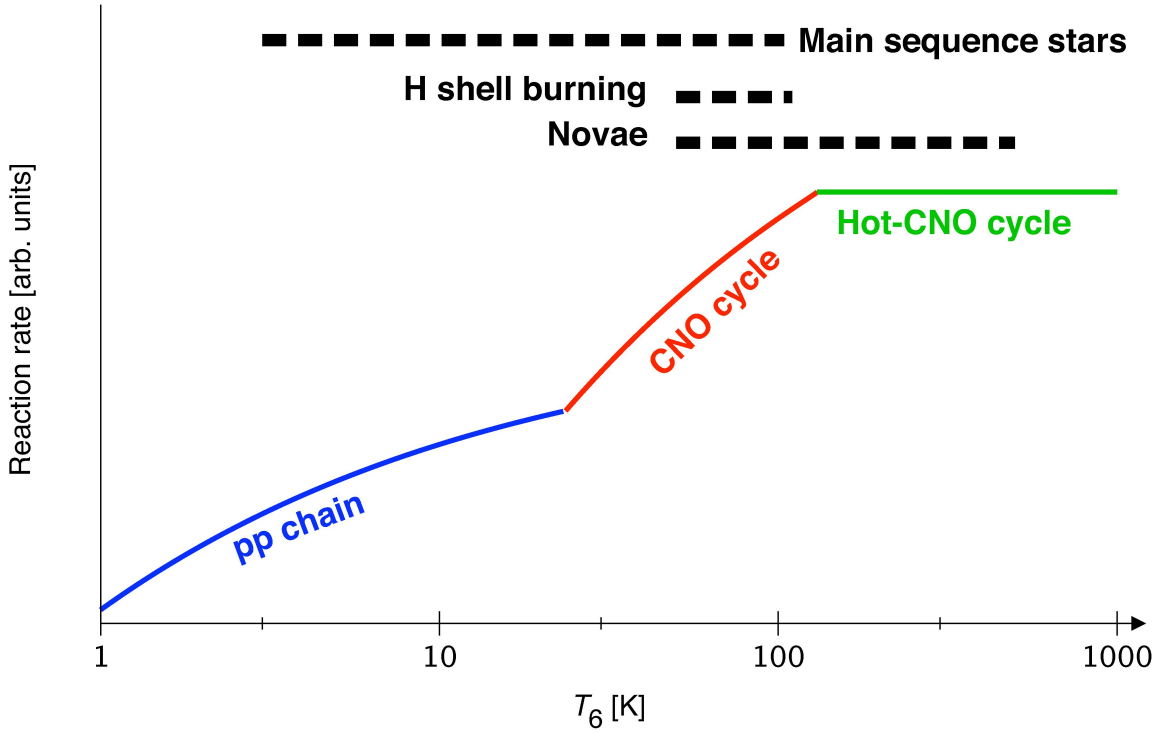
Wasserstoffbrennen: Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)



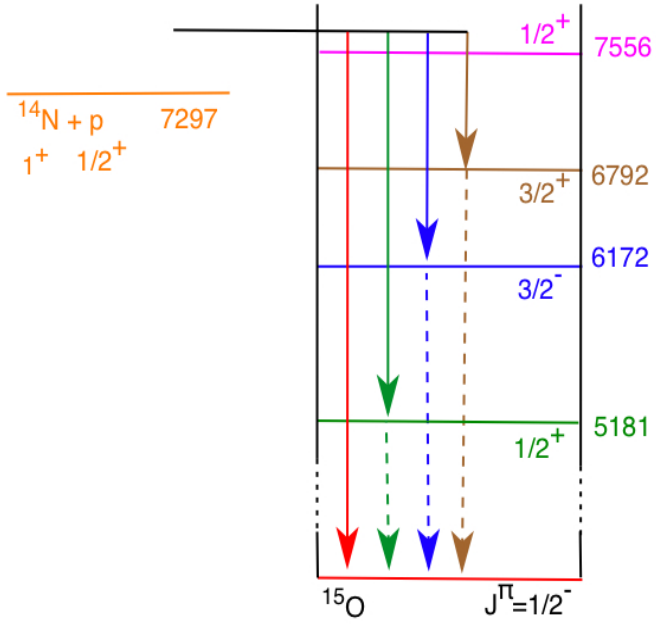


1938 postuliert

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



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



(75±5)%

(5±1)%

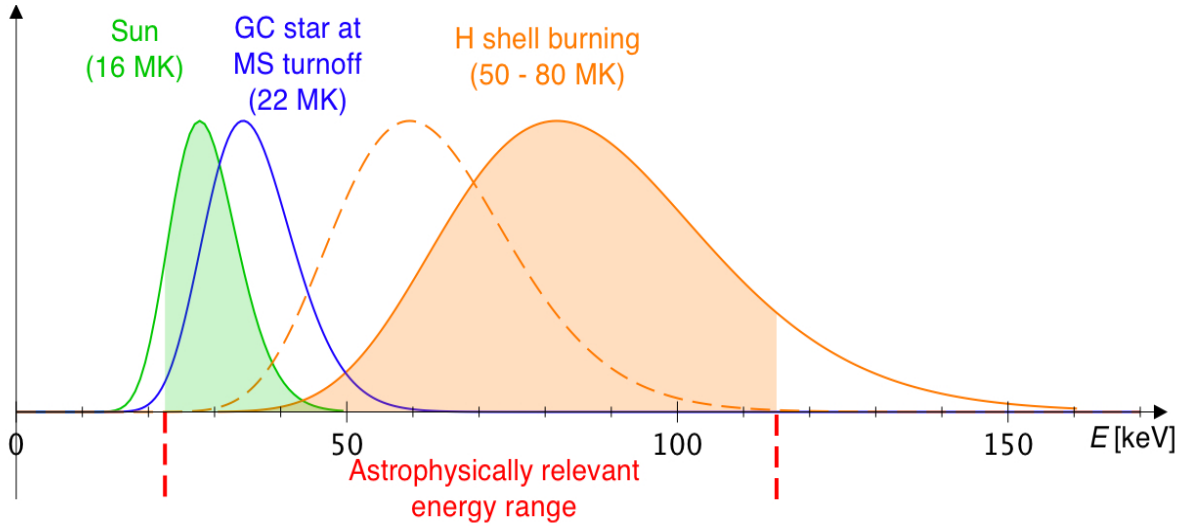
(5±1)%

(15±15)%

Zwei mögliche Ansätze für Experimente

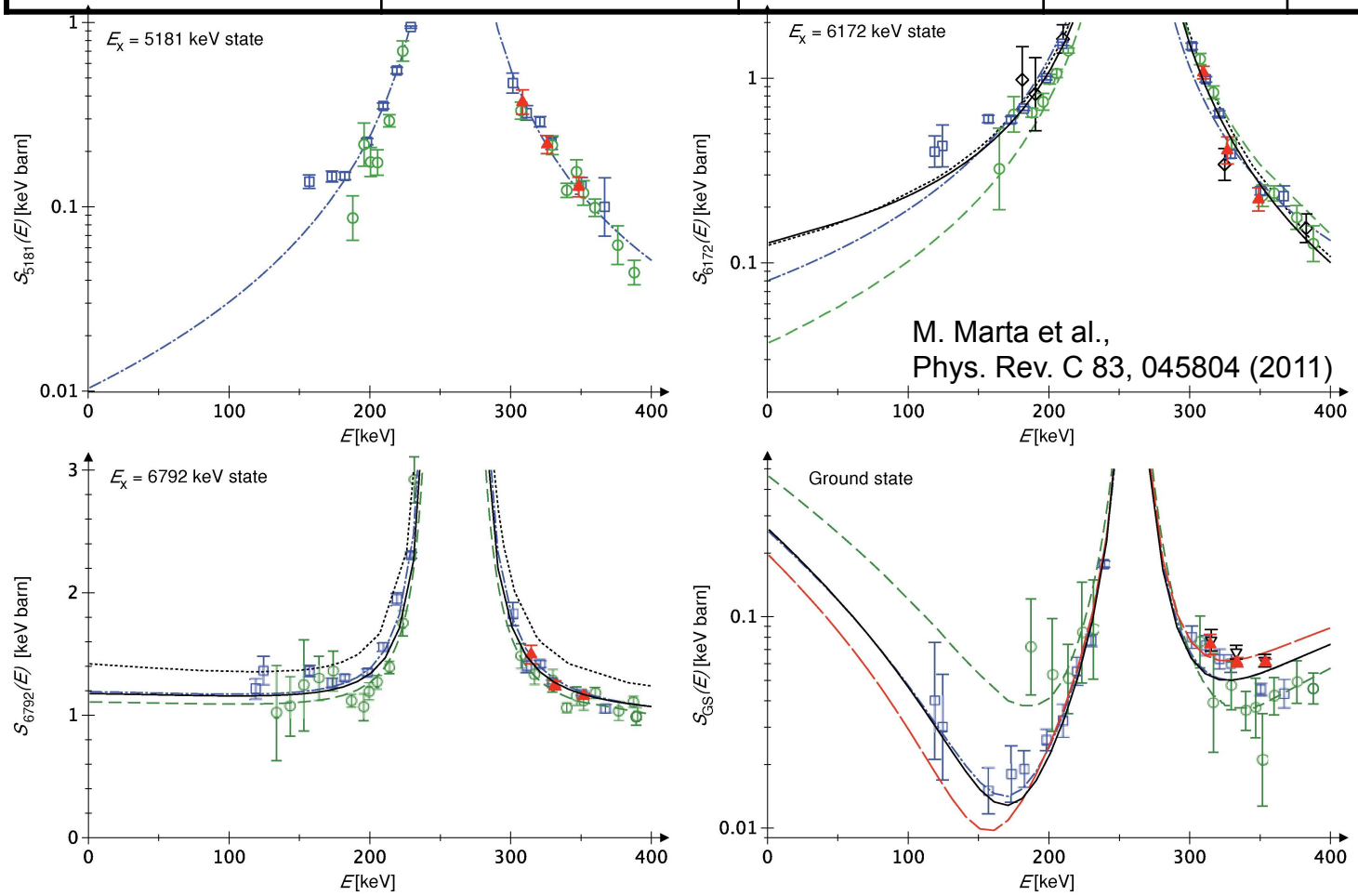
1. Untersuche Einfang in jeden Level im Einzelnen, dann extrapoliere.

2. Untersuche alle Levels gleichzeitig in einem Summendetektor, aber verzichte (gezwungenermaßen) auf die Extrapolation

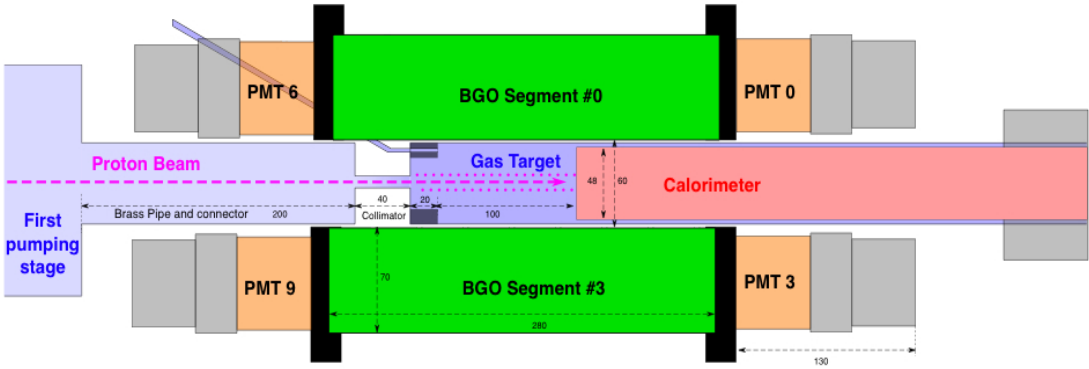


LUNA halbierte den $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$-Wirkungsquerschnitt!

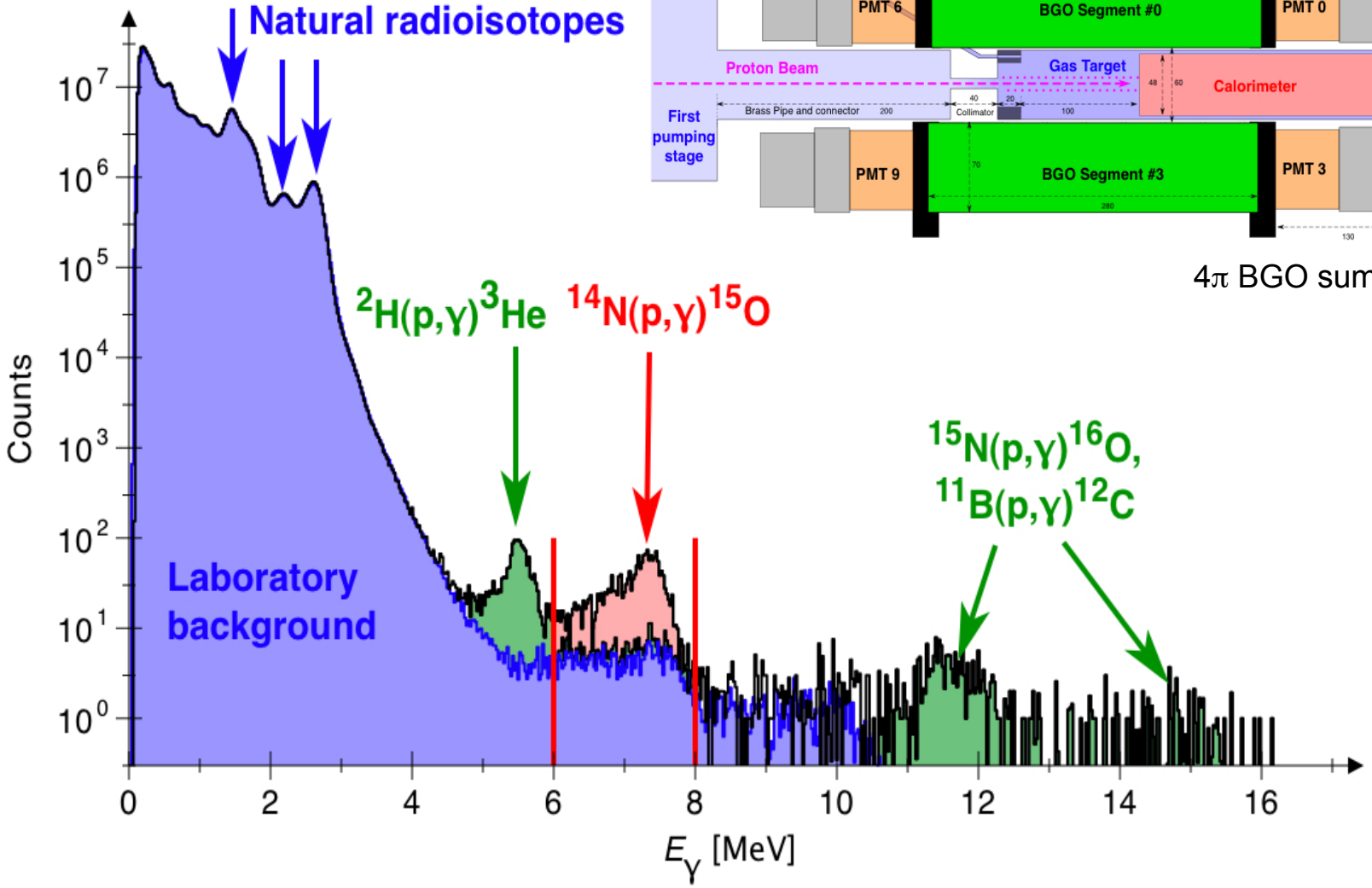
Einfang in...	NACRE compilation 1999	LUNA, phase 1 2004	TUNL 2005	LUNA, phase 3 2008+2011
... ^{15}O Grundzustand	1.55 ± 0.34	0.25 ± 0.06	0.49 ± 0.08	0.27 ± 0.05
…^{15}O angeregte Zust.	1.65 ± 0.05	1.36 ± 0.05	1.27 ± 0.05	(1.39 ± 0.05)
S(0) in keV barn	3.2 ± 0.5 (tot)	1.6 ± 0.2 (tot)	1.8 ± 0.2 (tot)	1.66 ± 0.12 (tot)



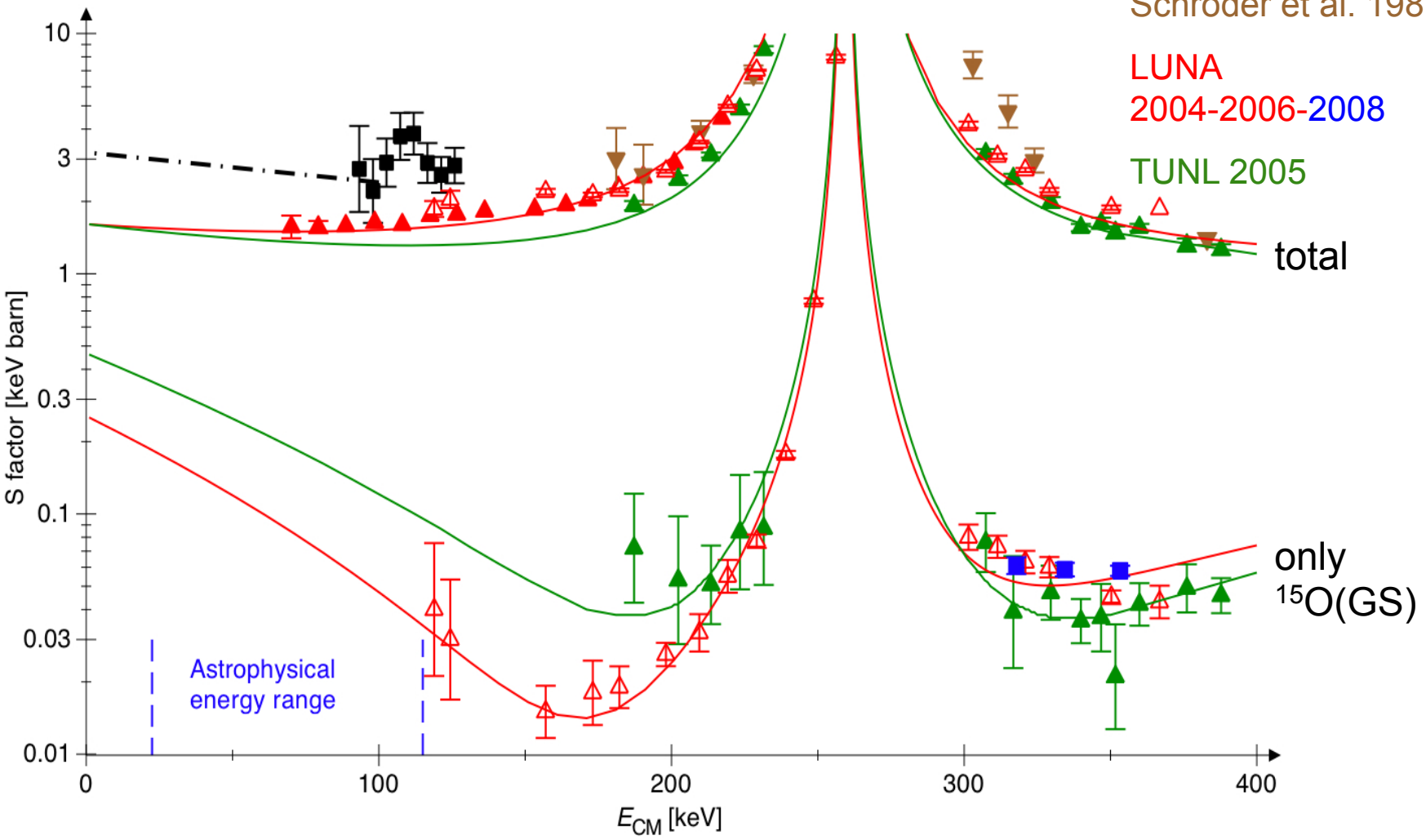
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$, Messung aller Übergänge mit einem Summendetektor



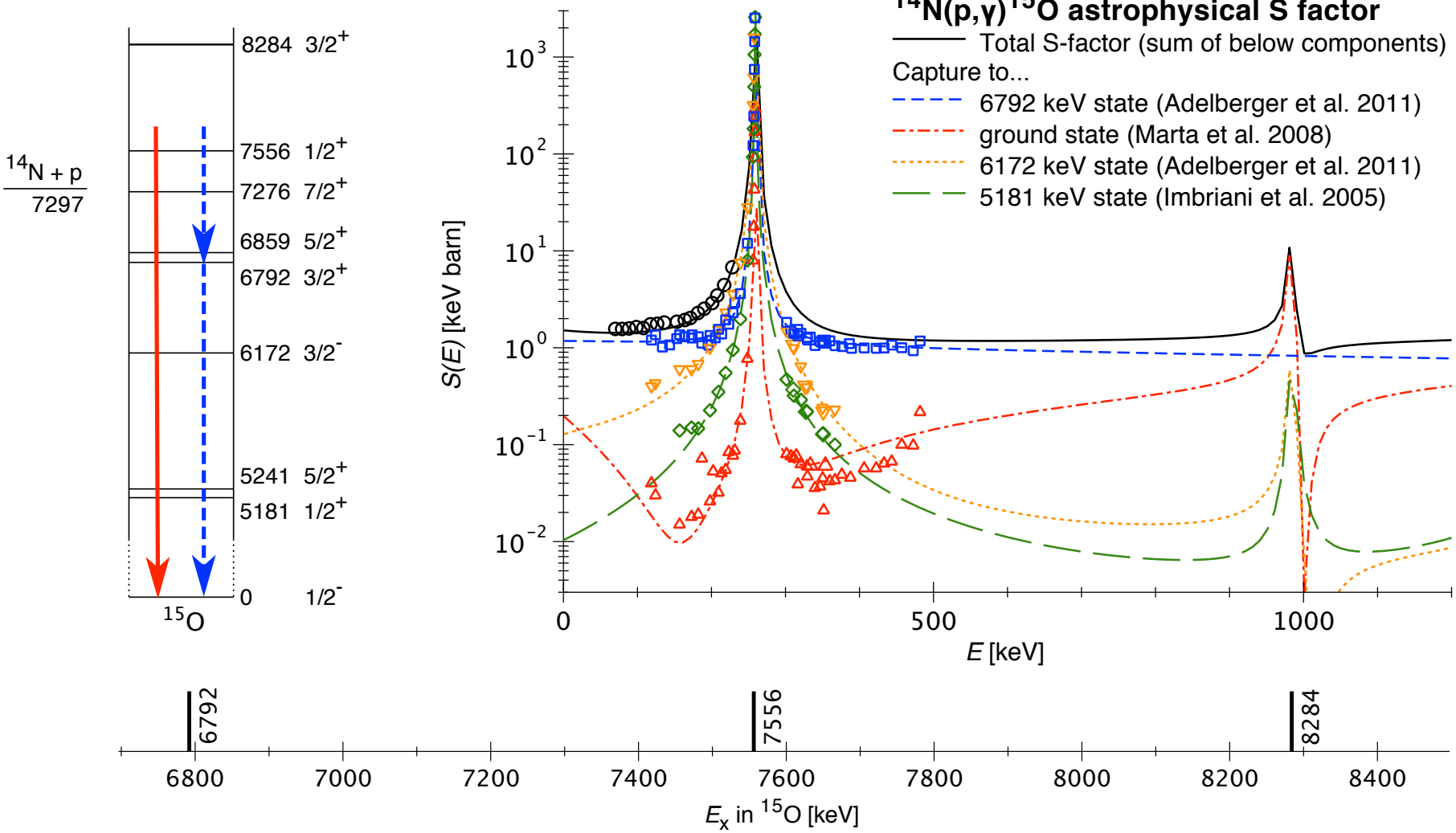
4π BGO summing crystal



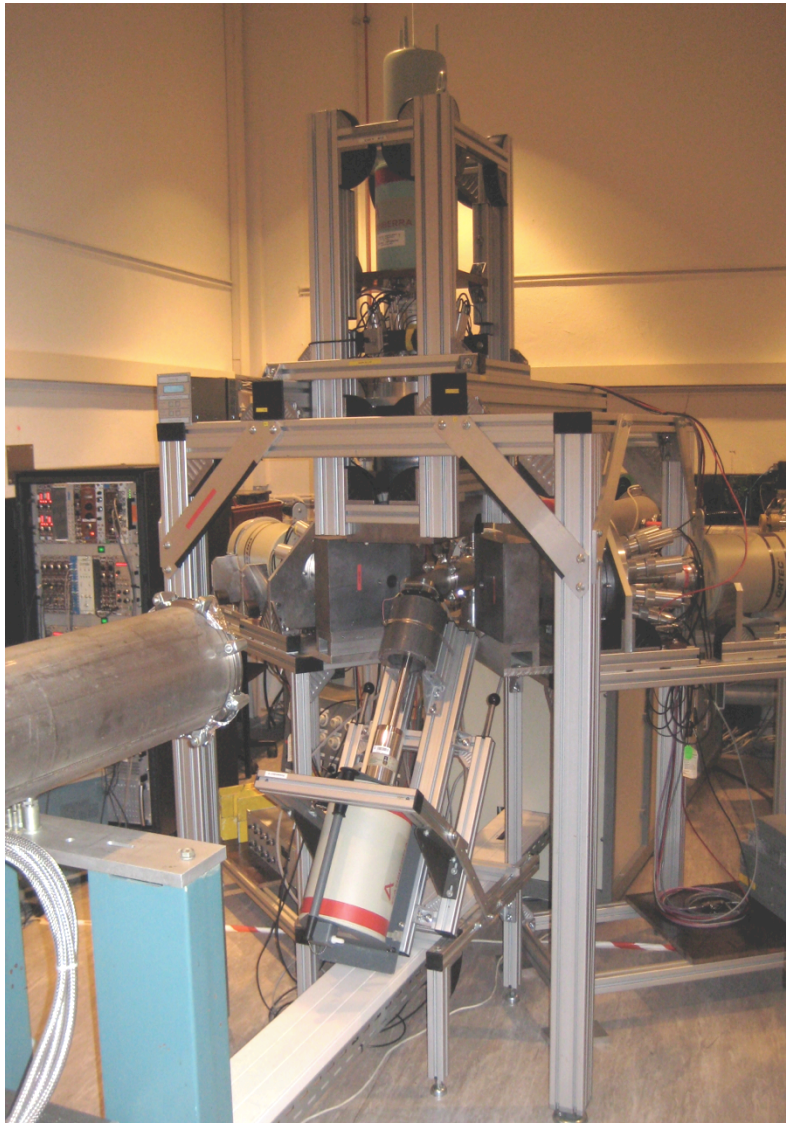
Gesamter S-Faktor von $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$



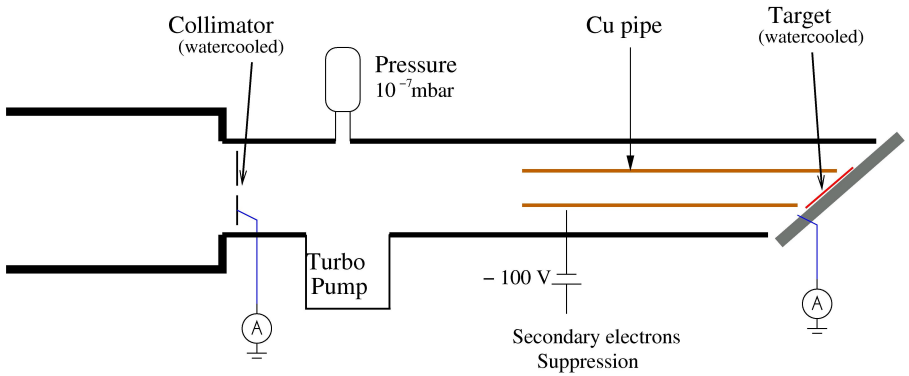
Gesamter S-Faktor von $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$, über einen weiten Energiebereich



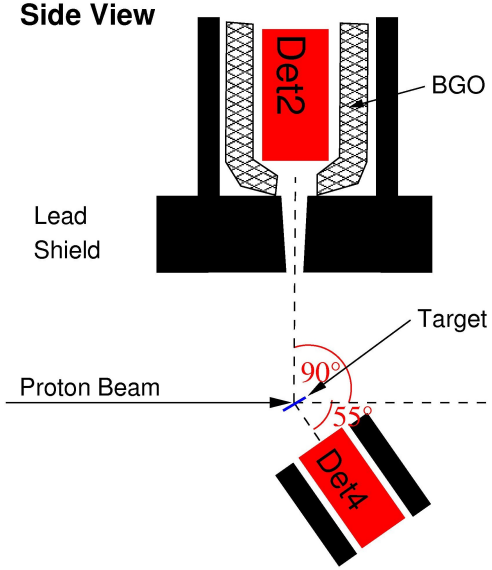
Versuchsaufbau am HZDR Tandetron, Dresden



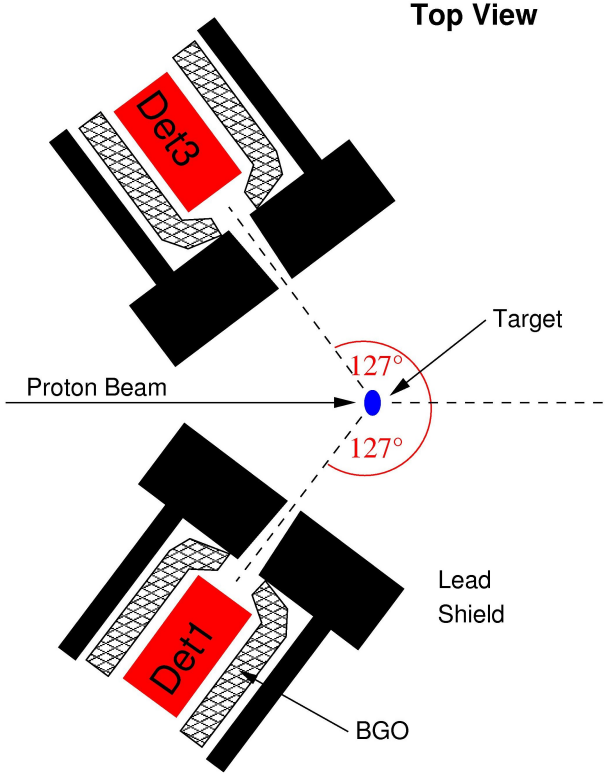
Detektoren und Targets

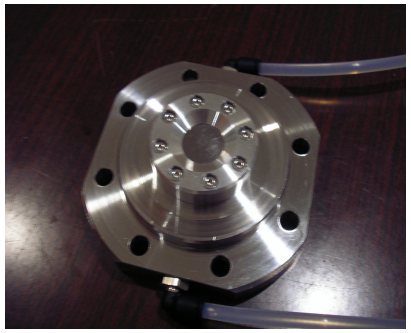


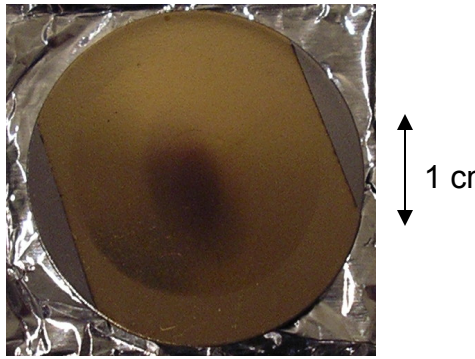
Side View



Top View







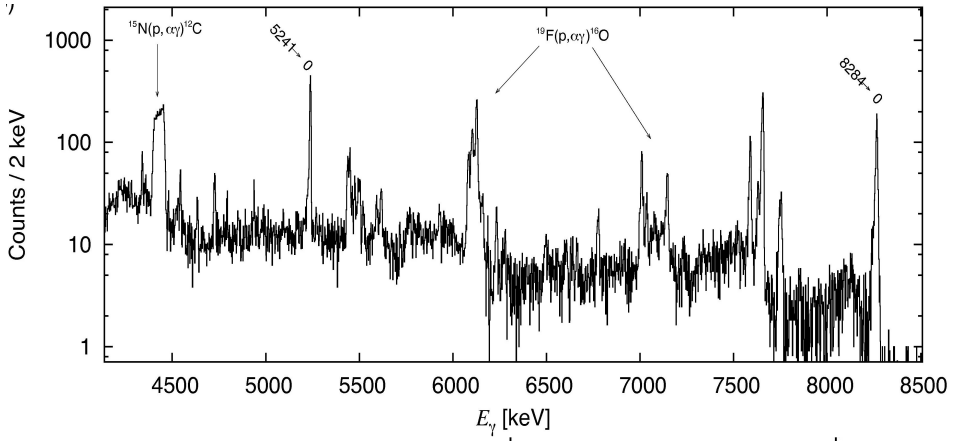
Resonanzstärken ωγ in den $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$- und $^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$-Reaktionen

278 keV

Normierungspunkt:

$\omega\gamma$ = (13.1 ± 0.6) meV

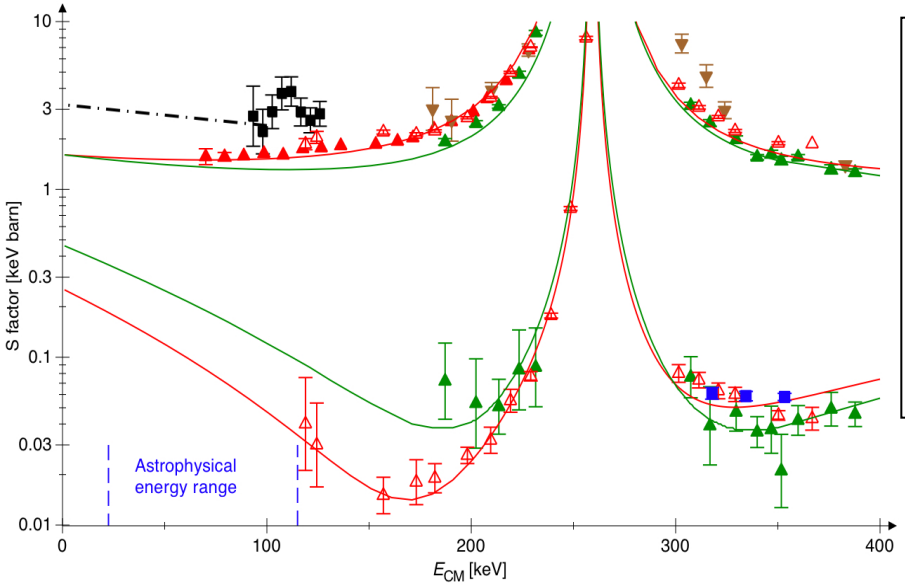
$$Y = \frac{\lambda^2}{2}\frac{1}{SP_{\text{eff}}}\omega\gamma$$



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]	$\stackrel{Def}{=}1$	—	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±0.07)·10^3	22.7±1.4	21.1±1.4 [46]
$^{15}N(p,\alpha\gamma)^{12}C$	897	1.57	(2.77±0.08)·10^4	362±20	293±38 [63]

→M. Marta et al., Phys. Rev. C (2010)

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



$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$ 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±0.12 keV barn (2009)

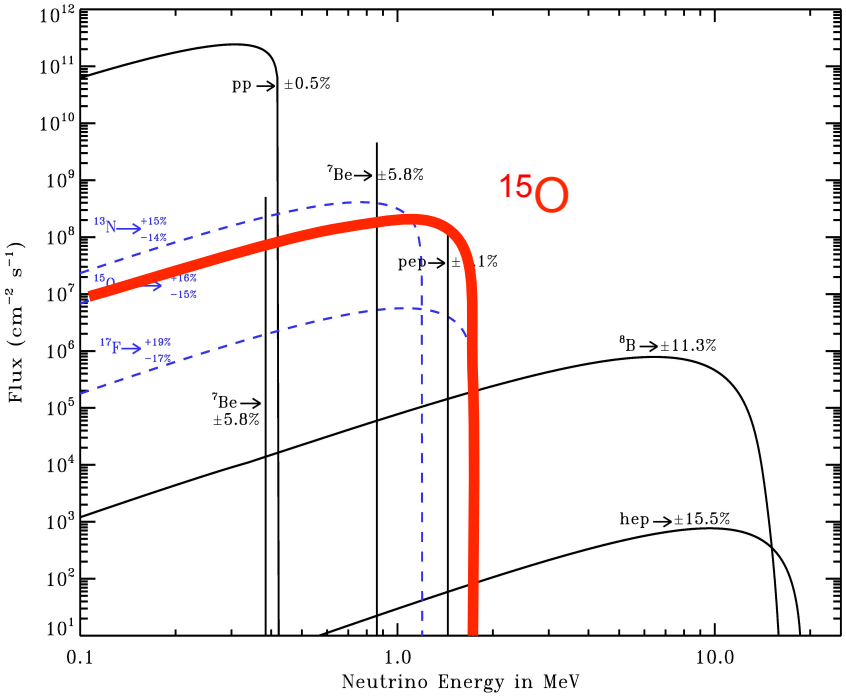
1. Unabhängige untere Schranke für das Alter des Universums: 14±2 Ga.

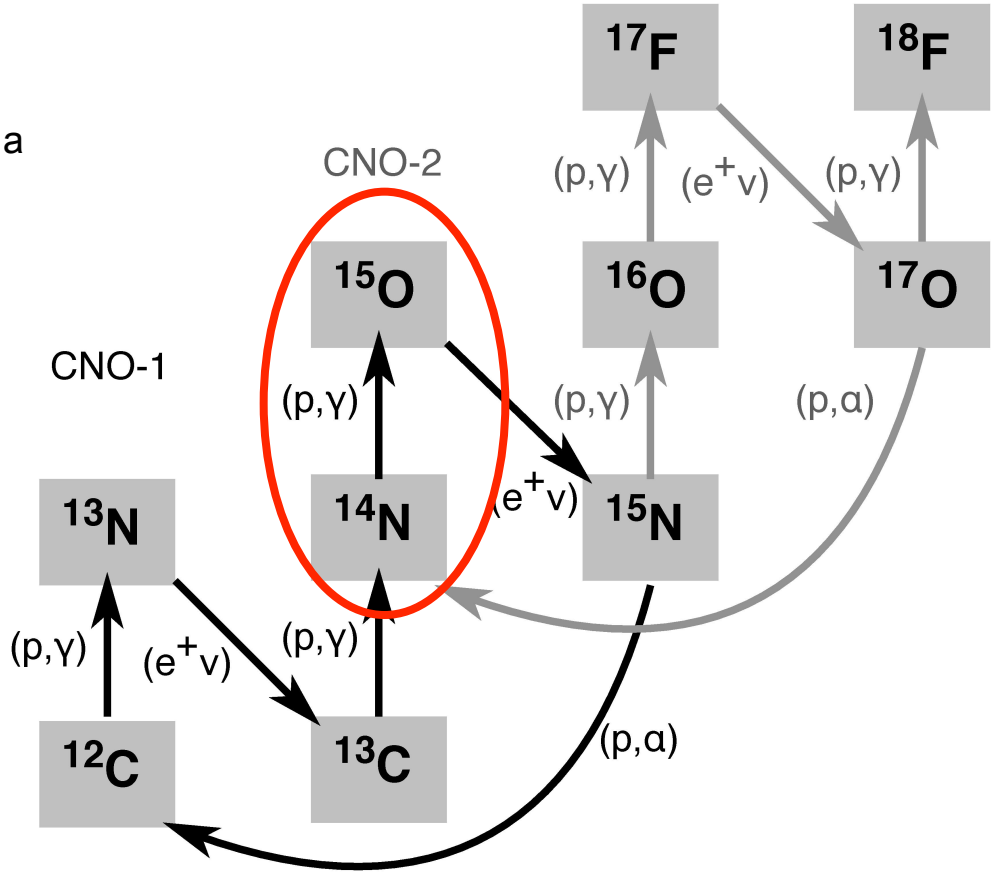
2. Bessere Reproduktion der Kohlenstoffhäufigkeiten in Roten Riesen.

3. Es ist möglich, den Stickstoffgehalt im Kern der Sonne über die emittierten CNO-Neutrinos zu bestimmen.

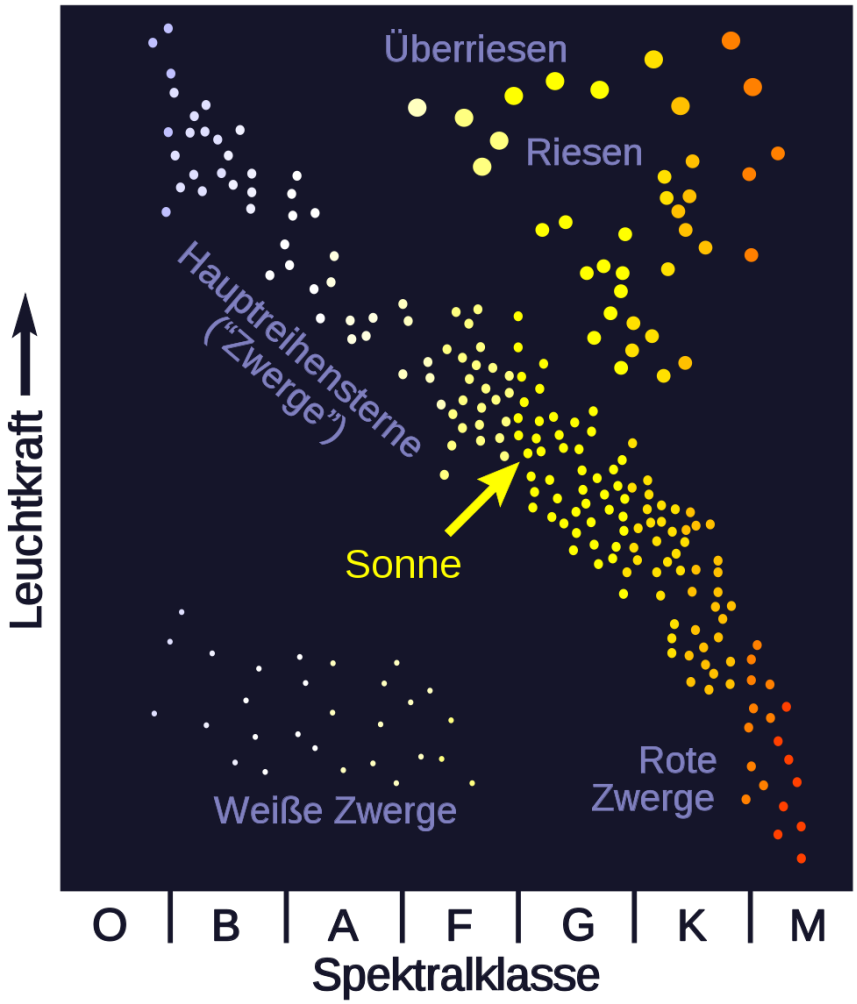
$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$ und ^{15}O-Neutrinos aus der Sonne

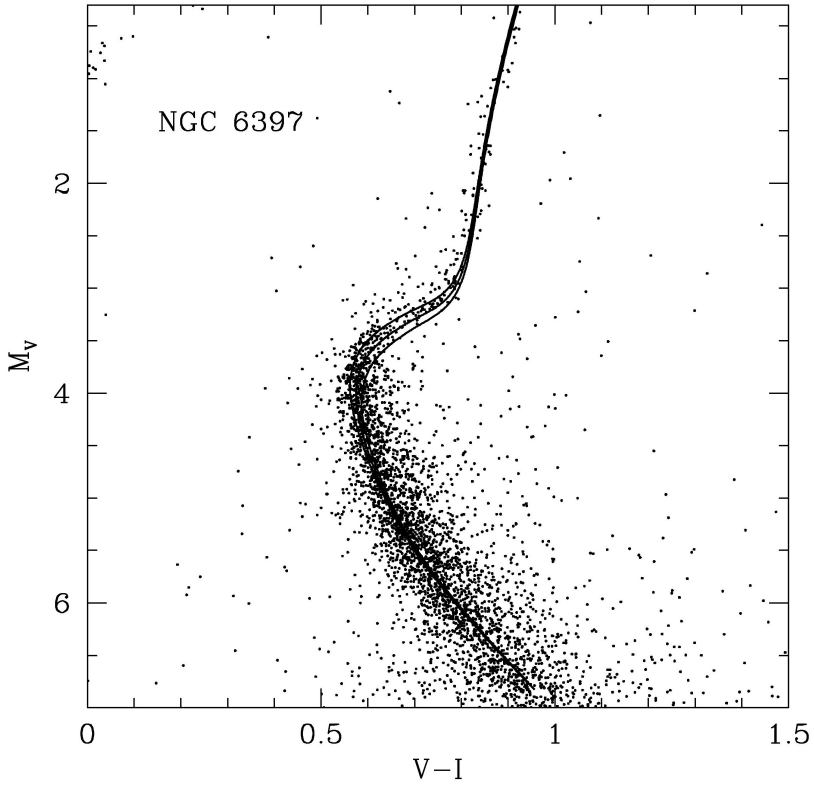
- $Q(\beta^+, {}^{15}O) = 2.754$ MeV
- Lebensdauer von ^{14}N im Sonneninnern 10^8 a
- Flaschenhals: $^{14}N(p,\gamma)^{15}O$
- $$\frac{\partial \ln \Phi_{\nu(\text{O-15})}}{\partial \ln S[{}^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}]} = 1$$



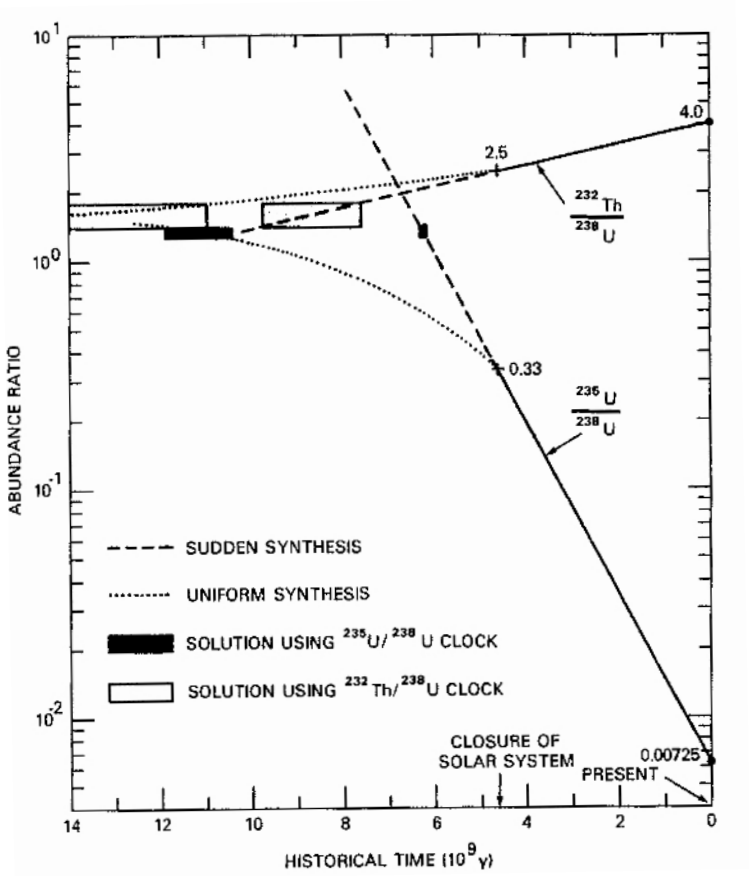
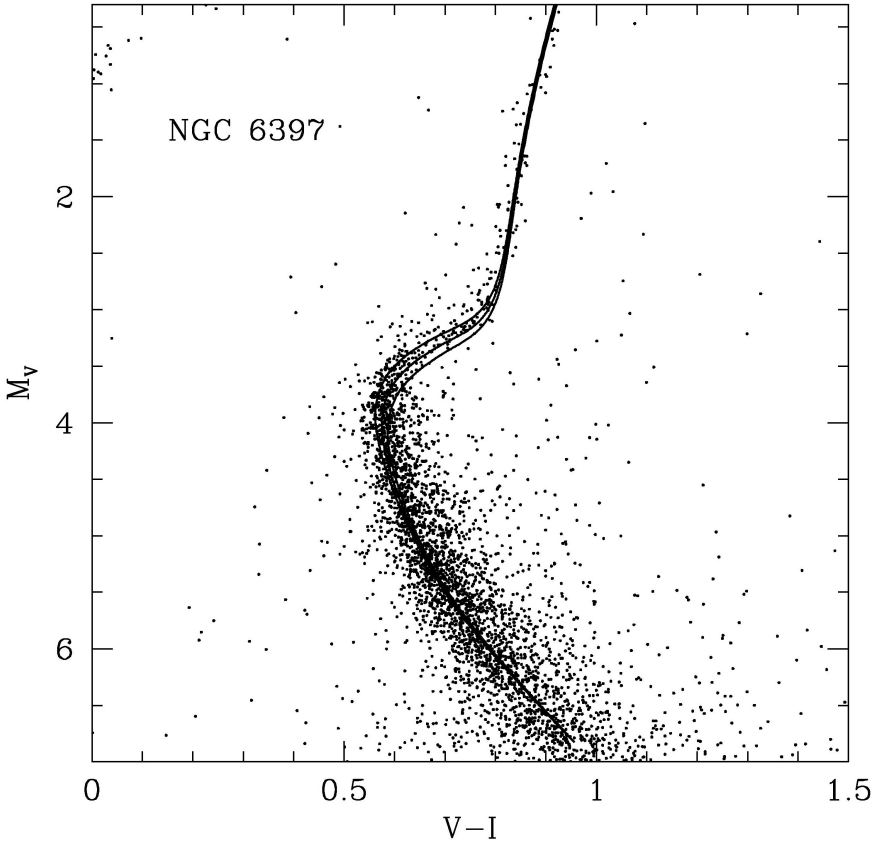


Altersbestimmung sehr alter Sterne (in Kugelsternhaufen)





→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe

Zusammenfassung

- Nukleokosmochronologie mithilfe von Uran und Thorium
- Bestimmung des Alters von Kugelsternhaufen mittels des CNO-Zyklus