

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

1. Vorlesung, 08.04.2013

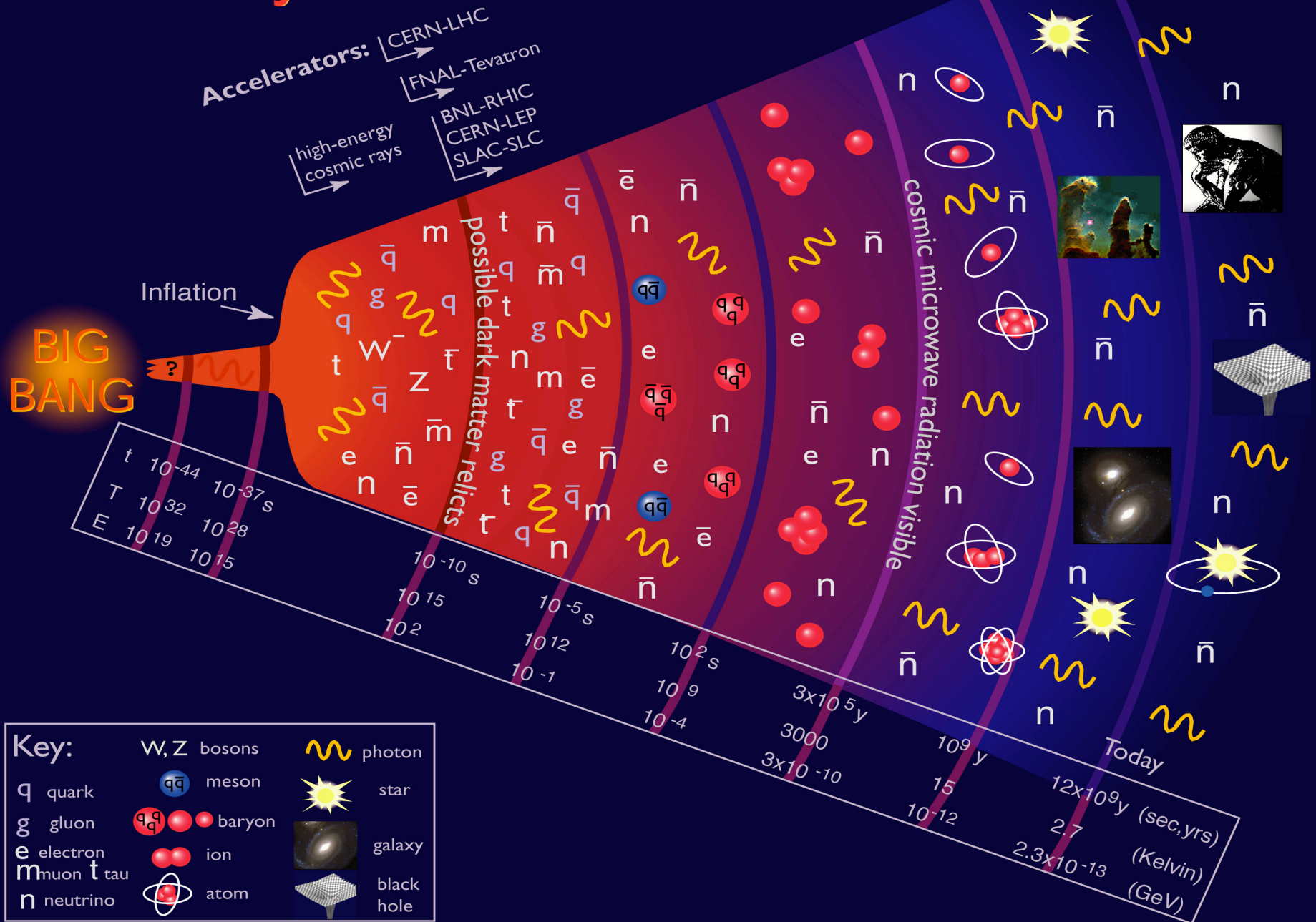


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



- ◆ **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

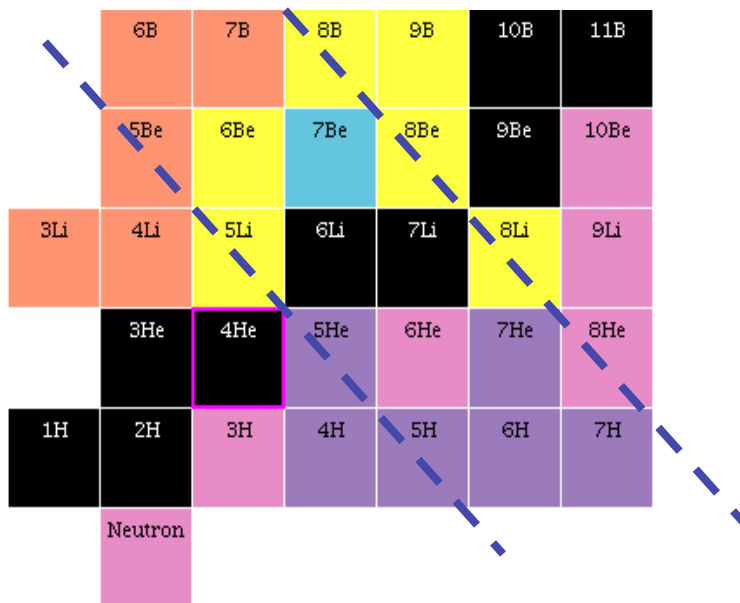
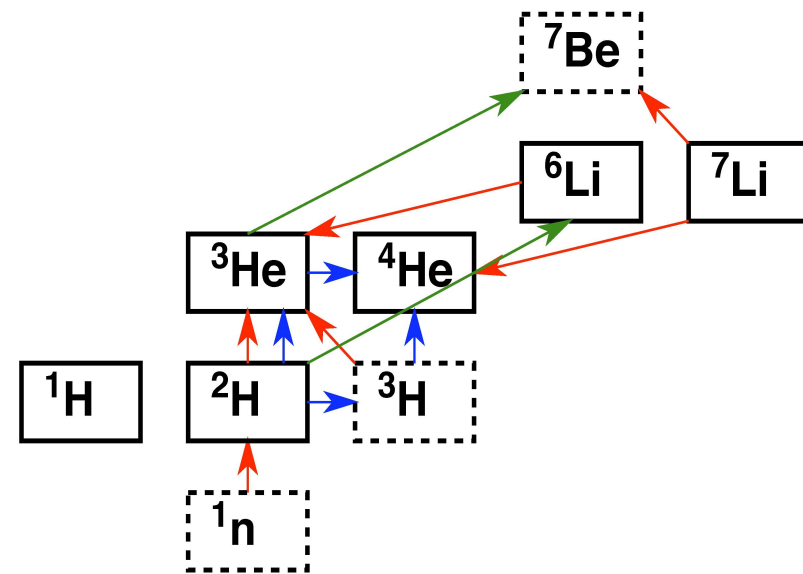
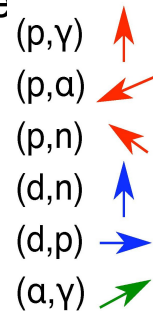
History of the Universe



- ◆ 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

Entstehung von ^2H , ^3He , $^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$, vielleicht auch ^6Li parallel zu ^4He

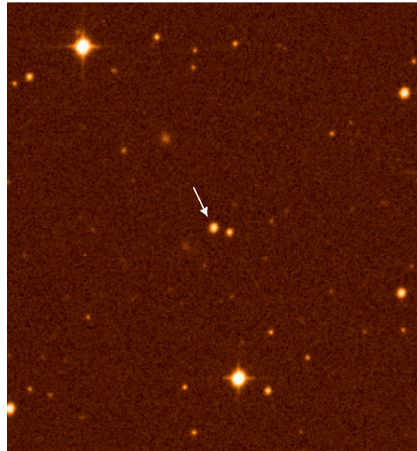
- Reaktionsnetzwerk bestimmt Häufigkeiten
- Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung von Eingabewerten aus Experiment und Theorie (Mikrokosmos)
- ${}^7\text{Be}$ (Halbwertszeit 53 d) wird zu ${}^7\text{Li}$
- Keine Entstehung von Kernen mit $A > 7$



- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in ${}^4\text{He}$ gebunden
- Coulombschwelle $\sim Z_1 Z_2$ behindert den Einfang von ${}^4\text{He}$
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei ${}^7\text{Li}$

Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-„Plateau“

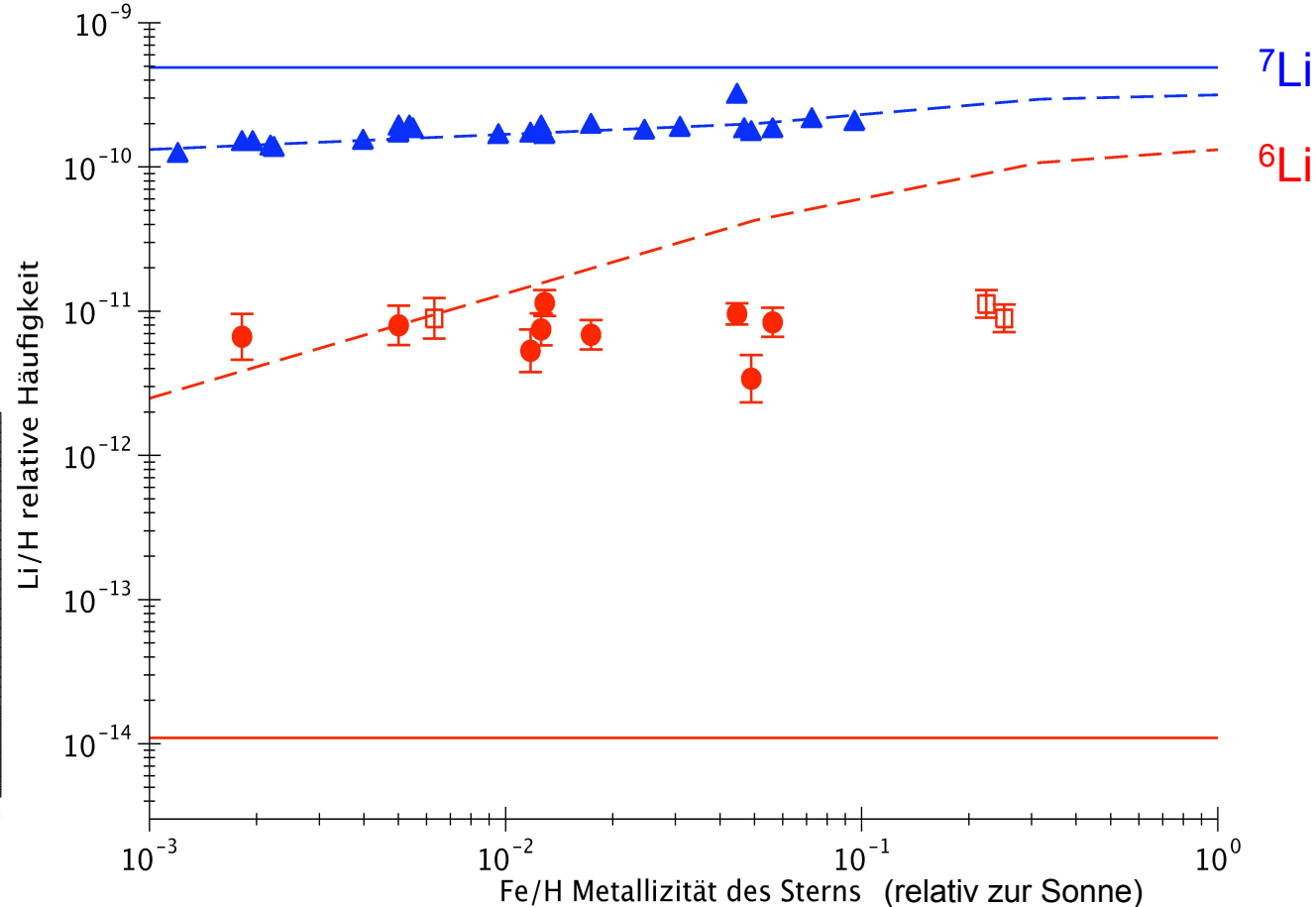
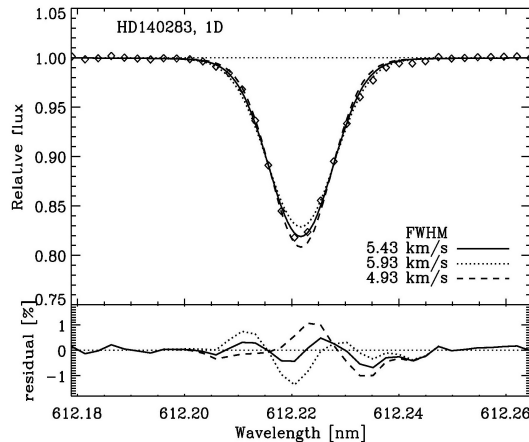
- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit $A > 7$
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null



The Very Metal-Deficient Star HE 0107-5240

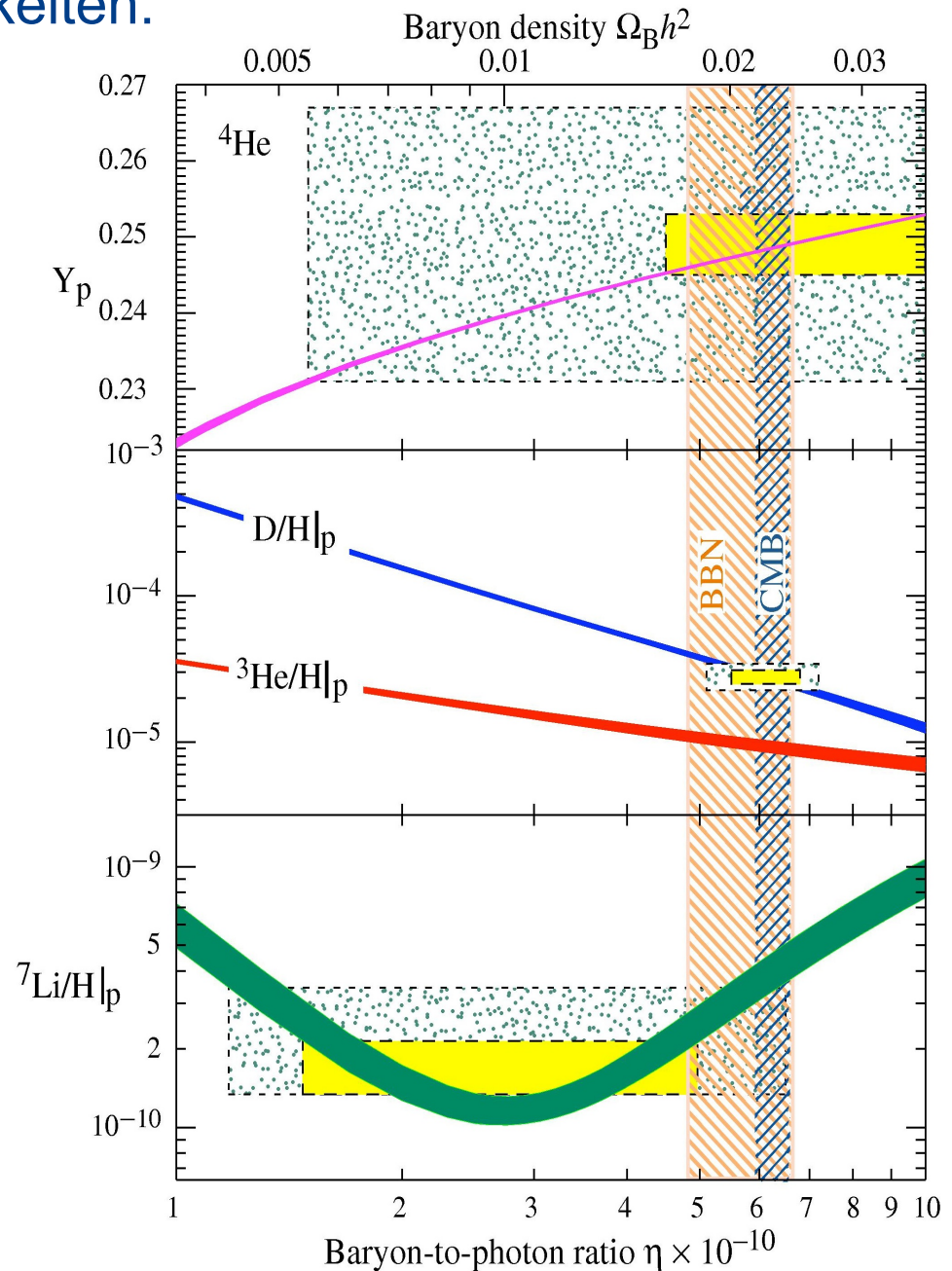
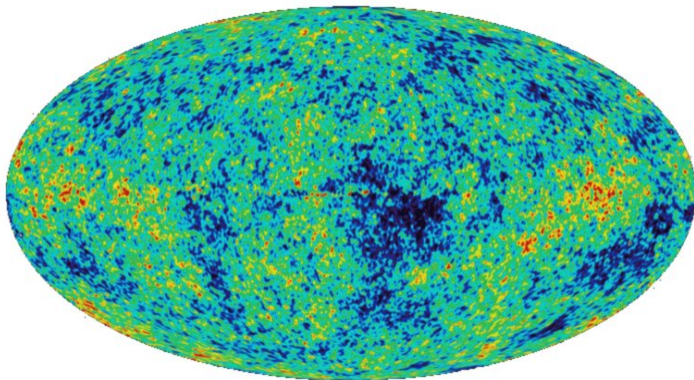
ESO PR Photo 25a/02 (30 October 2002)

© European Southern Observatory



Gesamtschau der Nuklidhäufigkeiten: ^4He , ^2H , ^7Li

Vorhersage und Beobachtung
stimmen einigermaßen überein für
diese drei Nuklide!



Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

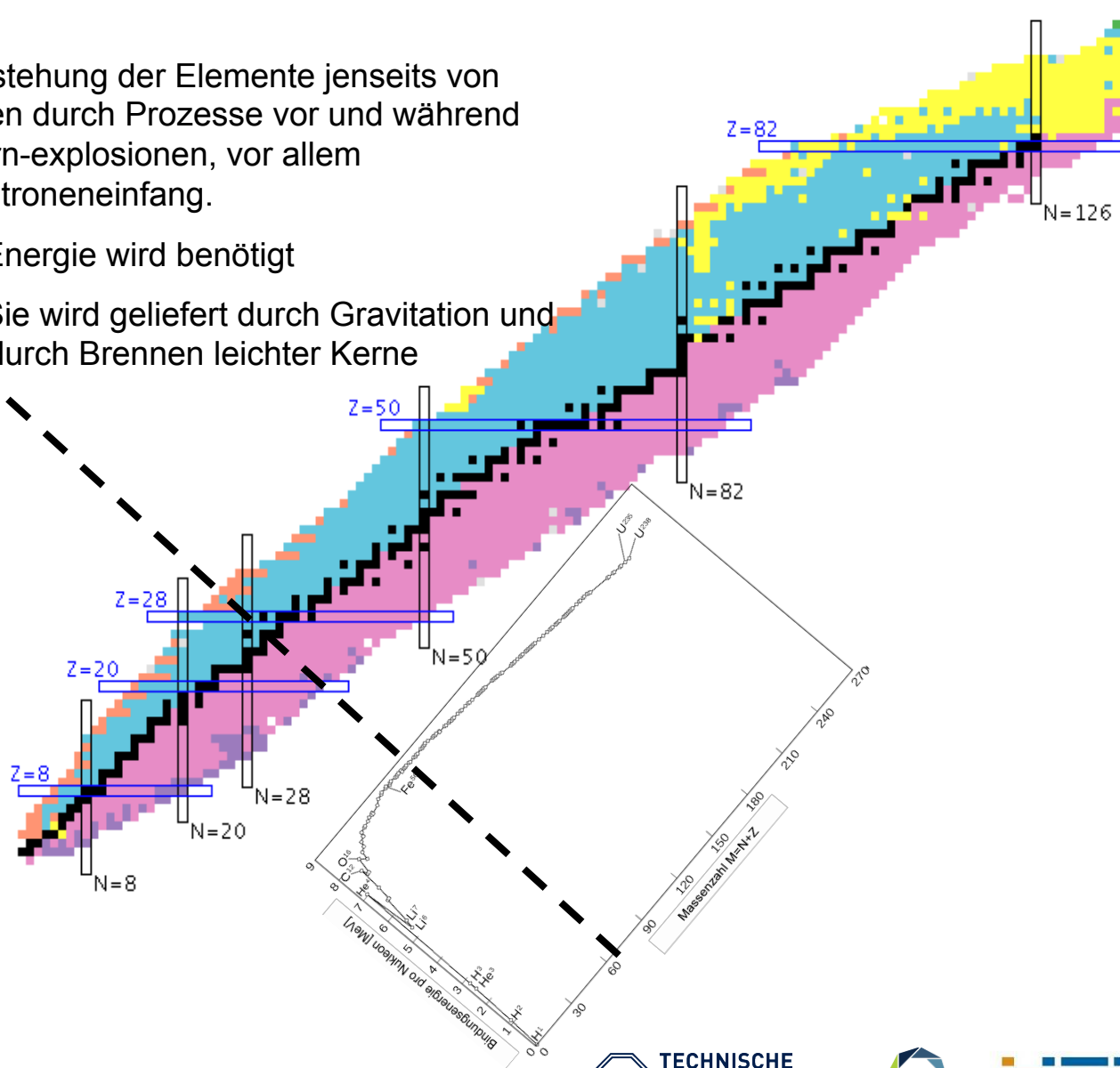
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

→ Energie wird benötigt

→ Sie wird geliefert durch Gravitation und durch Brennen leichter Kerne

Entstehung der Elemente bis zum Eisen durch Fusion ("Brennen") von leichten Kernen zu schwereren Kernen, im Urknall oder in Sternen.

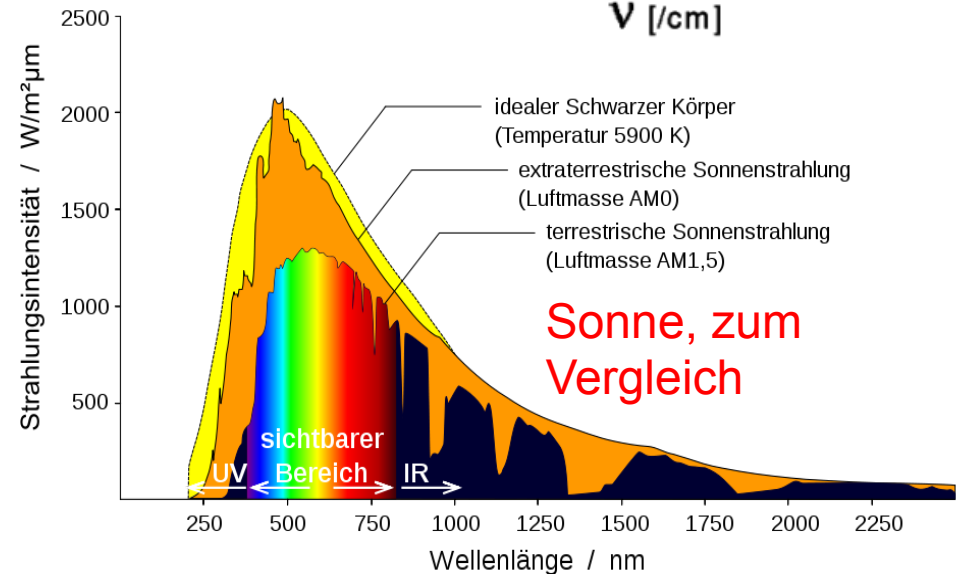
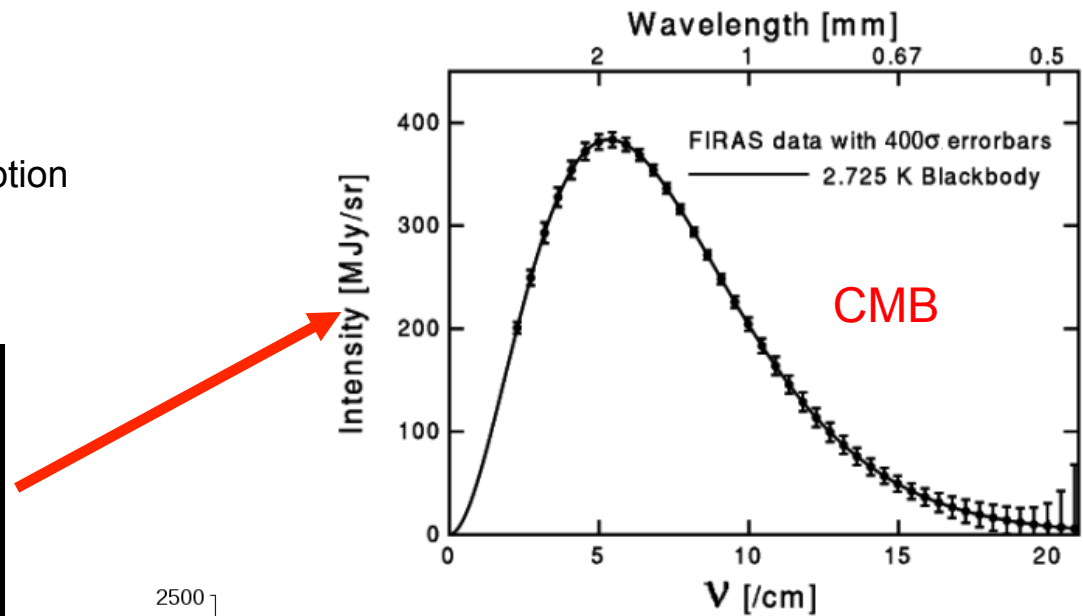
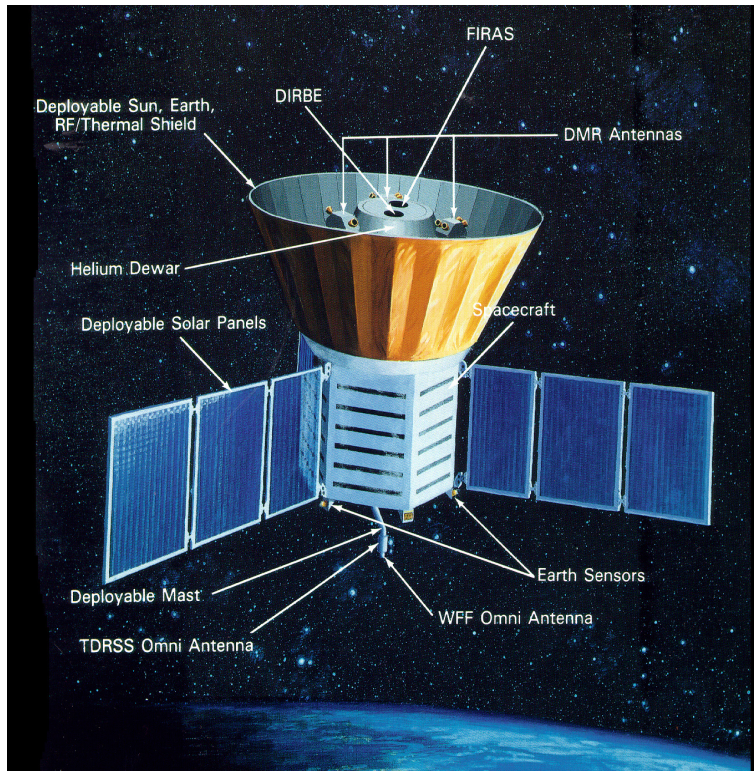
→ Energieproduktion



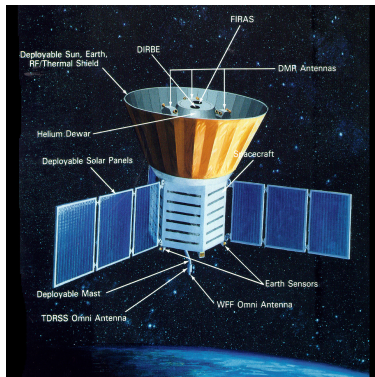
- ◆ Einführung in die Kosmologie
- ◆ Weltmodelle und kosmologische Inflation
- ◆ Thermische Geschichte des Universums
- ◆ Urknall-Nukleosynthese
- ◆ Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- ◆ **Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung**
- ◆ Supernovae als kosmische Standardkerzen
- ◆ Neutronensterne
- ◆ Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- ◆ Altersbestimmung des Universums
- ◆ Fundamentale Physik und die Sonne

Isotropie und Anisotropie, gesehen mit COBE 1992: Smoot, Mather (1)

- COBE = COsmic Background Explorer
- Satellit, schaltet atmosphärische Absorption aus
- Perfektes Schwarzkörper-Spektrum (besser als z.B. Sonne)



Isotropie und Anisotropie, gesehen mit COBE 1992: Smoot, Mather (2)

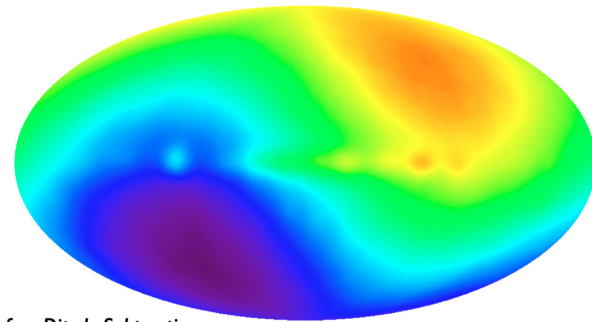


10^{-3} Dipol-Anisotropie

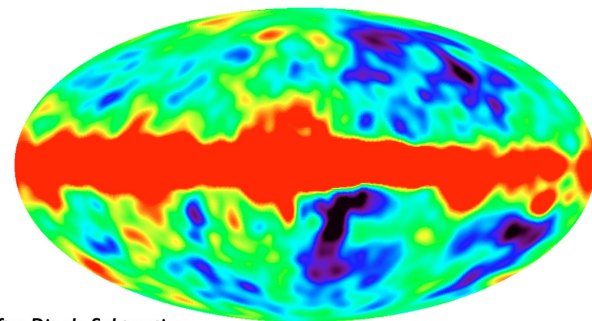


Doppler-Effekt aus der Bewegung von COBE relativ zum Mikrowellen-Hintergrund

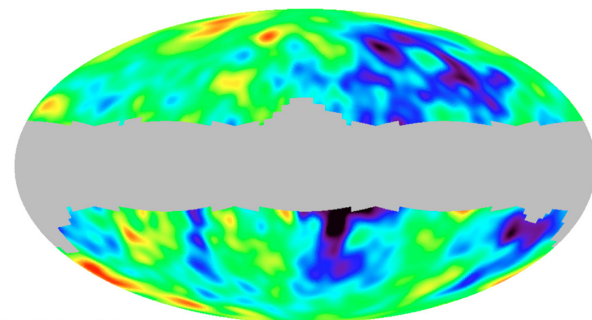
DMR 53 GHz Maps



Before Dipole Subtraction

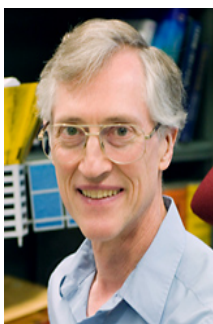
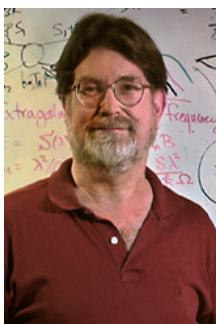


After Dipole Subtraction



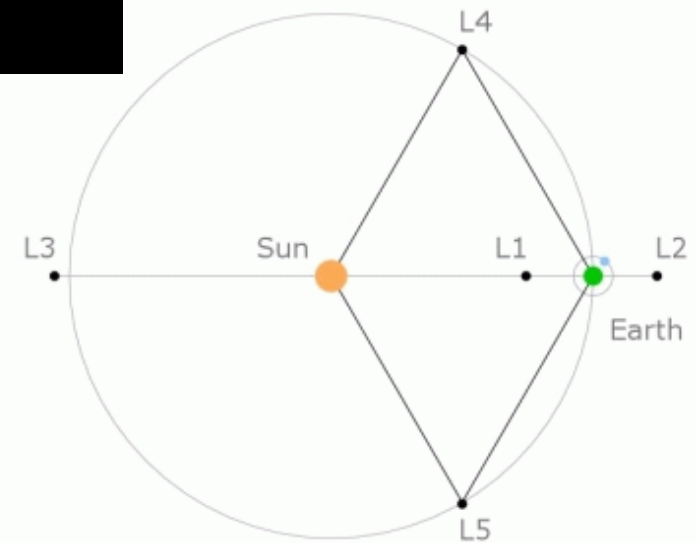
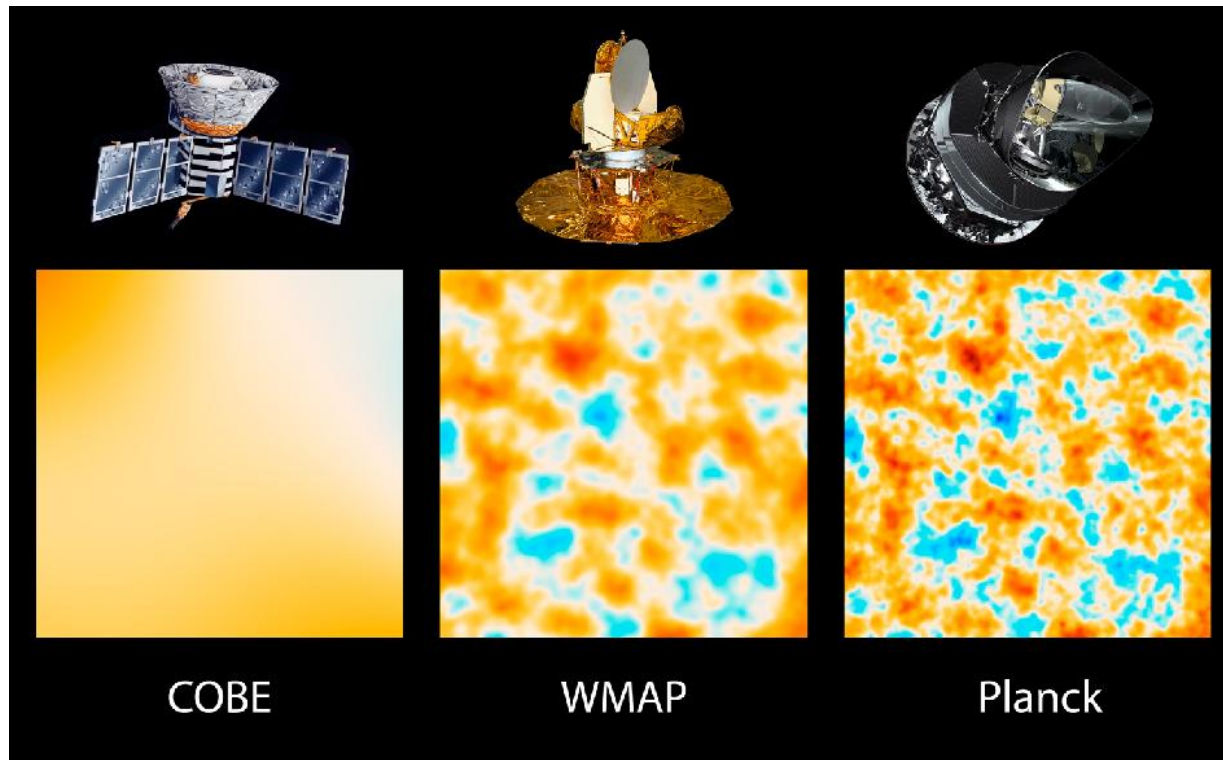
After Galaxy Subtraction

Nobelpreis 2006



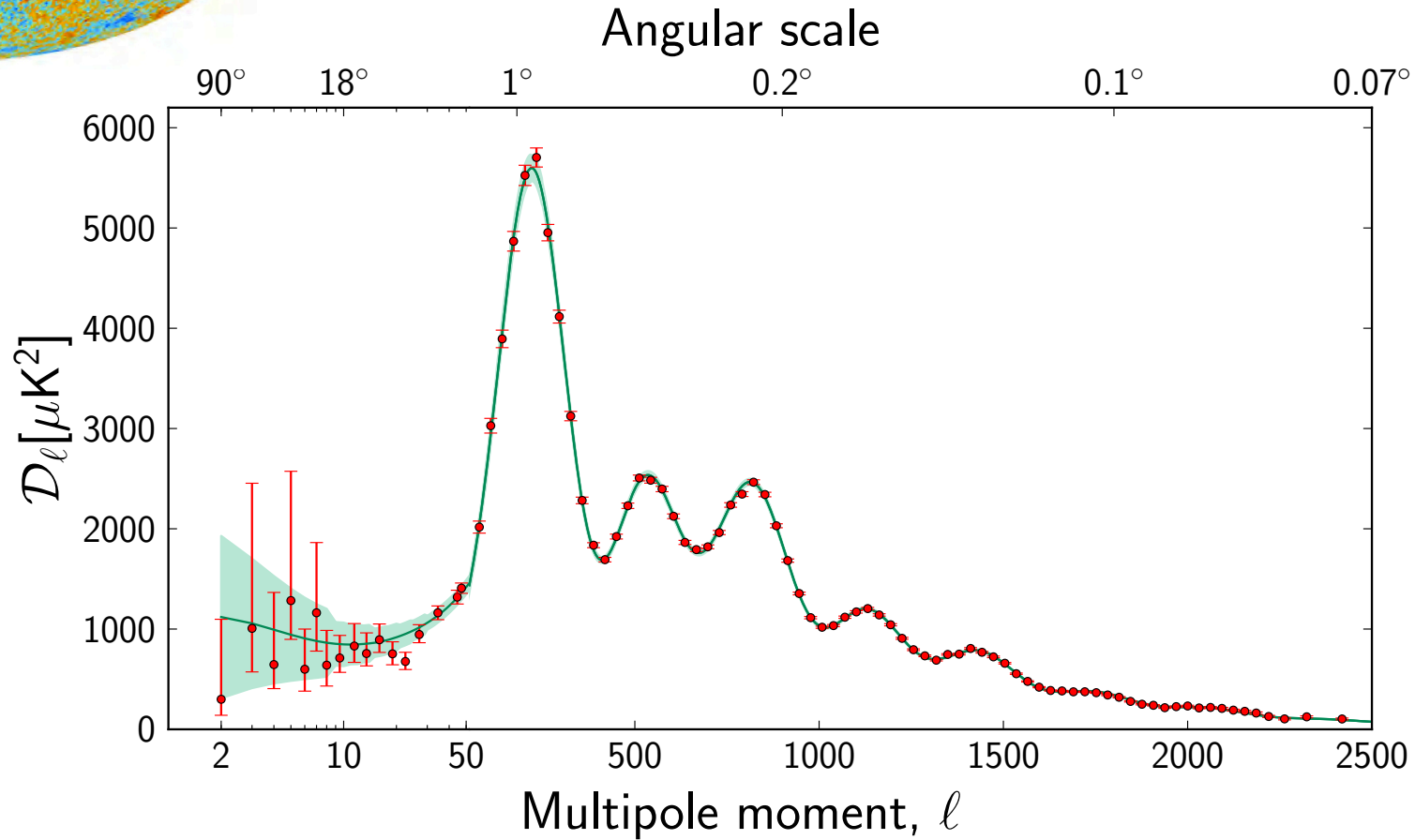
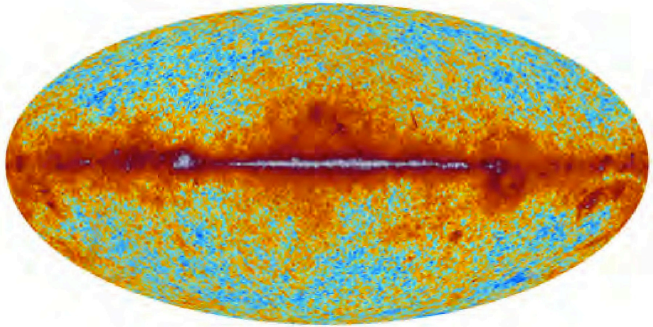
10^{-5} kosmische Anisotropie

Planck-Satellit 2013: Power-Spektrum des Mikrowellen-Hintergrunds

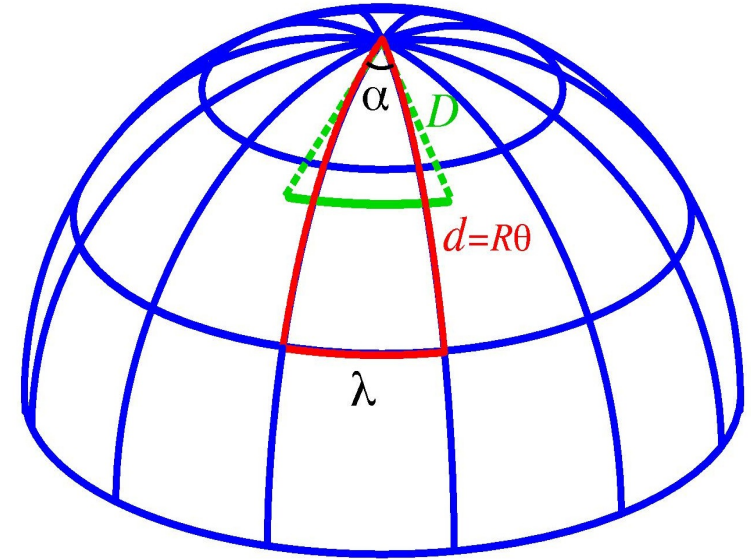
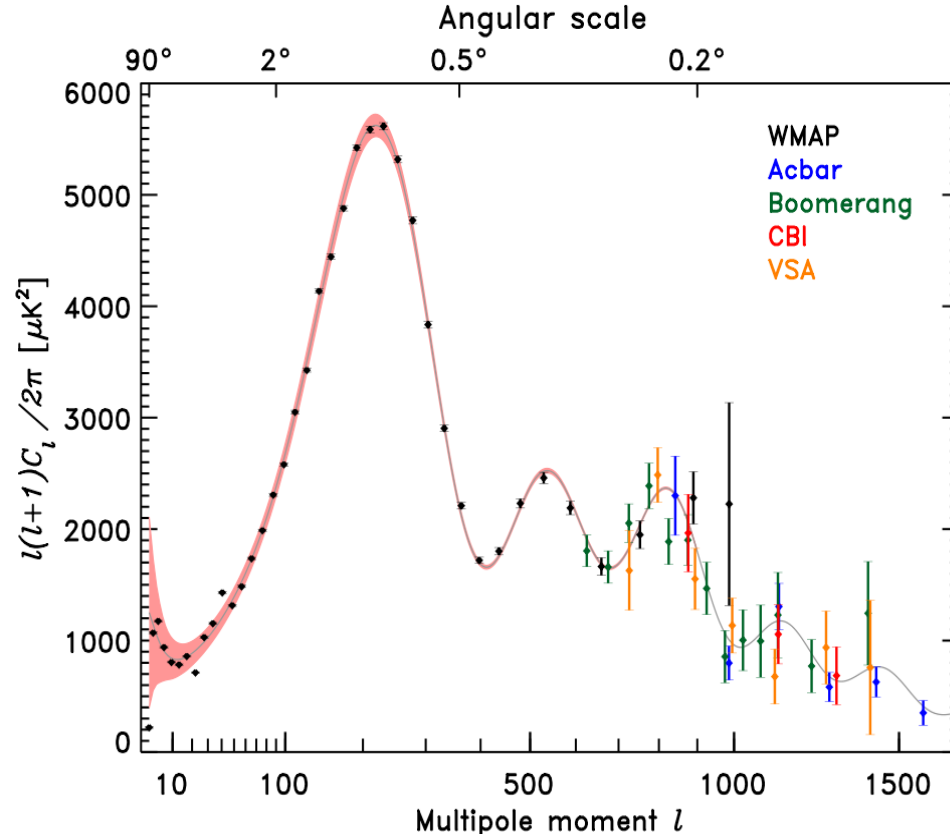


Planck-Satellit 2013: Power-Spektrum des Mikrowellen-Hintergrunds

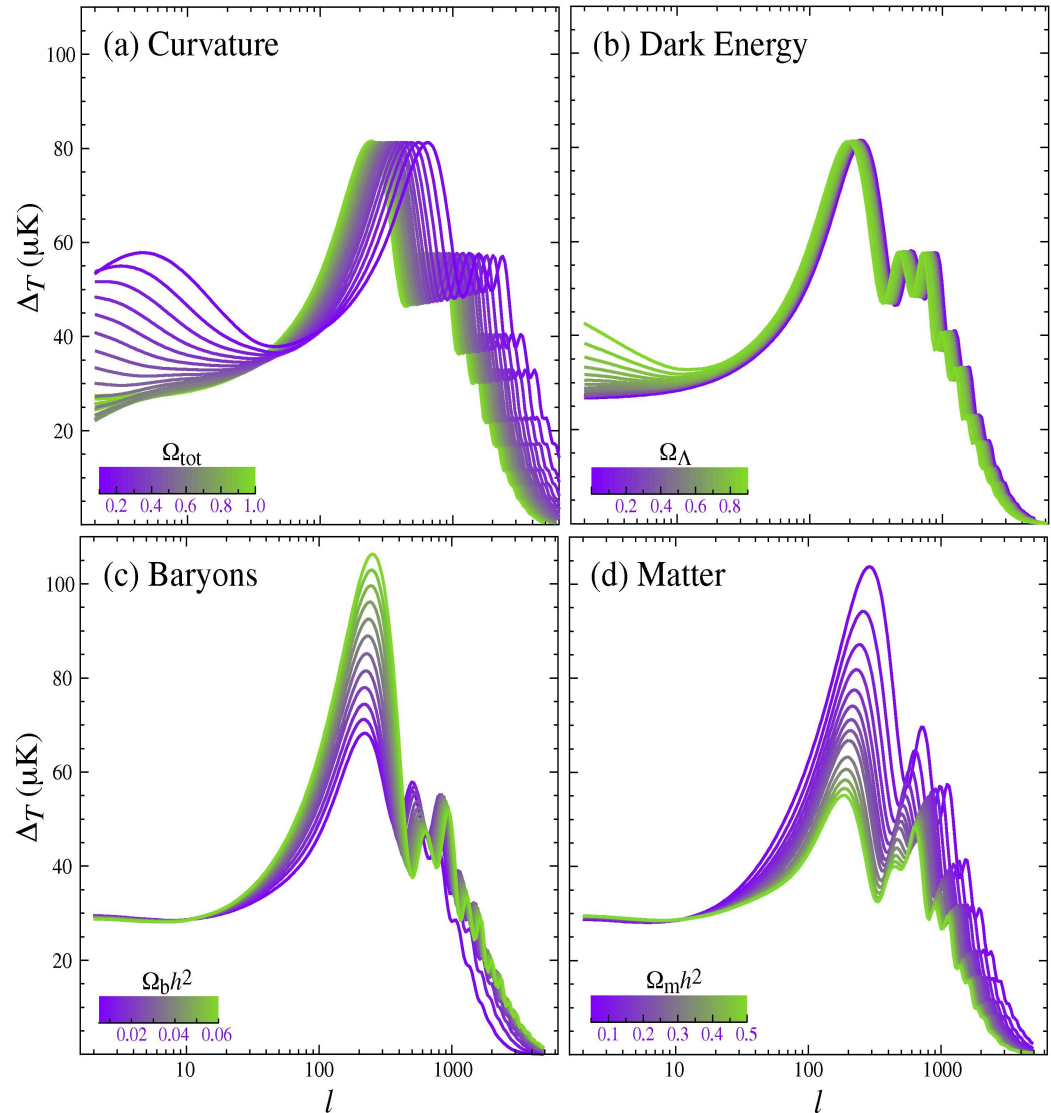
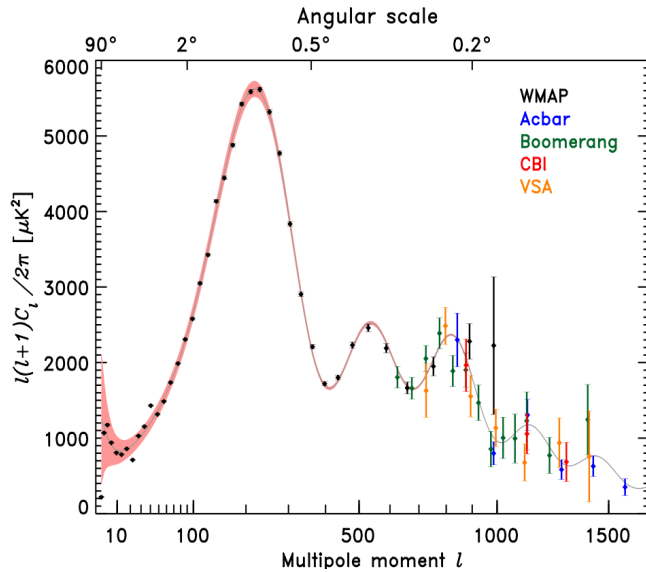
30 GHz



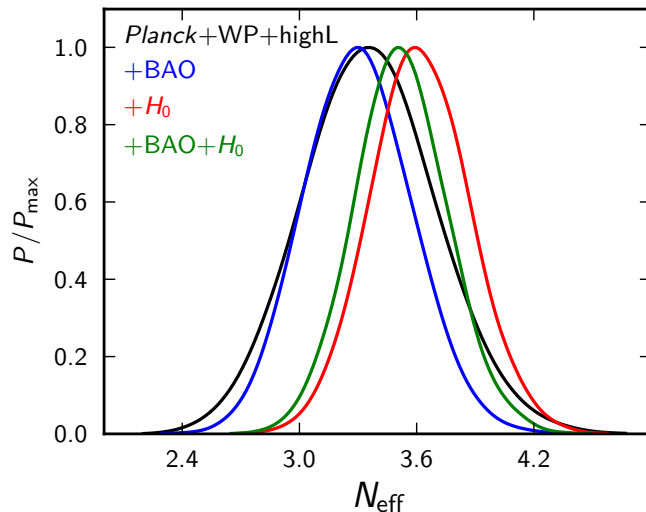
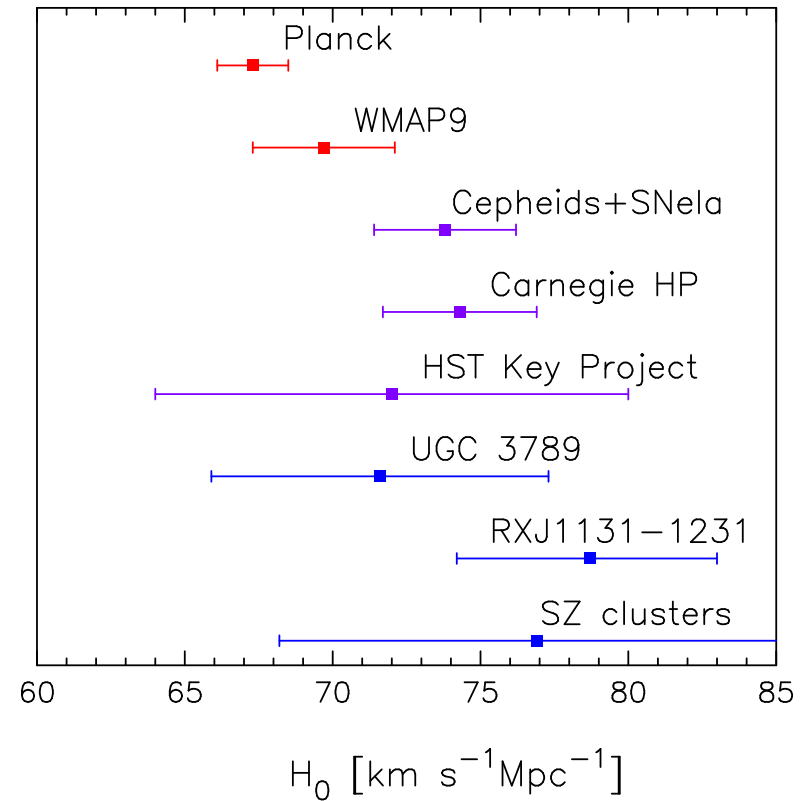
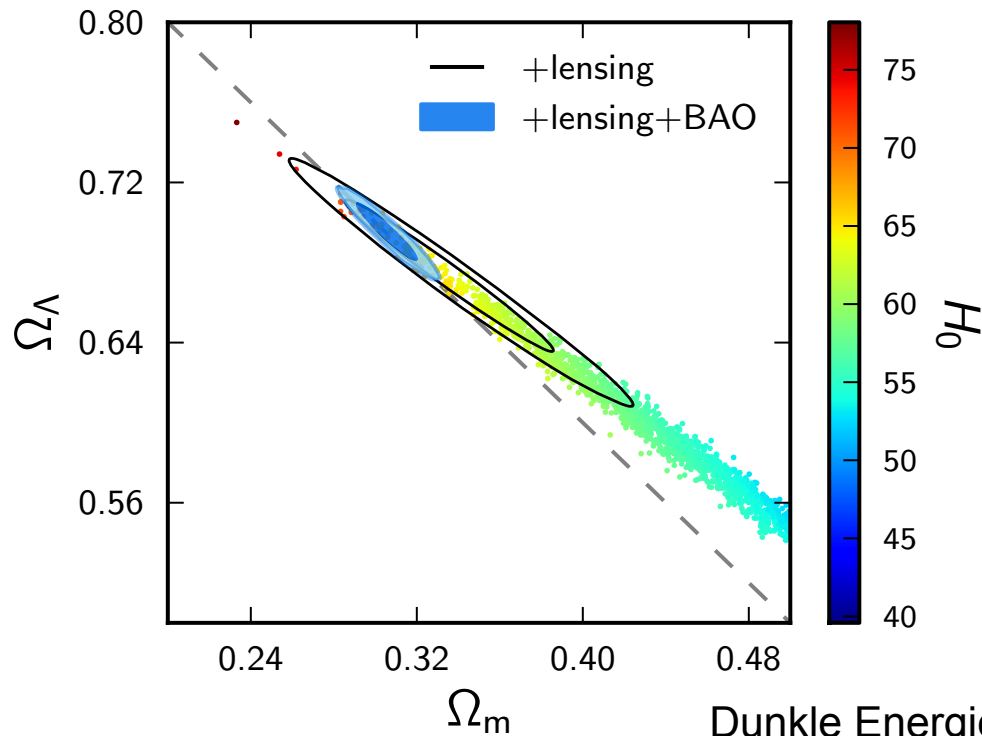
Zur Interpretation des ersten Peaks im Power-Spektrum



Zur Interpretation der weiteren Peaks im Power-Spektrum



Planck-Satellit 2013: Kosmologische Schlussfolgerungen



Dunkle Energie
 Ω_Λ versus
Materie Ω_m

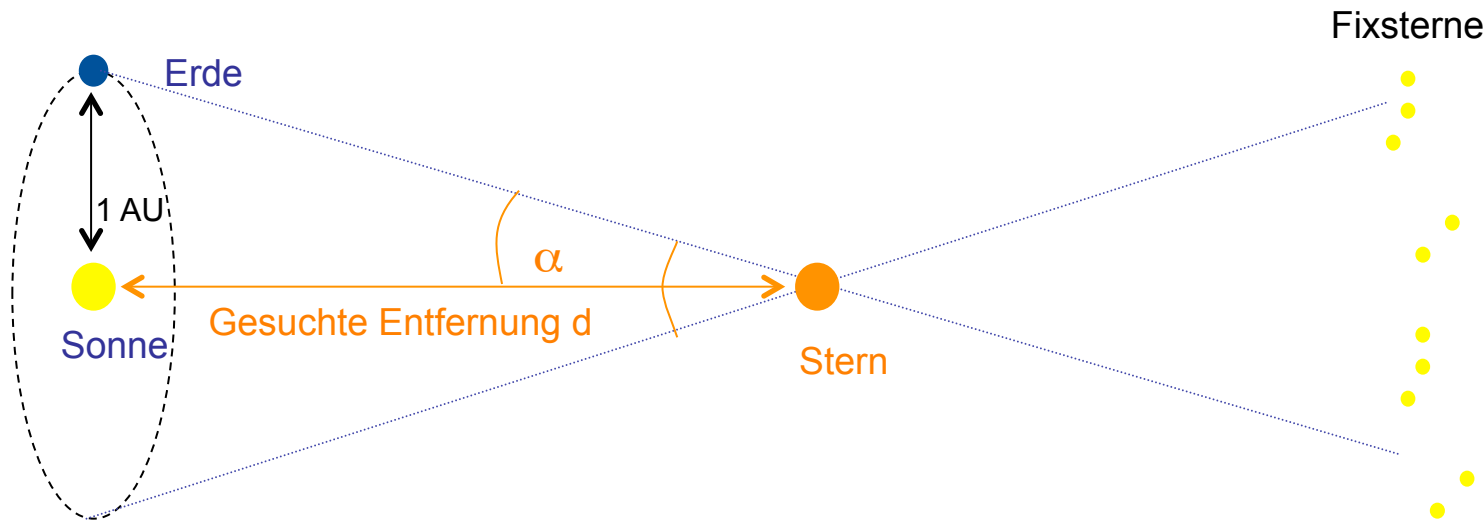
Hubble-Konstante H_0

Anzahl der Neutrino-Flavours N_{eff}

- ◆ 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

Entfernungsmessung mittels Parallaxe, Prinzip

Mittlerer
Erdbahnradius
= 1 AU
(astronomical
unit)



$$d = \frac{1 \text{ AU}}{\tan \alpha}$$

- Gute Winkelauflösung vonnöten
- Lange Basislinie hilft (→säkulare Parallaxe)
- Definition der Längeneinheit parsec (pc, Parallaxsekunde):
 $1 \text{ pc} = 1 \text{ AU} / \tan 1'' \text{ (Bogensekunde)} = 2.06 \cdot 10^5 \text{ AU} = 3.26 \text{ Lichtjahre}$
- 1838 von Bessel auf 61 Cyg angewendet: $\alpha = 0.314''$
 $d = 1 / 0.314 \text{ pc} = 3.18 \text{ pc} = 10.4 \text{ Lichtjahre}$

Bestimmung der Entfernung des 61^{sten} Sterns des Schwans. Von Herrn Geheimen-Rath und Ritter Bessel.

Als es Bradley gelungen war, seine Beobachtungen in *Kern* und *Wansted*, welche die Entdeckungen der Aberration und Nutation herbeiführten, durch diese allein genügend zu erklären, ohne dazu der Annahme einer jährlichen Parallaxe der beob-

ist nicht zu bezweifeln; allein wenn eine Untersuchung über die jährliche Parallaxe eines Fixsterns unternommen werden soll, so sind sie dennoch die einzigen, welche seine Wahl leiten können.

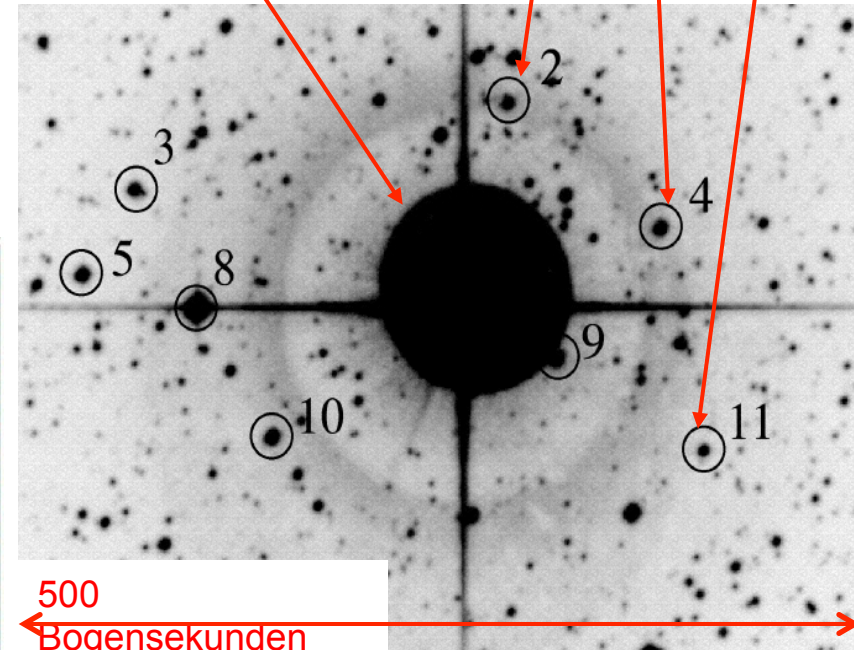
Entfernungsmessung mittels Parallaxe, moderne Anwendung



Parallaxenmessungen mit Hubble Space Telescope, auf 10^{-4} Bogensekunden genau:
G. Benedict et al., Astron. J. 133, 1810 (2007)

Zu bestimmender
variabler Stern (I Car)

Referenzsterne
2-11



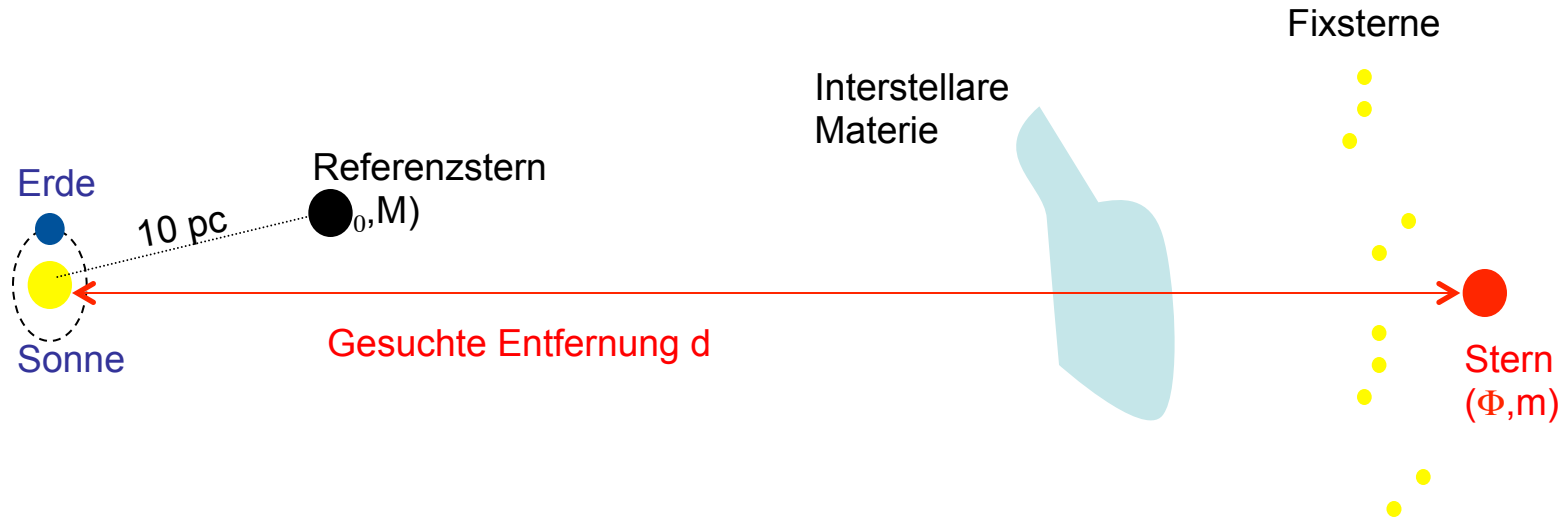
Erdgestützt (8 m)

Hubble-Satellit (2.4 m)



Karte aus Digital Sky Survey (nur zur Illustration)

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

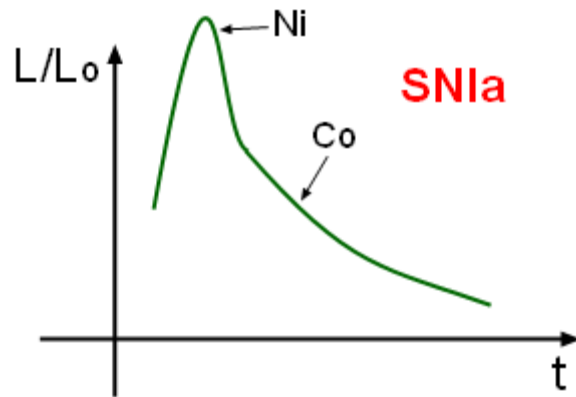
$$d = 10 \text{ pc} \cdot 10^{(m-M)/5}$$

Standardkerzen mit empirischer Kalibrierung sind zum Beispiel:

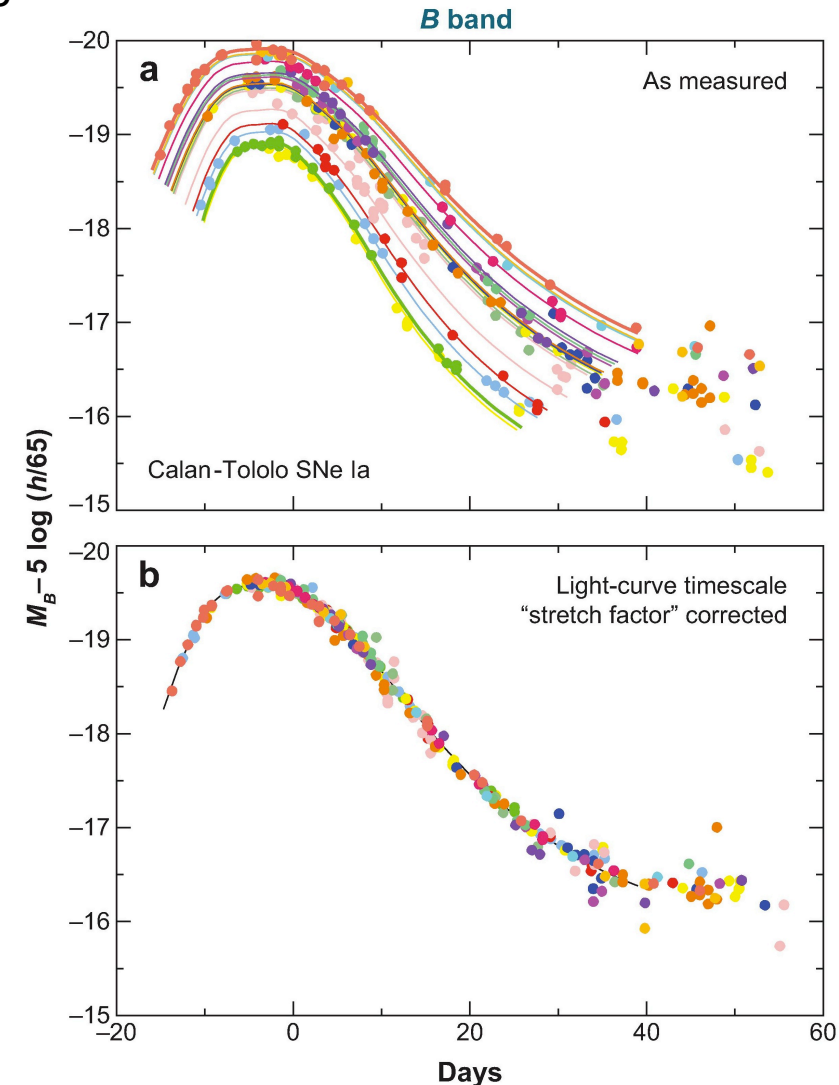
- Veränderliche Sterne (Cepheiden, M hängt linear von der Periode ab)
- Supernovae vom Typ Ia (Helligkeit M im Maximum hängt von der Form der Lichtkurve ab)

Standardisierung der Lichtkurve von Supernovae Ia

- Untersuchung einer Vielzahl von Supernovae vom Typ Ia
- Sehr helle, recht häufig auftretende Ereignisse
- Kalibrierung anhand der Form der Lichtkurve

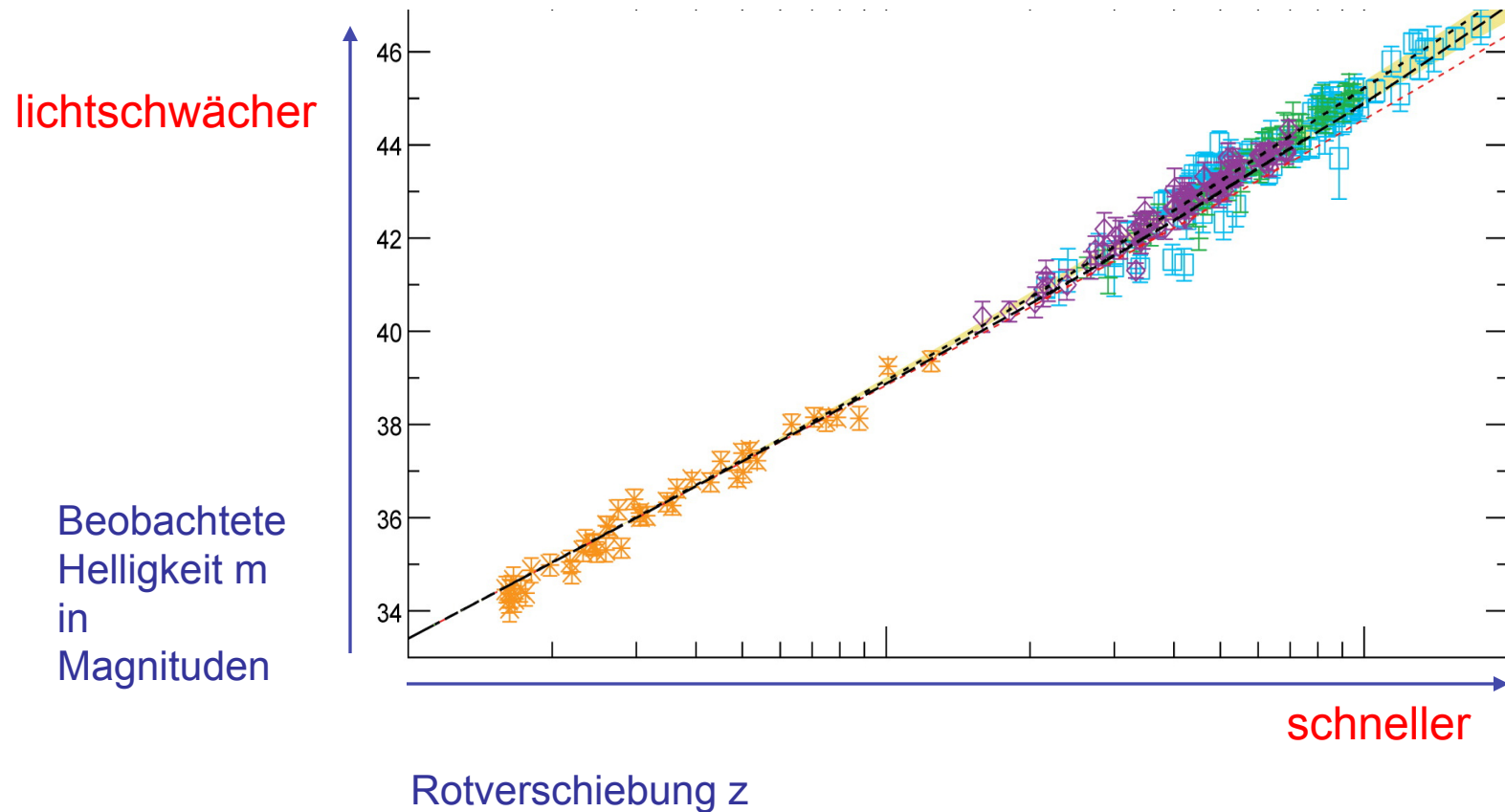


	⁵⁶ Ni 6.075 D ε: 100.00%	⁵⁷ Ni 35.60 H ε: 100.00%	⁵⁸ Ni STABLE 68.077%
	⁵⁵ Co 17.53 H ε: 100.00%	⁵⁶ Co 77.236 D ε: 100.00%	⁵⁷ Co 271.74 D ε: 100.00%
	⁵⁴ Fe STABLE 5.845%	⁵⁵ Fe 2.744 Y ε: 100.00%	⁵⁶ Fe STABLE 91.754%
	⁵³ Mn 3.74E+6 Y	⁵⁴ Mn 312.12 D	⁵⁵ Mn STABLE

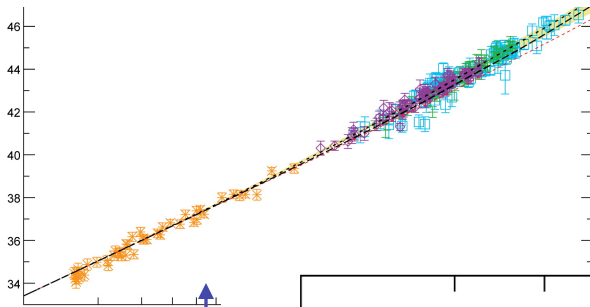


Entfernungsmessung mittels Standardkerze: Supernova Ia

- Supernova vom Typ Ia = Weißer Zwerg, der Material von einem Begleitstern ansaugt
- Explosives Kohlenstoff- und Sauerstoff-Brennen
- Sehr helle, recht häufig auftretende Ereignisse
- Referenzhelligkeit M empirisch kalibrierbar (durch Lichtkurve, Infrarotemission)



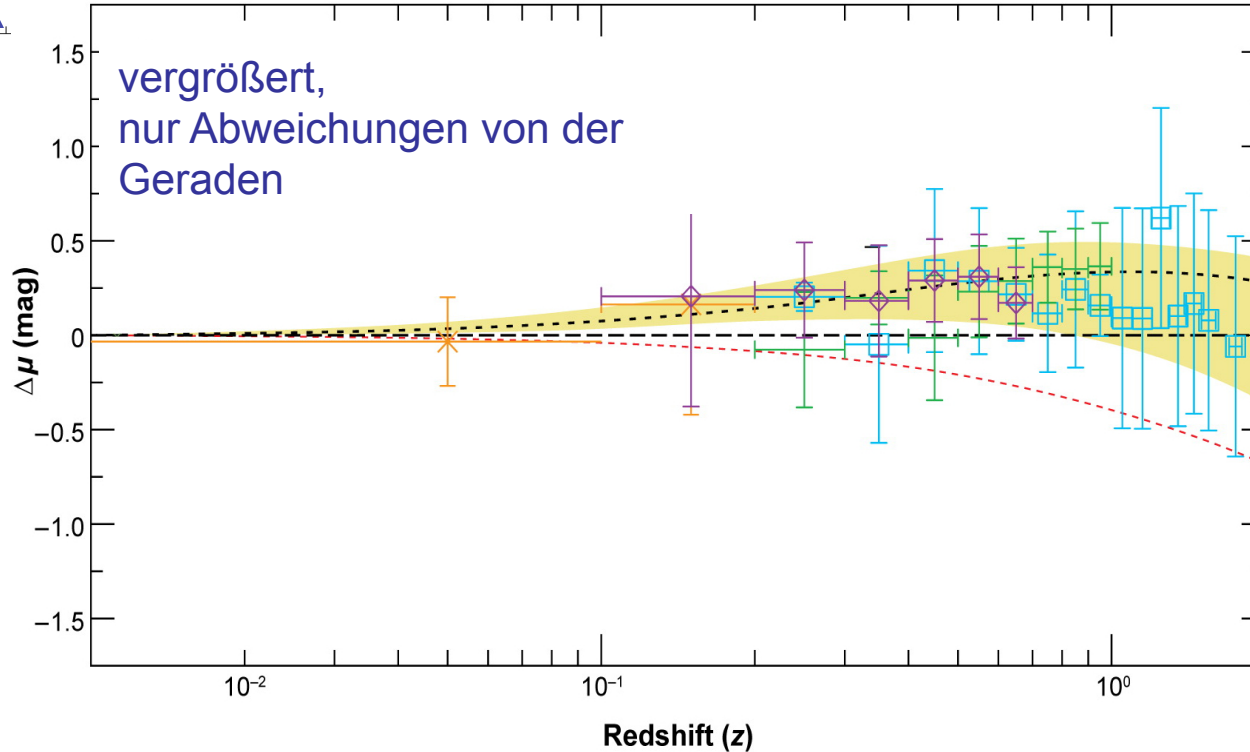
Entfernungsmessung und Kosmologie (1)



Weit entfernte Supernovae sind
lichtschwächer als erwartet!
Evidenz für eine kosmologische
Konstante $\Omega_{\Lambda} > 0$.

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

Licht-
schwächer

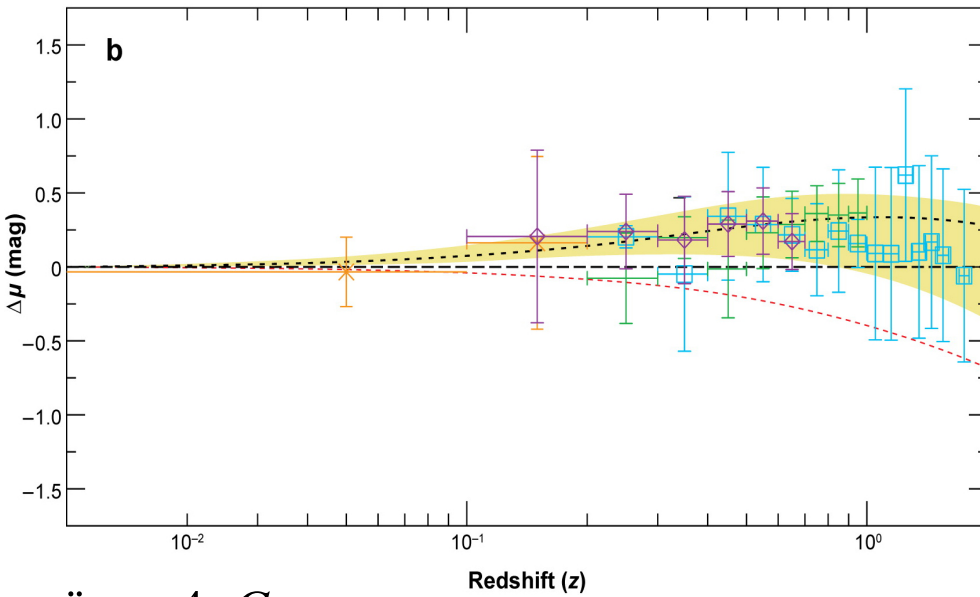


$$\Omega_M = 0.3, \Omega_{\Lambda} = 0.7$$

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

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

Entfernungsmessung und Kosmologie (2)



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

Physik-Nobelpreis 2011 für diese Entdeckung!



Saul Perlmutter

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



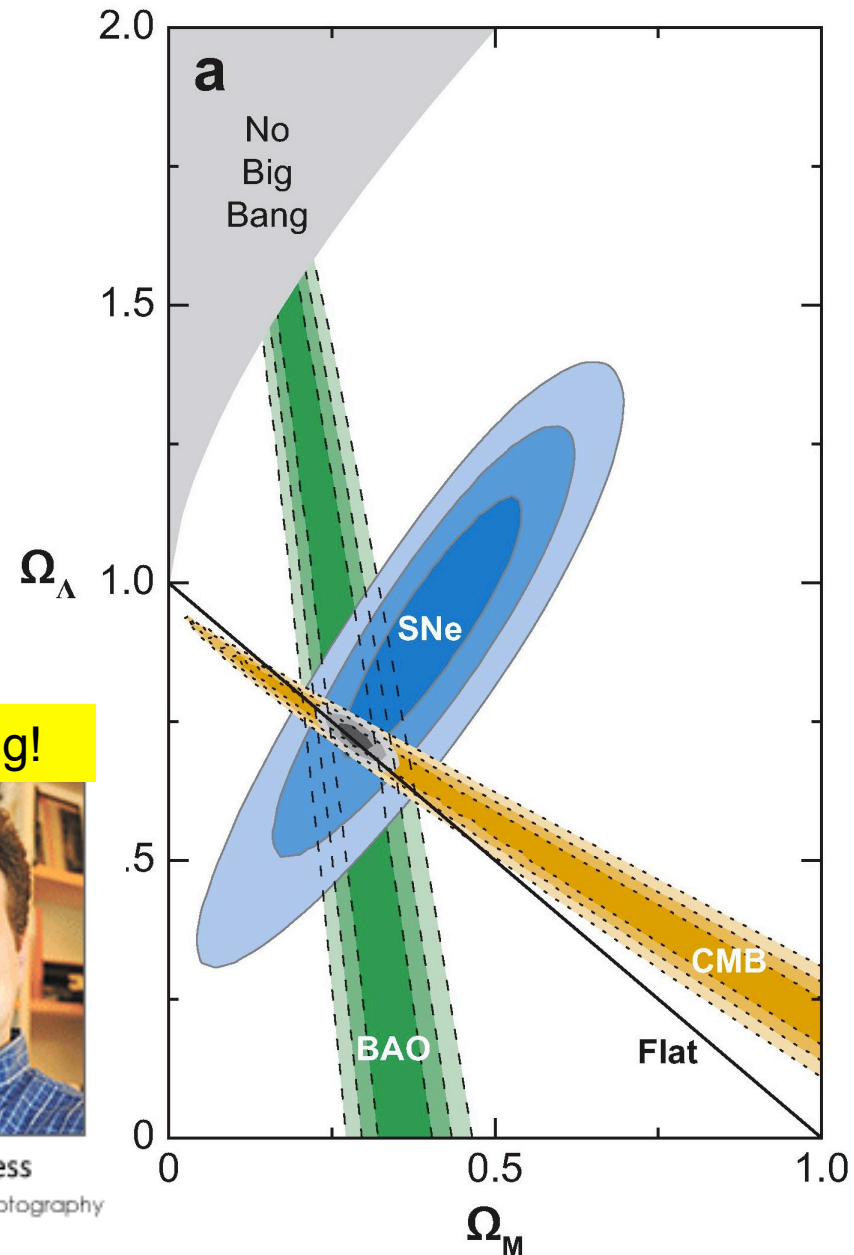
Brian P. Schmidt

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



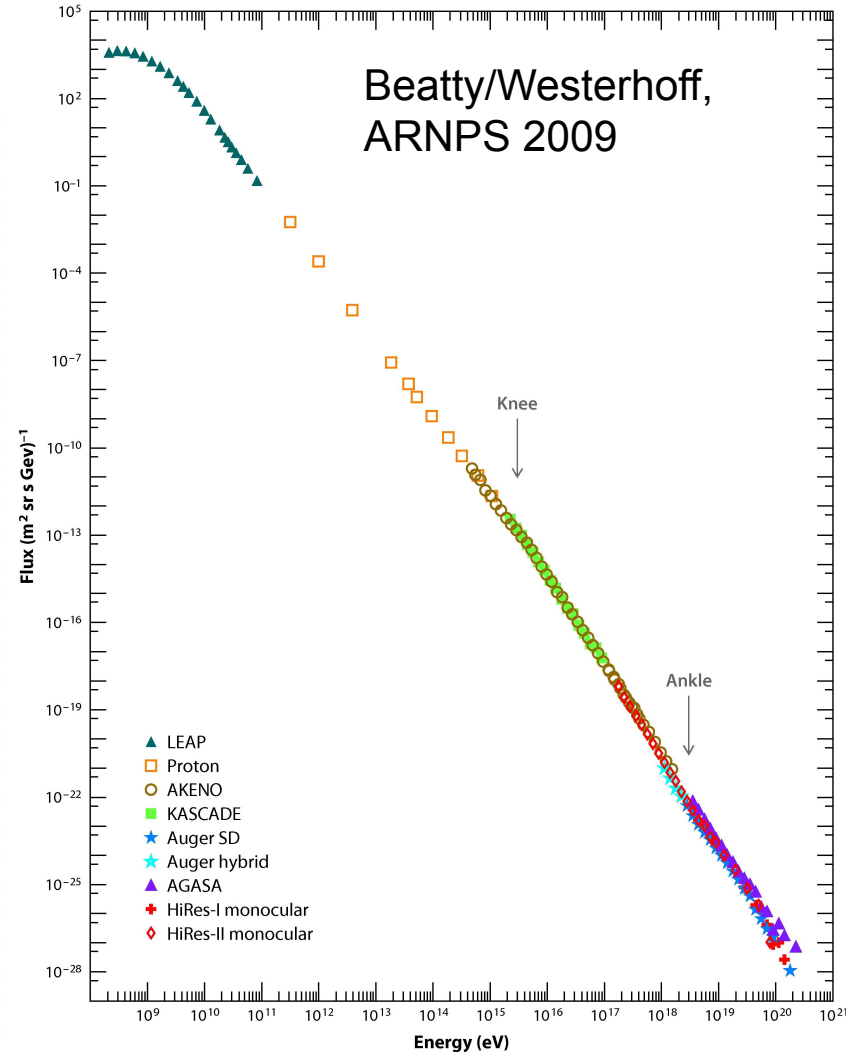
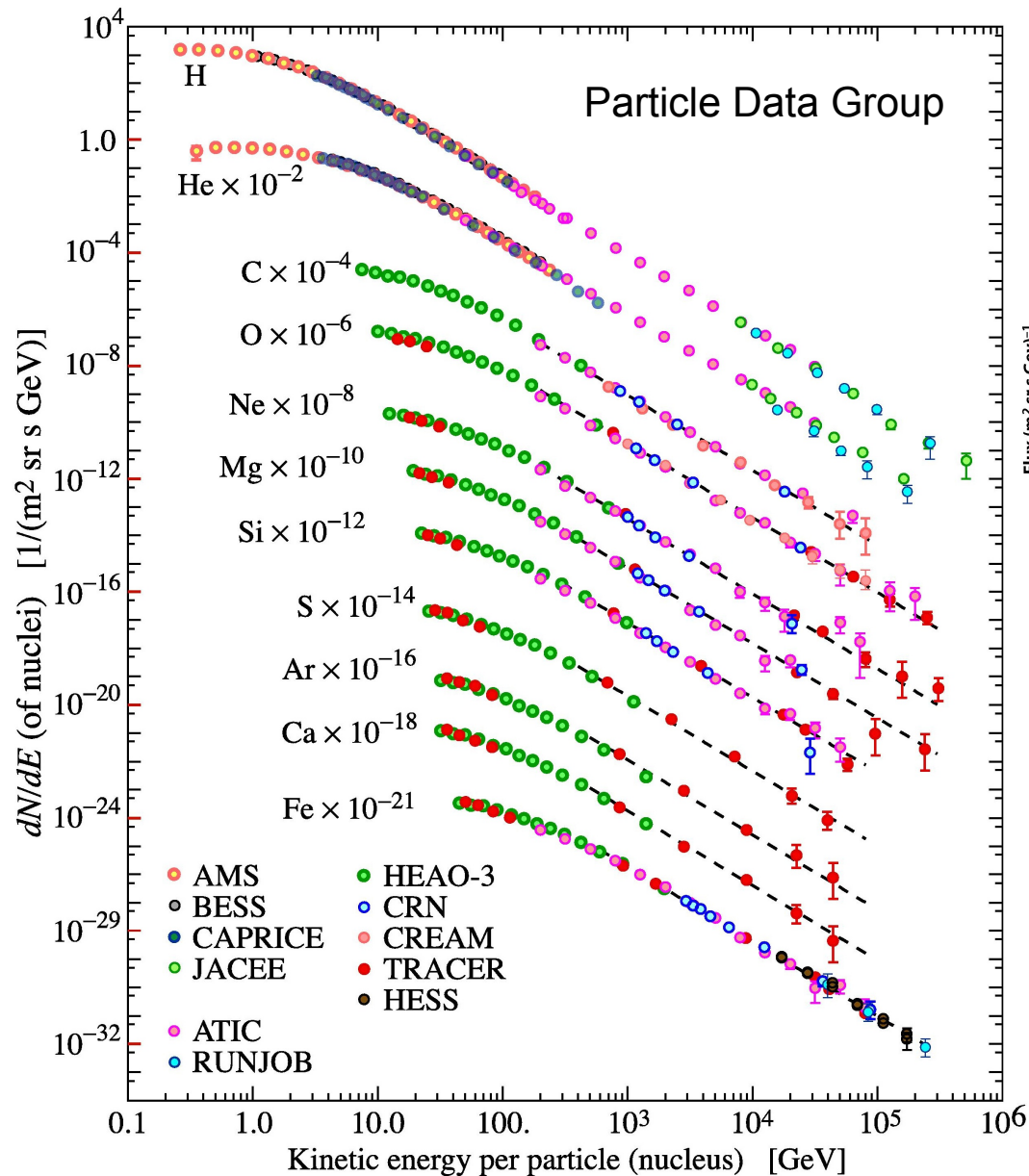
Adam G. Riess

Credit: Homewood Photography

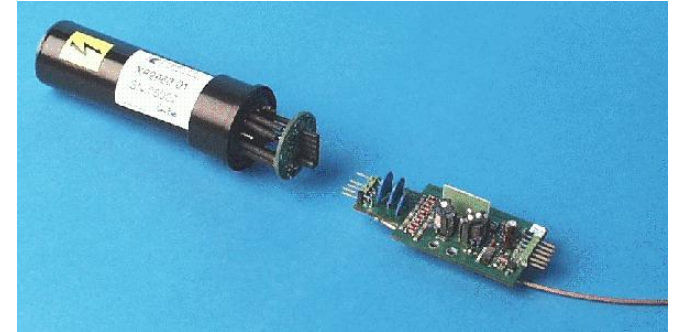


- ◆ Einführung in die Kosmologie
- ◆ Weltmodelle und kosmologische Inflation
- ◆ Thermische Geschichte des Universums
- ◆ Urknall-Nukleosynthese
- ◆ Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- ◆ Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- ◆ Supernovae als kosmische Standardkerzen
- ◆ Neutronensterne
- ◆ **Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung**
- ◆ Altersbestimmung des Universums
- ◆ Fundamentale Physik und die Sonne

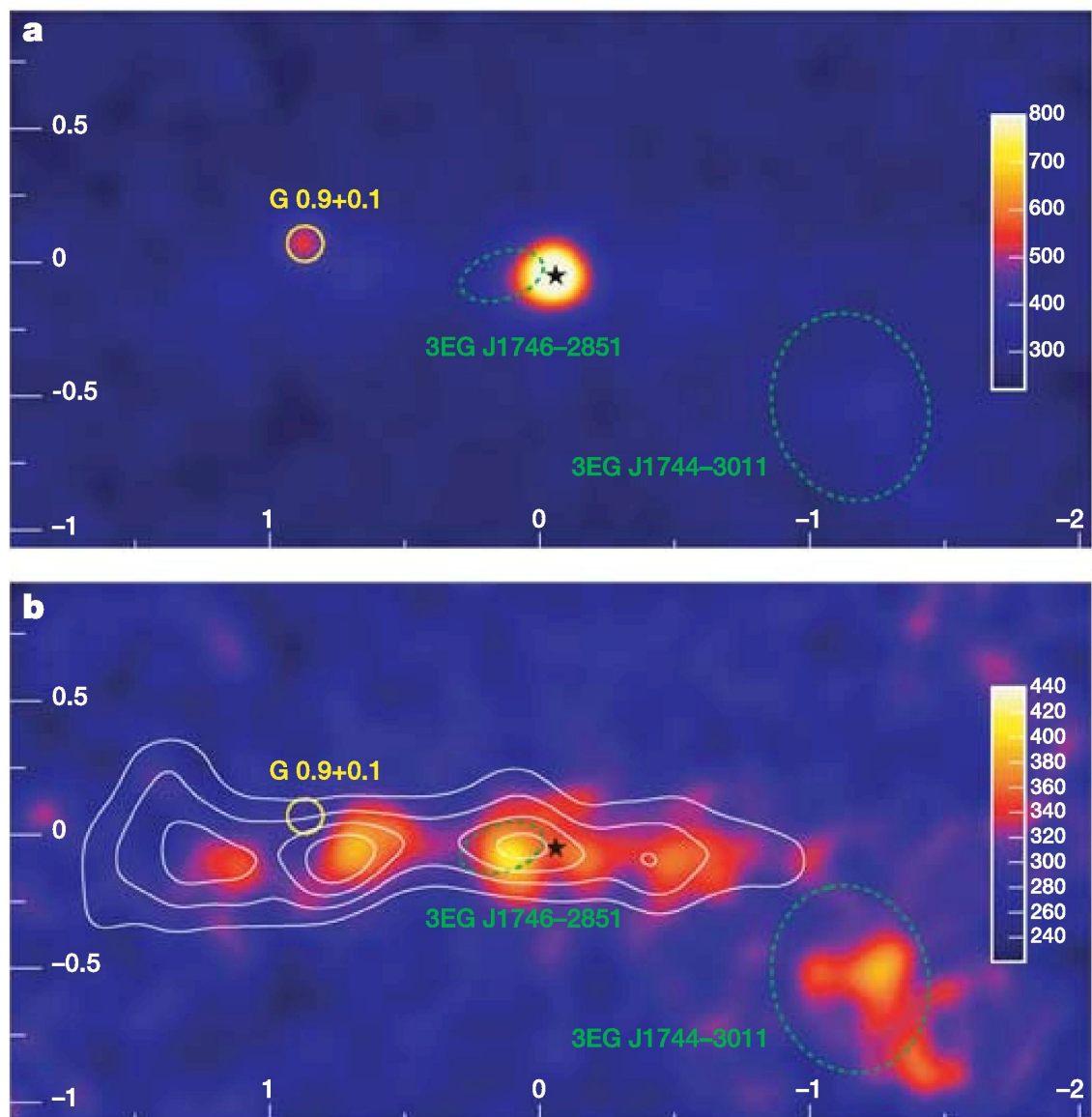
Spektrum der kosmischen Strahlung



HESS - Gammastrahlungsdetektor in Namibia



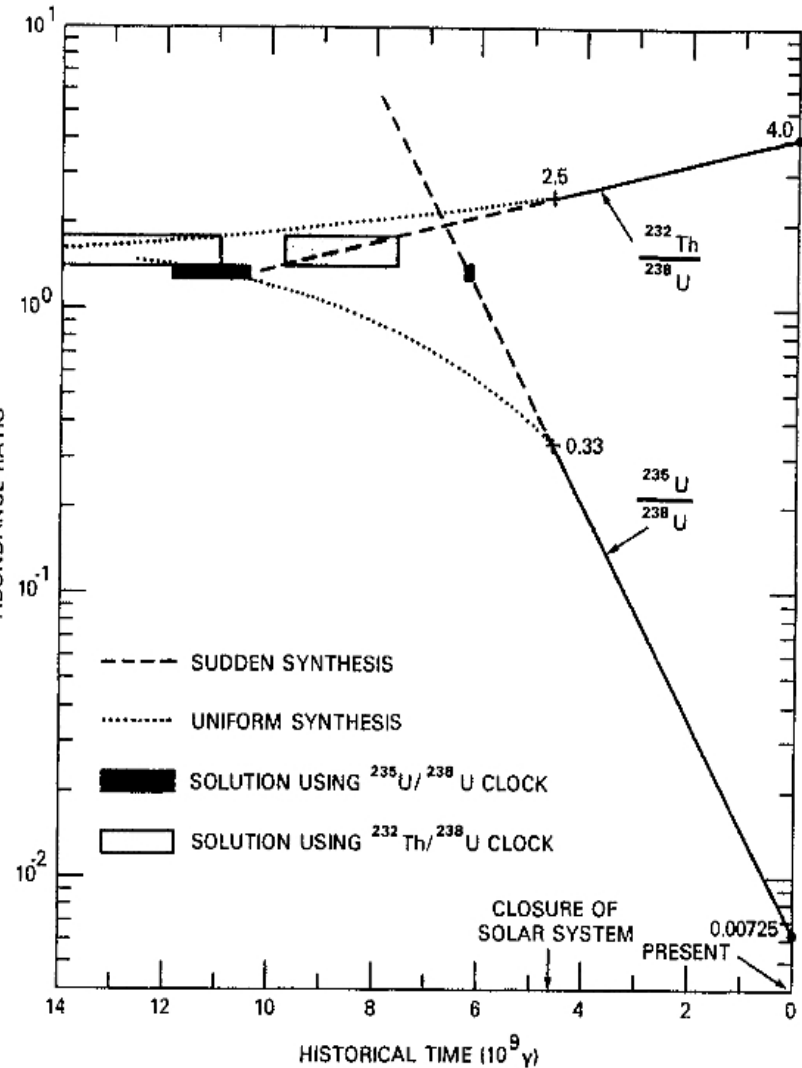
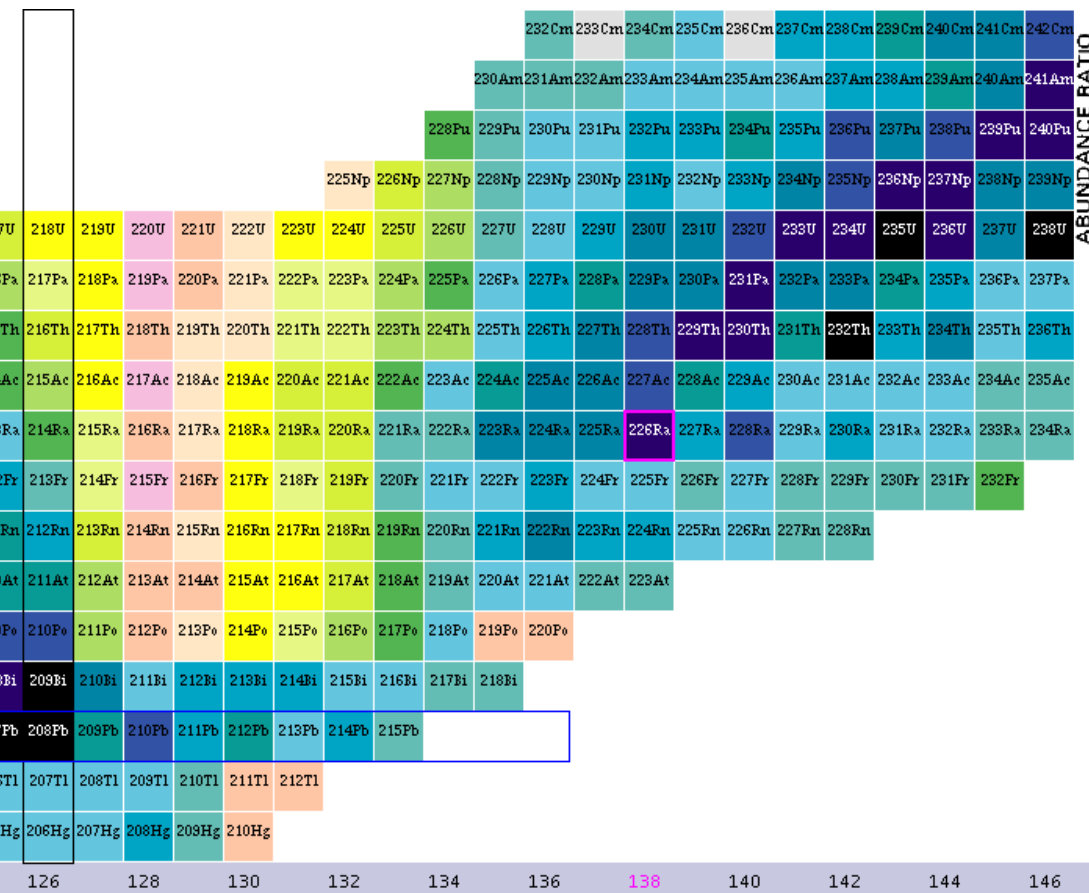
Hochenergetische γ -Strahlen aus dem Zentrum der Milchstraße



HESS, Nature (2006)

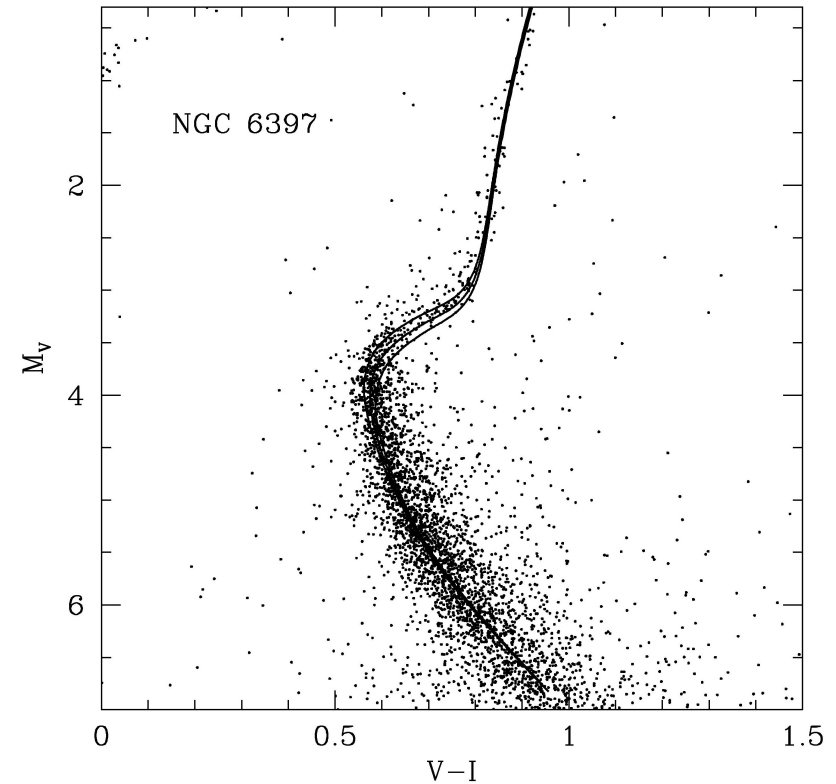
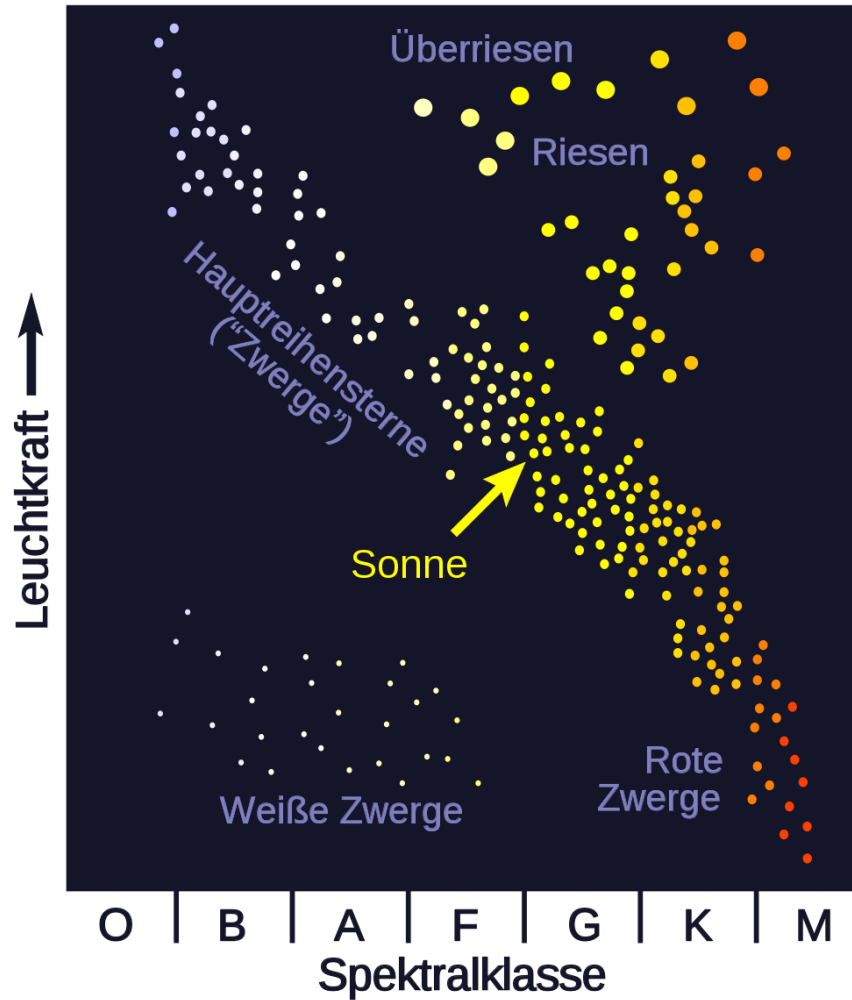
- ◆ Einführung in die Kosmologie
- ◆ Weltmodelle und kosmologische Inflation
- ◆ Thermische Geschichte des Universums
- ◆ Urknall-Nukleosynthese
- ◆ Dunkle Energie, dunkle Materie und die beschleunigte Expansion des Universums
- ◆ Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- ◆ Supernovae als kosmische Standardkerzen
- ◆ Neutronensterne
- ◆ Entstehung und Nachweis kosmischer Strahlung
- ◆ **Altersbestimmung des Universums**
- ◆ Fundamentale Physik und die Sonne

Nukleokosmochronologie



Rolfs/Rodney, Cauldrons in the Cosmos, 1988

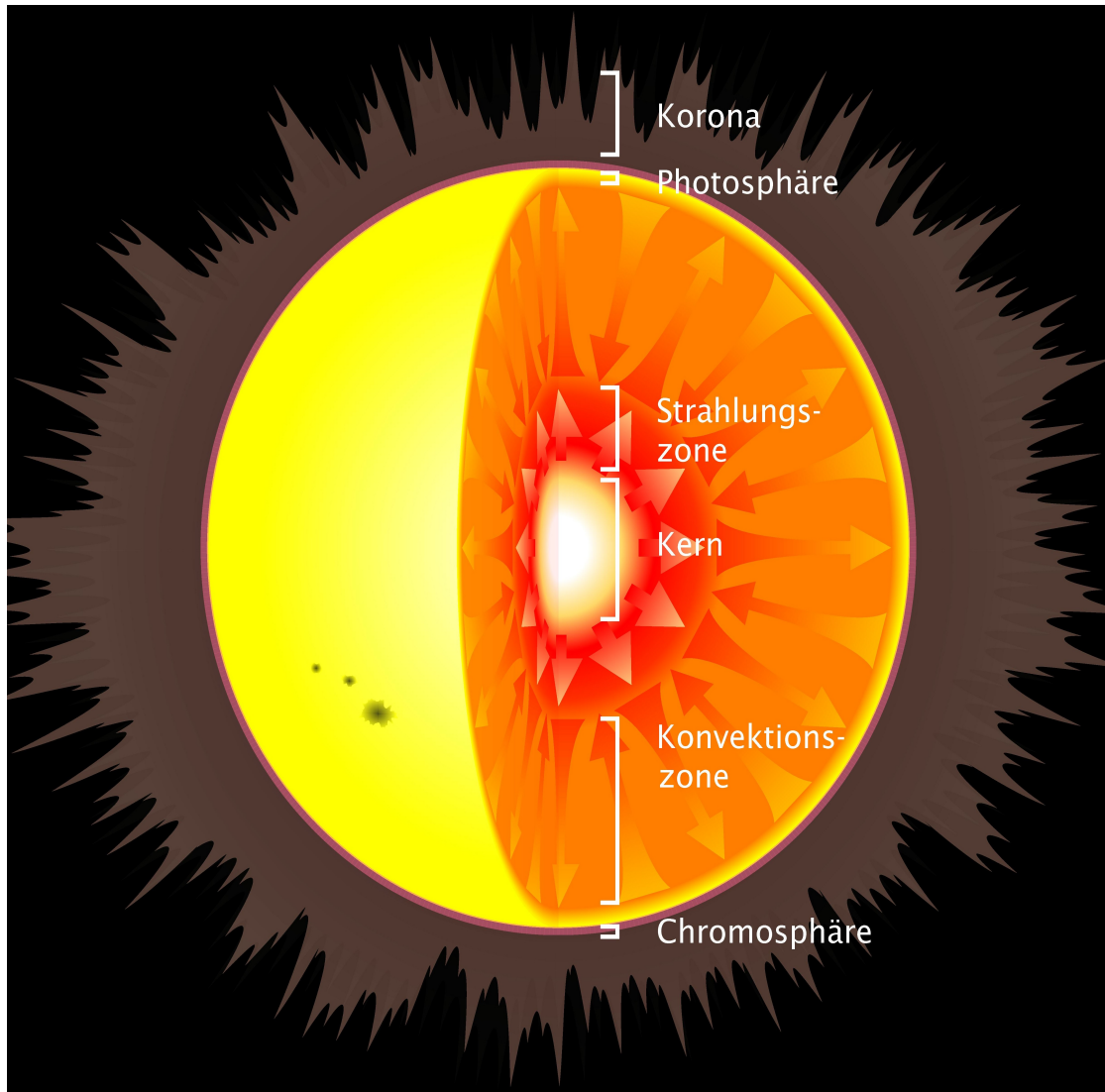
Altersbestimmung sehr alter Sterne (in Kugelsternhaufen)



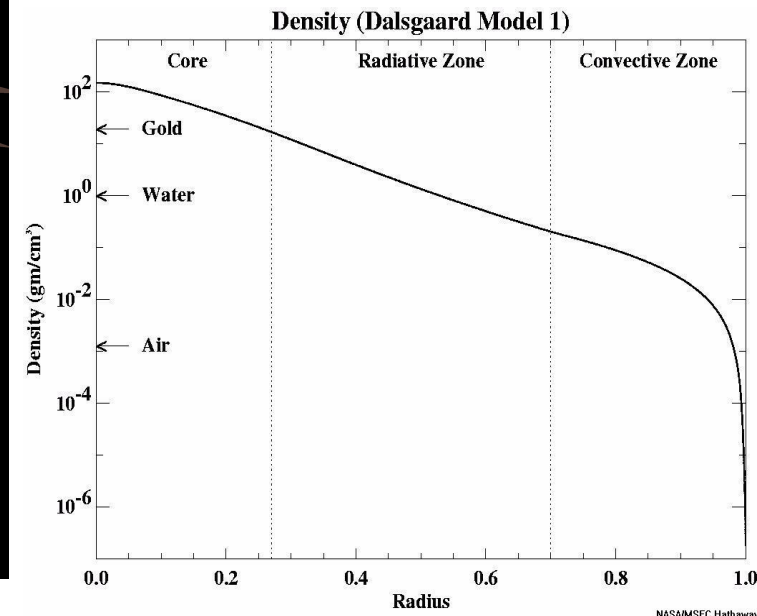
→ Hertzsprung-Russel-Diagramm, Abzweigen von der Hauptreihe

- ◆ 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**

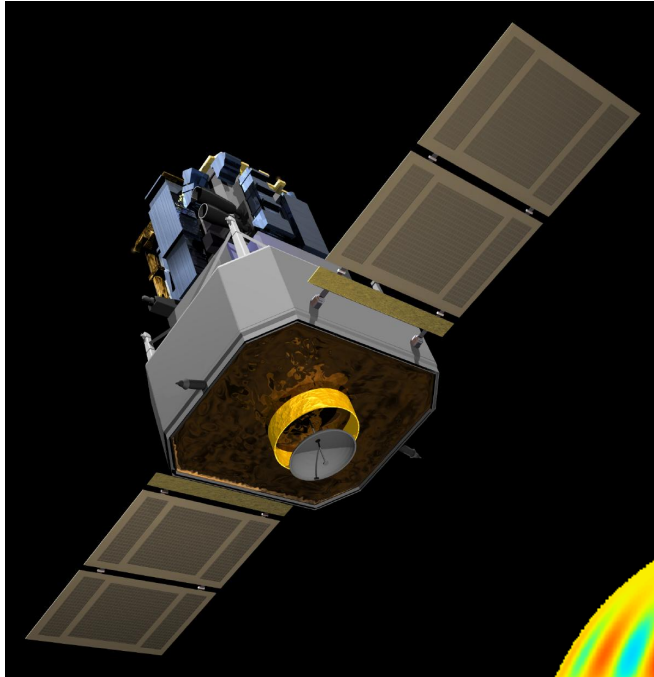
Aufbau der Sonne (in Klammern: Observable)



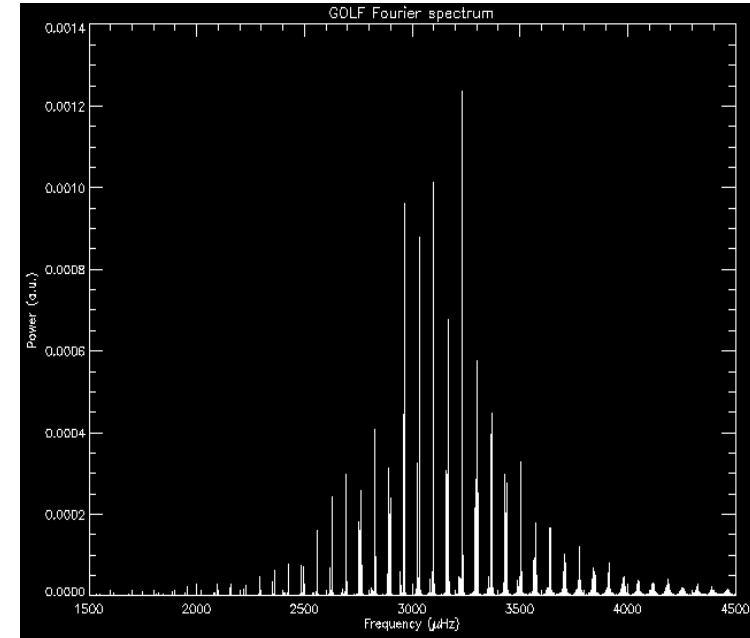
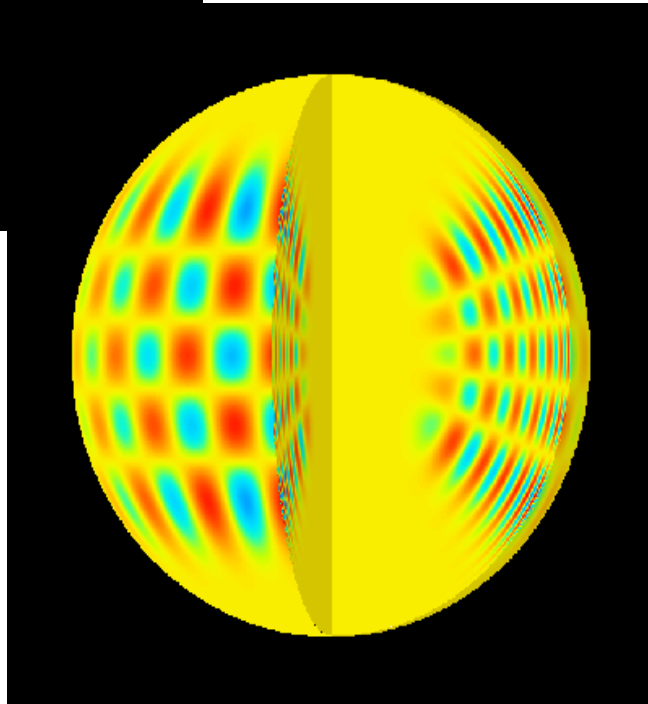
- Korona
- Chromosphäre
- Photosphäre
Fraunhofer-Linien
- Konvektionszone
p-Moden (Helioseismologie)
- Strahlungszone
- Kern
Neutrinos



Daten zur Sonne (1): Helioseismologie



Satellit "SoHo"
(Solar and
Heliospheric
Observatory)

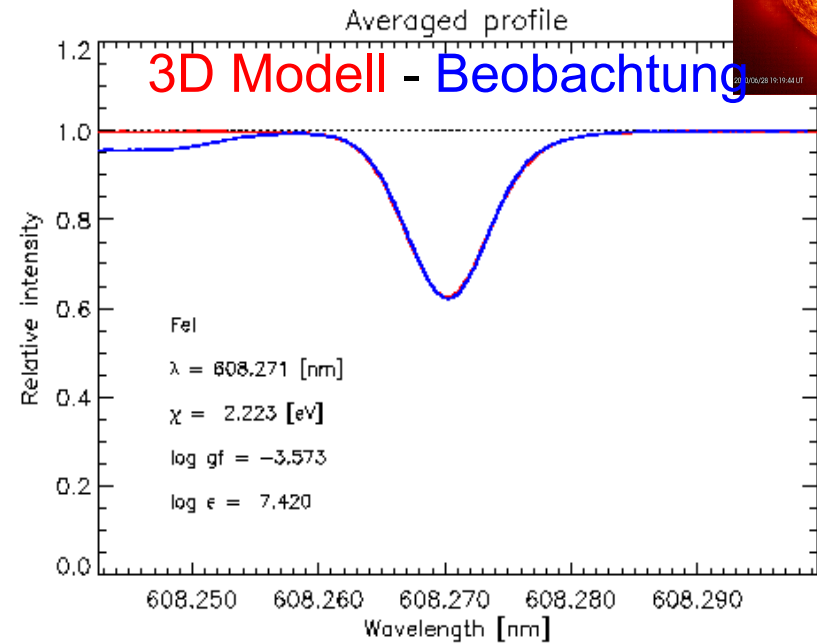
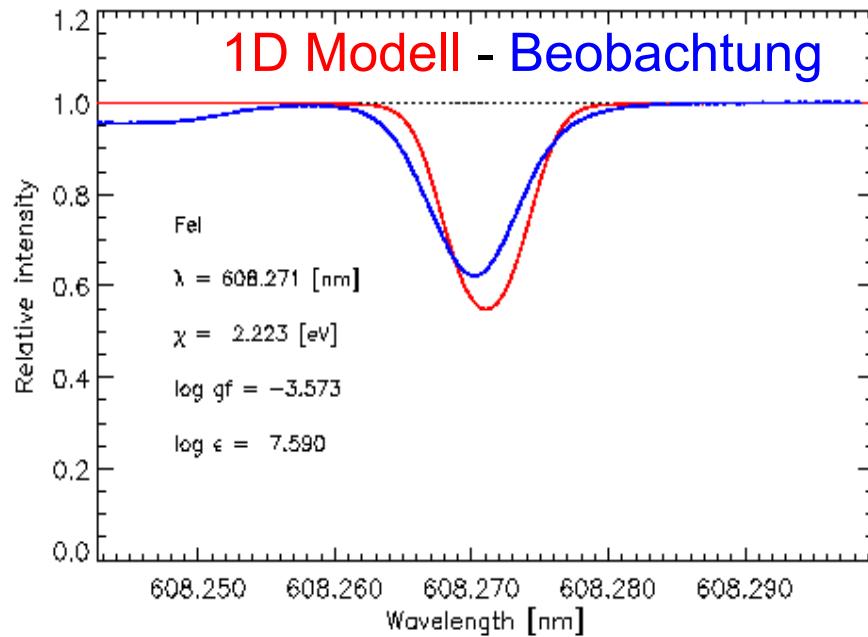
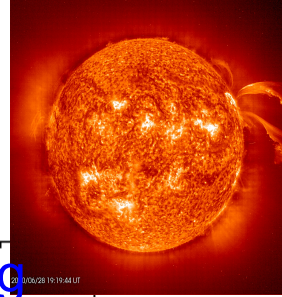


Fourierspektrum des
GOLF-Instruments auf
SoHo

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)



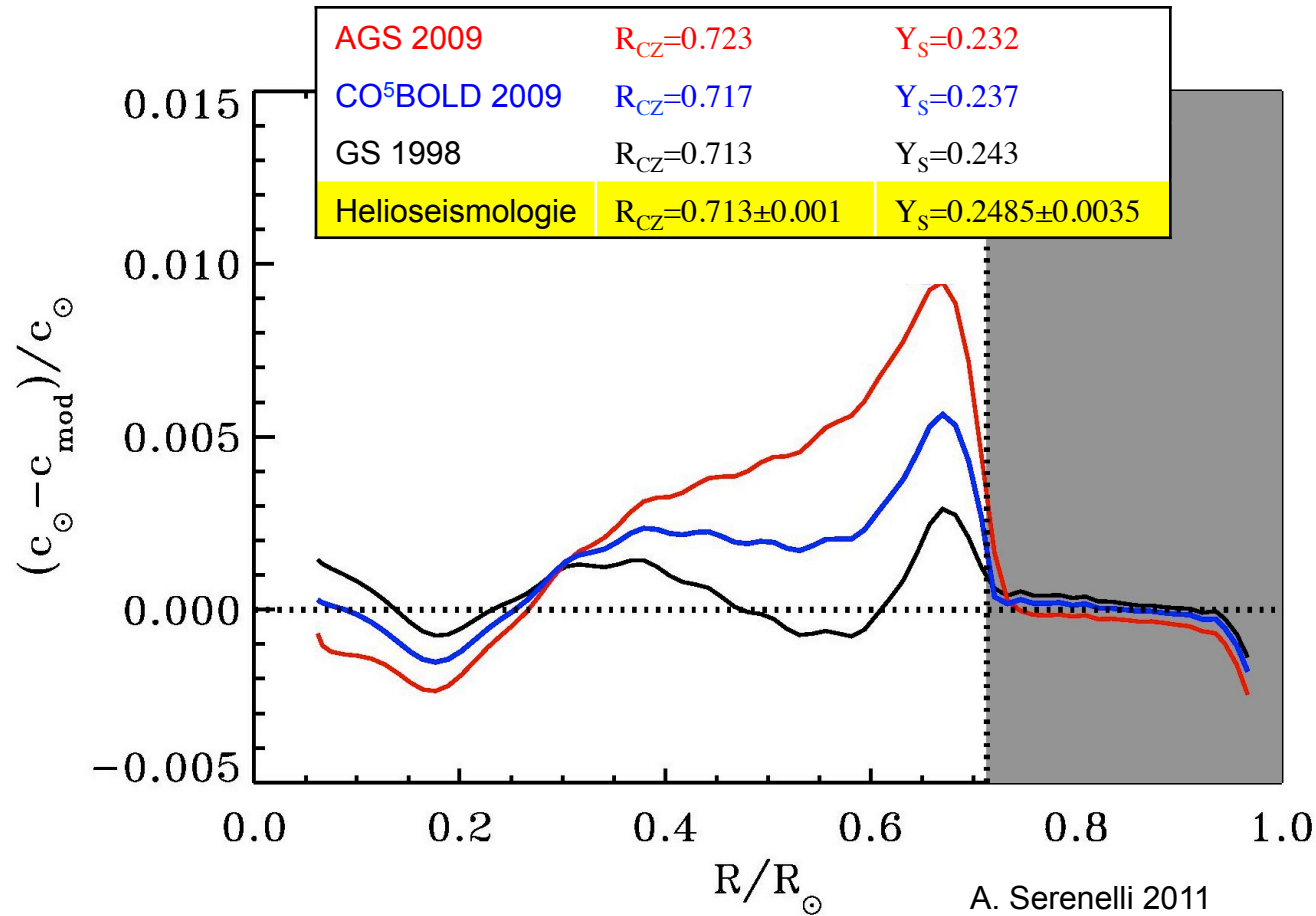
Problem:

Widerspruch zwischen neuem Sonnenmodell und Helioseismologie

Standard-Sonnenmodell,
gerechnet mit
verschiedenen
Elementhäufigkeiten.

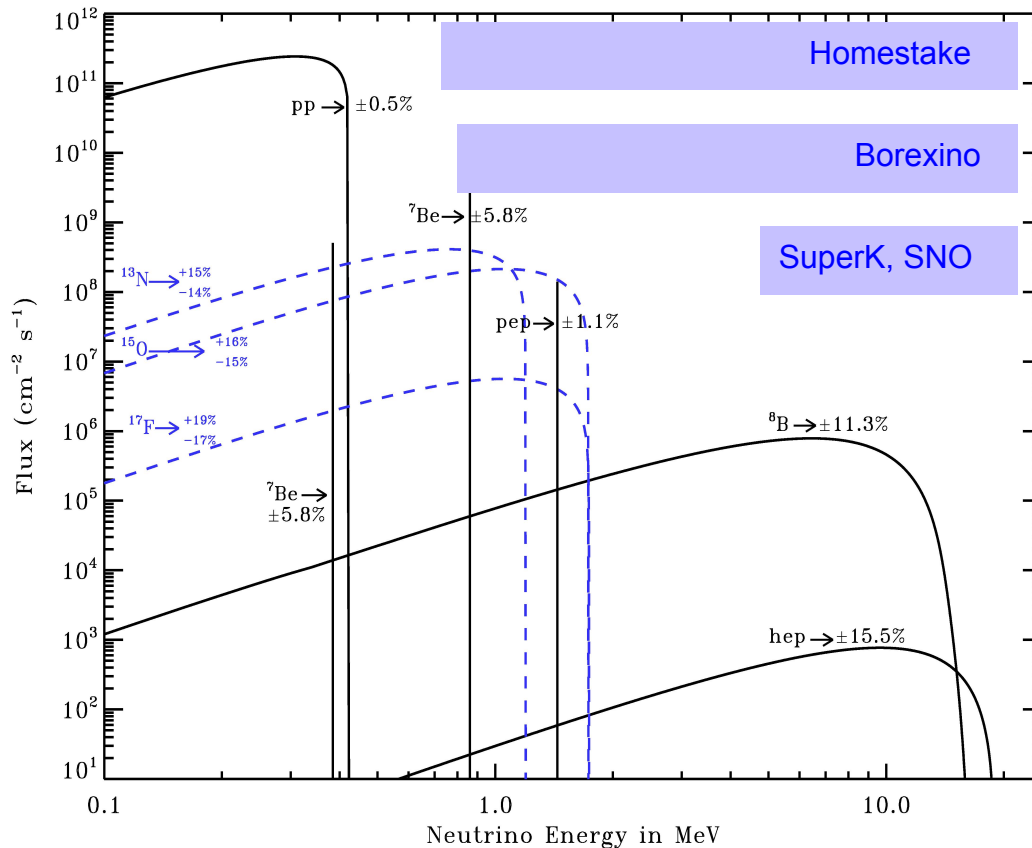
Observable, die
helioseismologisch
überprüft werden können:

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



Neutrino-Vorhersagen des Standard-Sonnenmodells

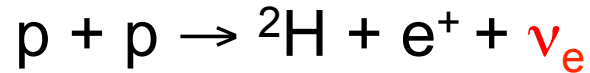
Bahcall'sches Sonnenmodell, A. Serenelli et al. 2011: Zwei Versionen des Standard-Sonnenmodells



- **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 $10^6/(\text{cm}^2 \text{ s})$

Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (1)



Homestake-Goldbergwerk (South Dakota / USA)

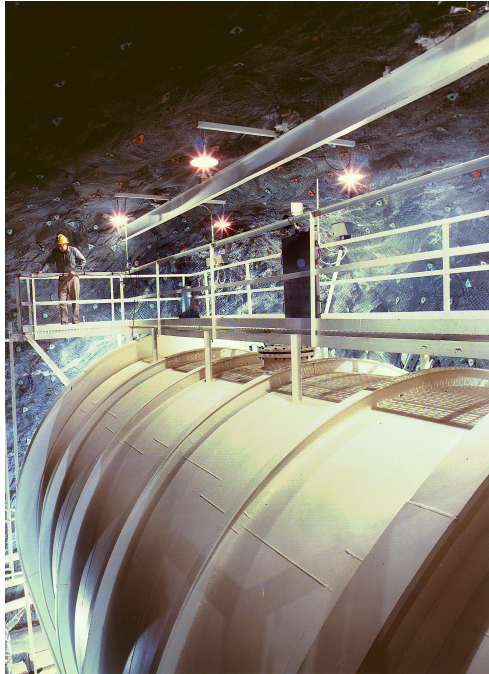
1500 m unter Tage

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

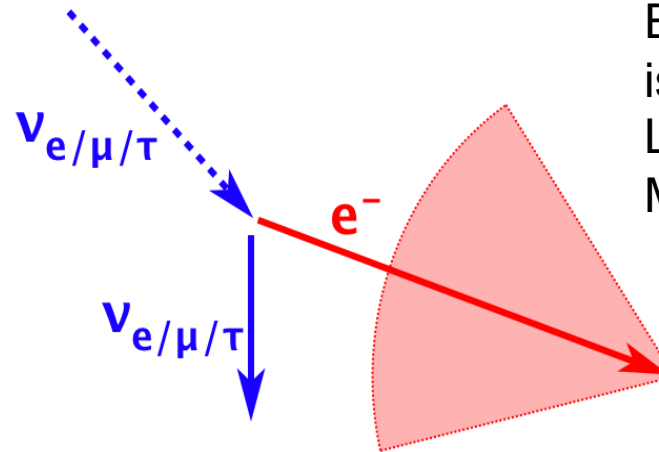
“Solares Neutrino problem”, 1972-2002

Nachweis von Neutrinos aus der Sonne (2)

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada):

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

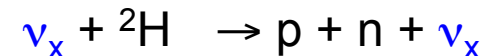
Tscherenkow-Kegel eines Elektrons, das schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium ($n=1.33$).



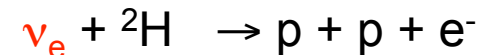
ES = Elastic scattering:

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

NC = neutral current:



CC = charged current:



Die Lösung des solaren Neutrino-Problems, 2002

Sudbury Neutrino Observatory SNO (Kanada) weist direkt auch solare ν_μ, ν_τ nach.
Konzentration auf Neutrinos mit > 5 MeV Energie (hauptsächlich aus ^8B -Zerfall)

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

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

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

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

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

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

Umformung

Sonnenmodell: 4.72...5.94

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

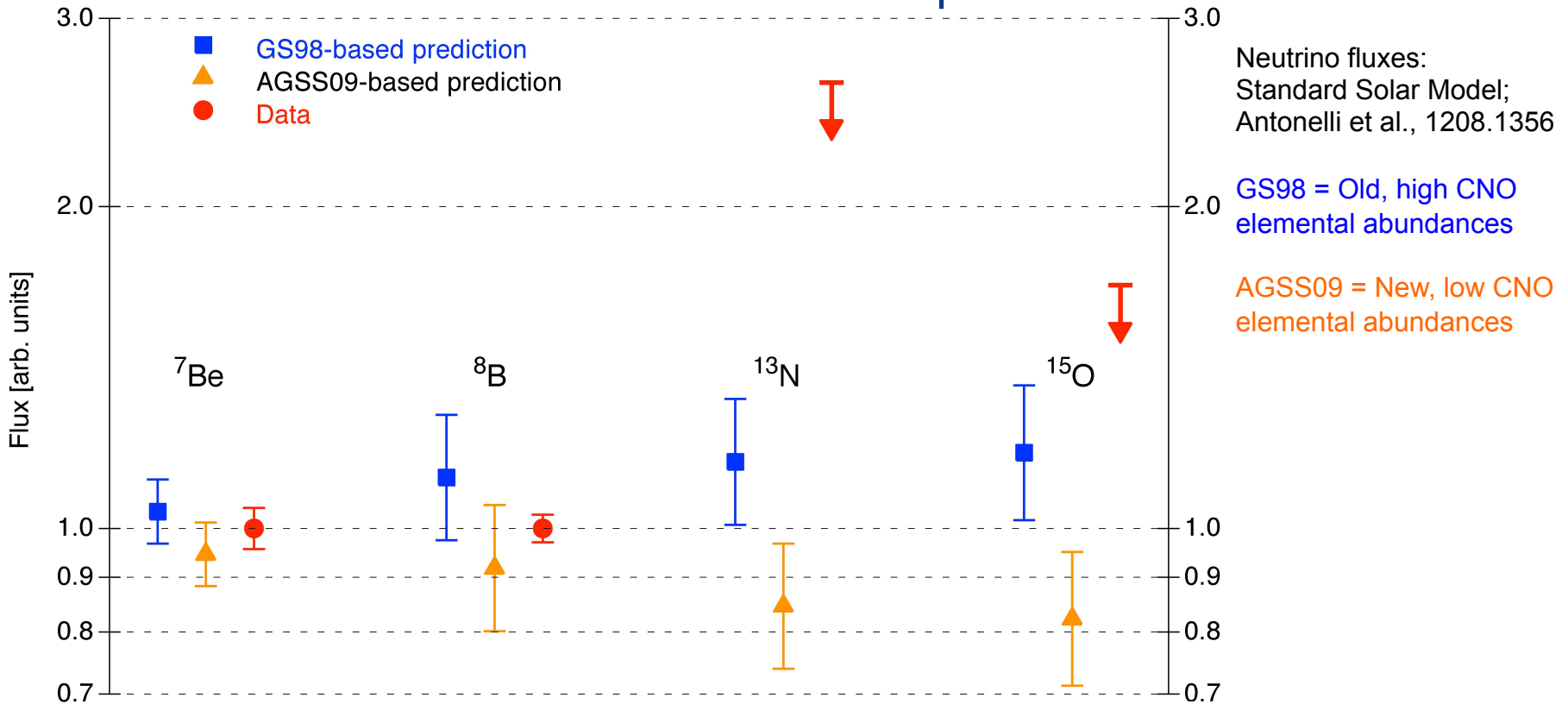
$$\phi_{\mu\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45}(\text{stat})^{+0.48}_{-0.45}(\text{syst}),$$

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

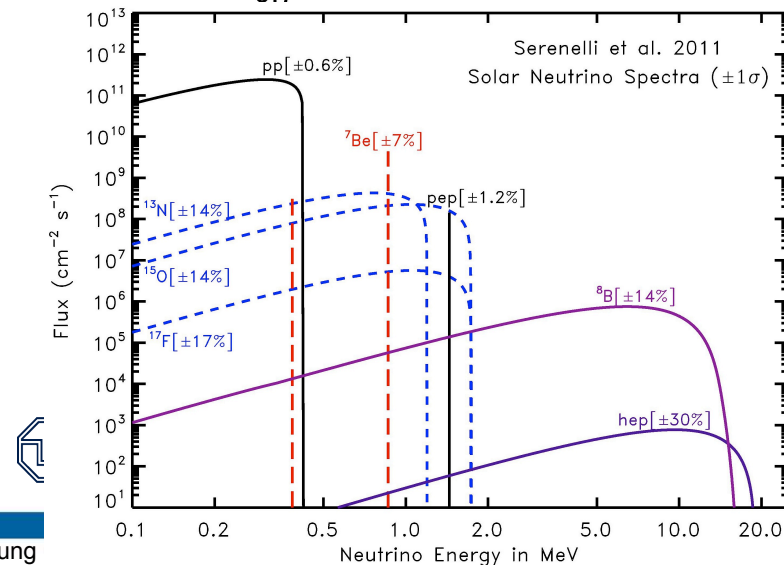
(Experiment, SNO)

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

Solar neutrino fluxes: Data and model predictions



- ◆ ^7Be , ^8B : Data more precise than the models
- ◆ ^{13}N , ^{15}O : No data yet, but models are not very precise
- ◆ **Need smaller error bars for the models!**



Low-energy data improve the situation!

State of the art, 2013

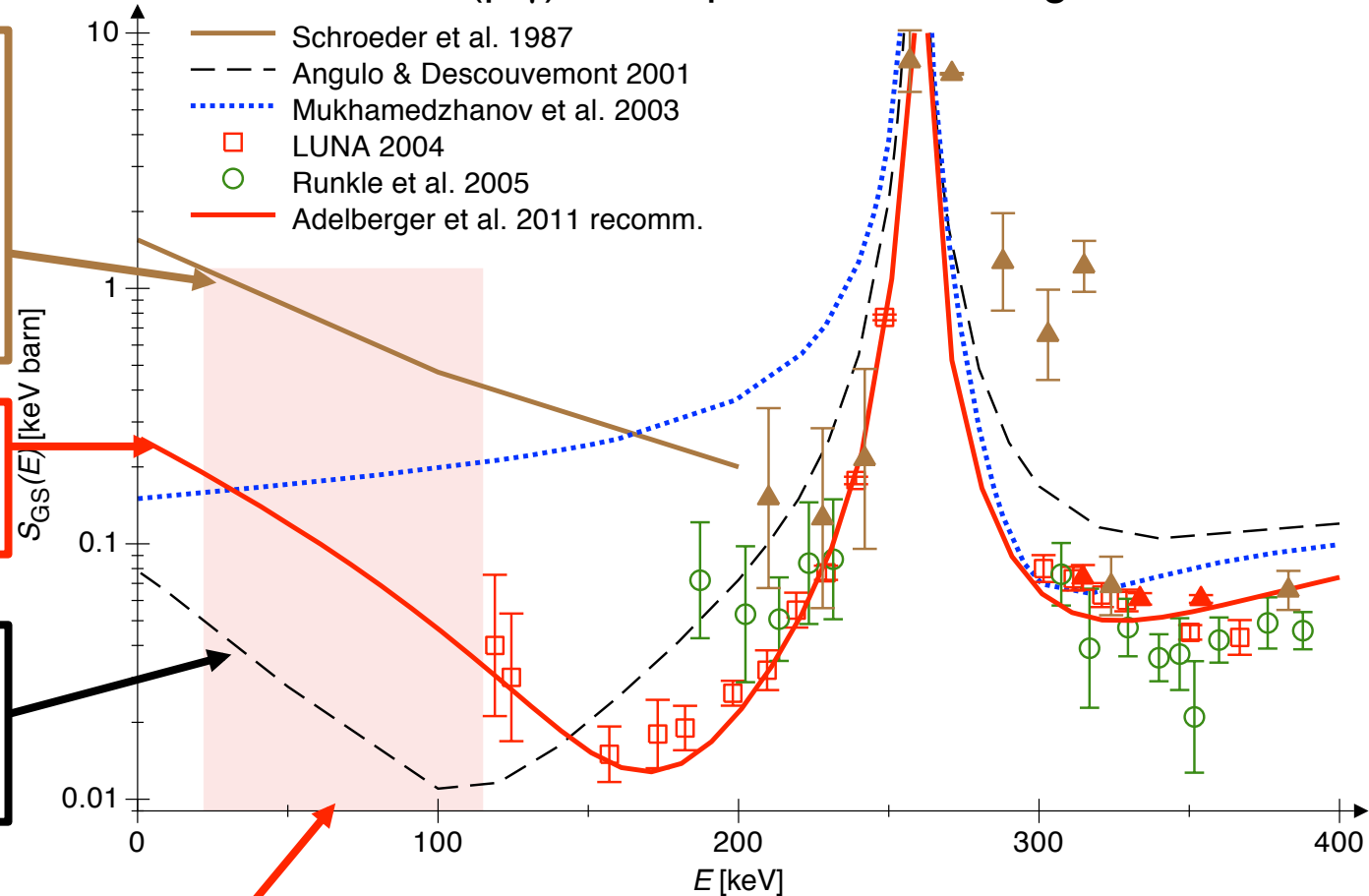
$^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$, capture to the ^{15}O ground state

Schröder et al. 1987:
Ground state capture
contributes 50% of
total S factor.

**Adopted in
astrophysical reaction
rate compilations!**

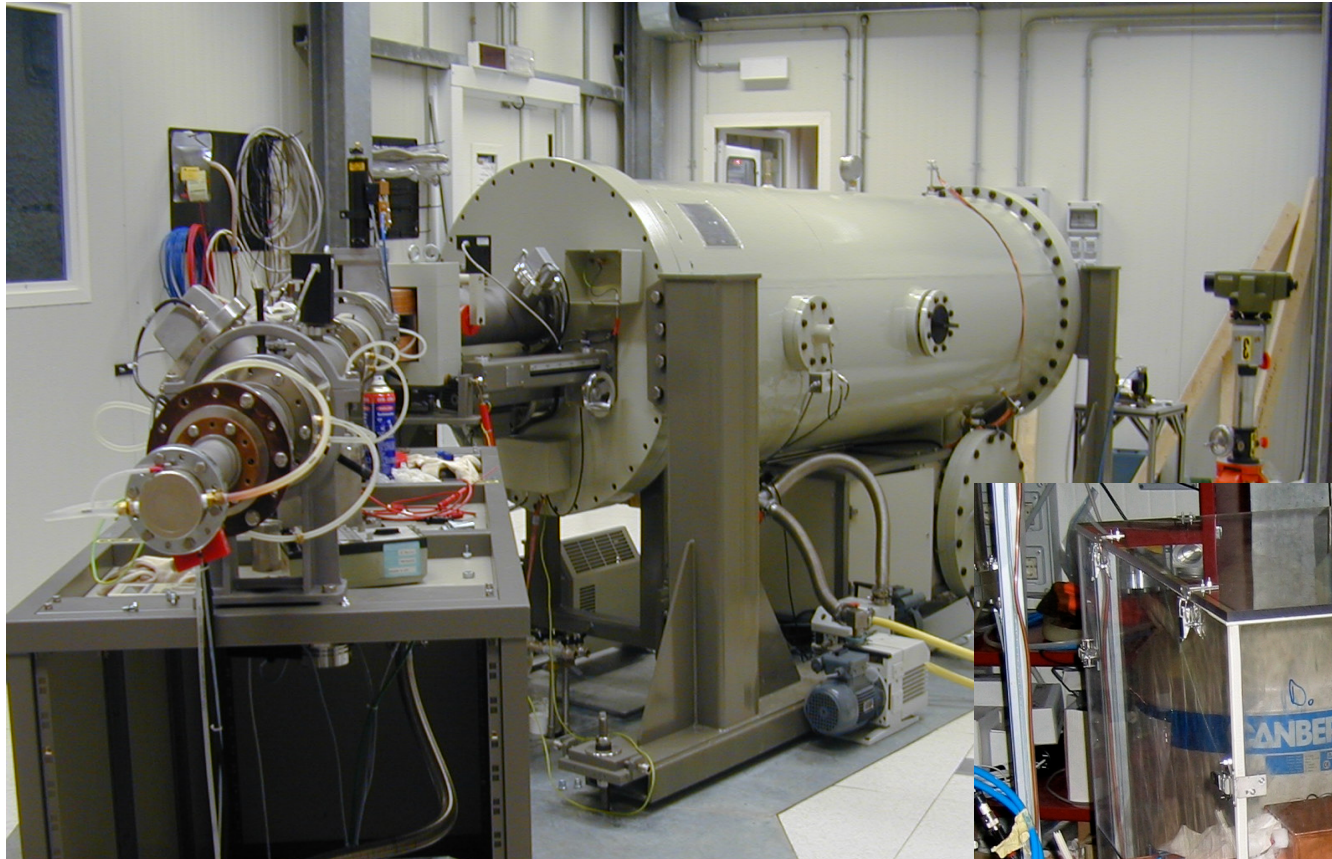
Adelberger et al. 2011
recommendation, using
new low-energy data

Angulo et al. 2001:
Ground state capture
contributes 5% of
total S factor.



Astrophysically relevant energy range

The LUNA 0.4 MV accelerator deep underground

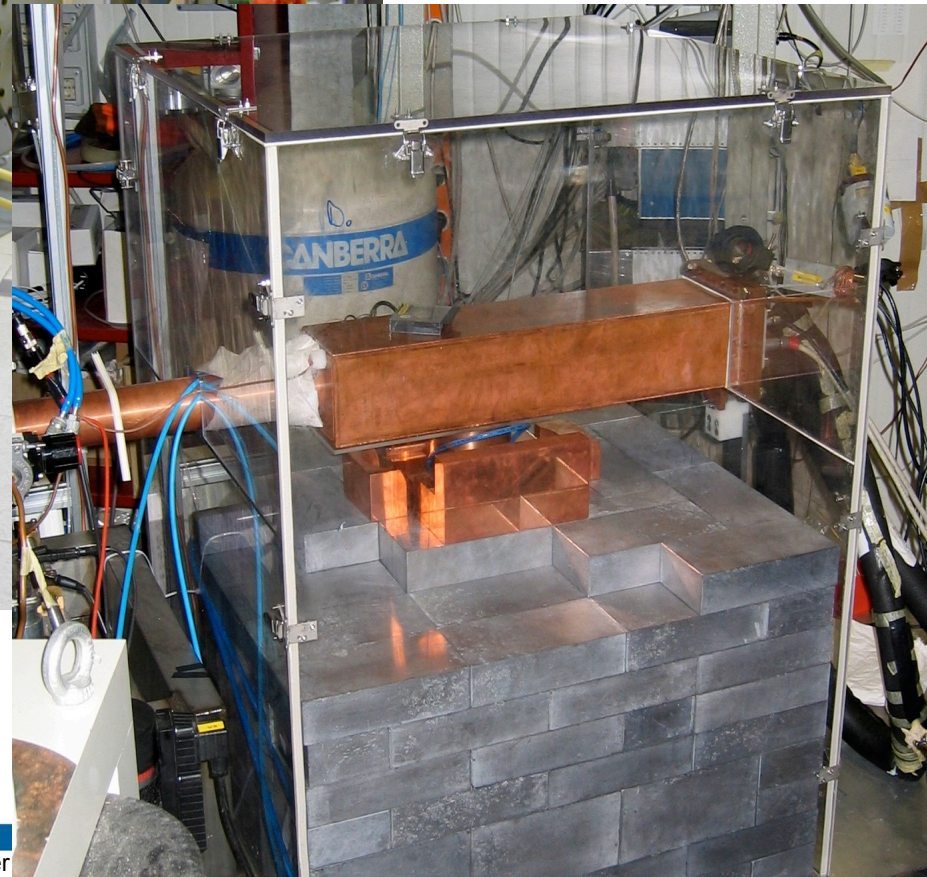


LUNA = Laboratory
Underground for
Nuclear Astrophysics

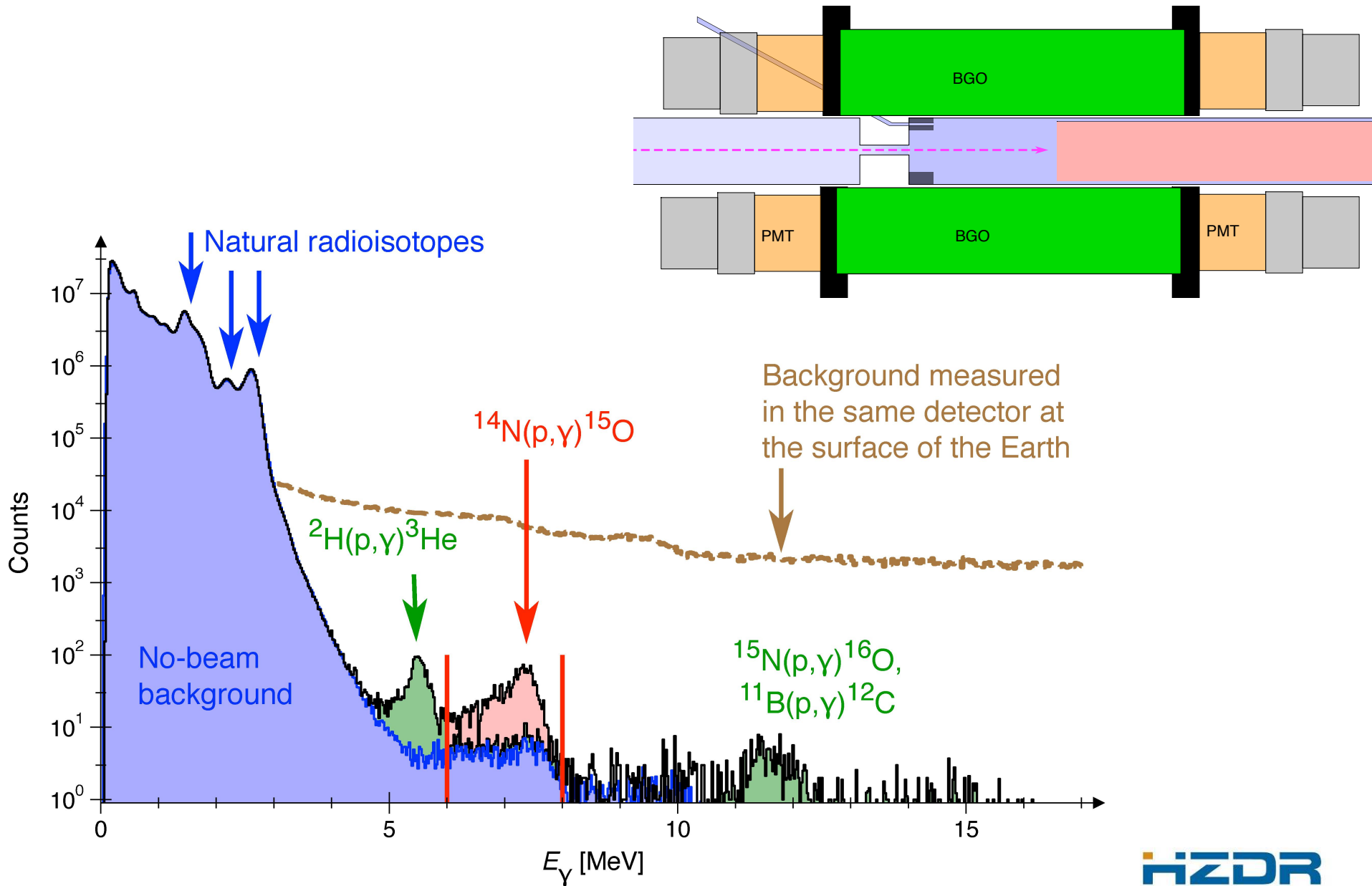
- Italy
- Germany (Bochum, Dresden)
- Hungary
- UK

LUNA approach:
Measure nuclear reaction cross sections
at or near the relevant energies
(= Gamow peak), using

- high beam intensity
- low background
- great patience

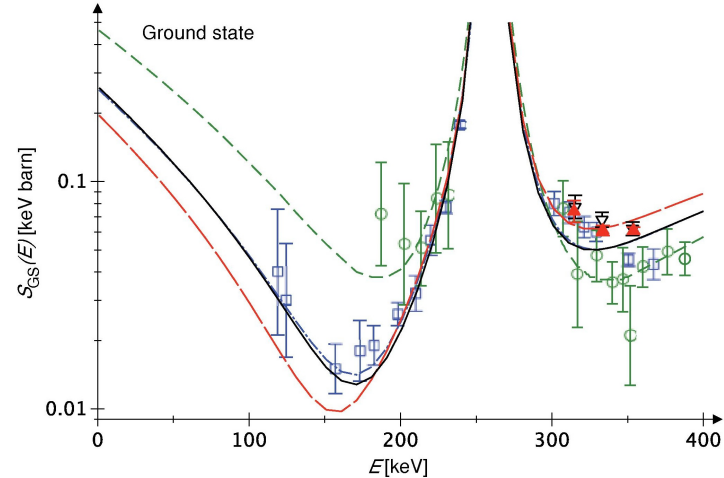
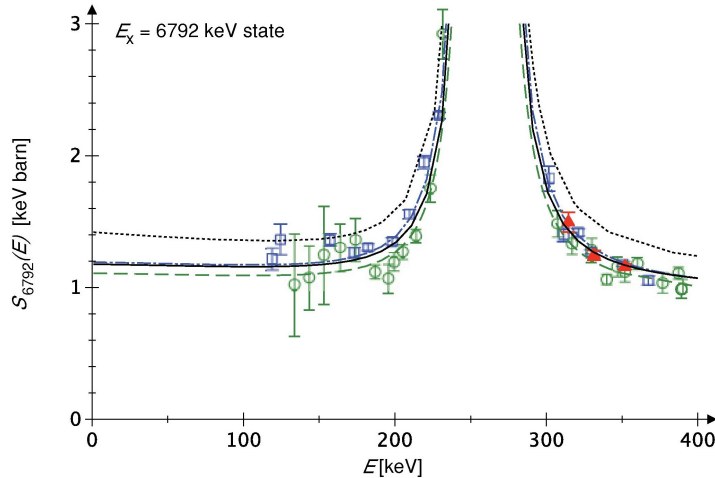
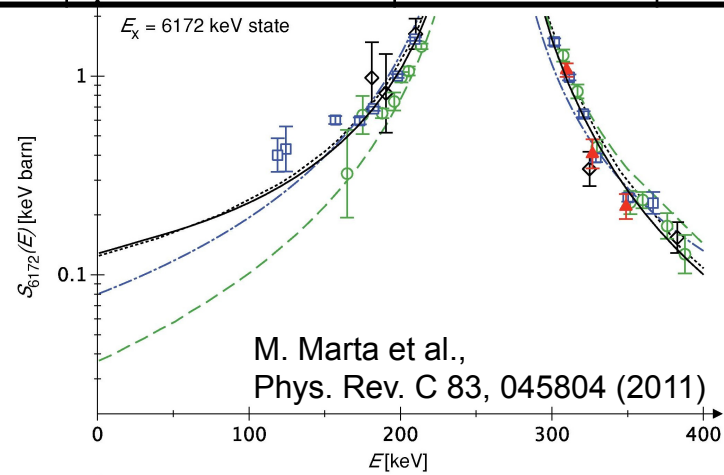
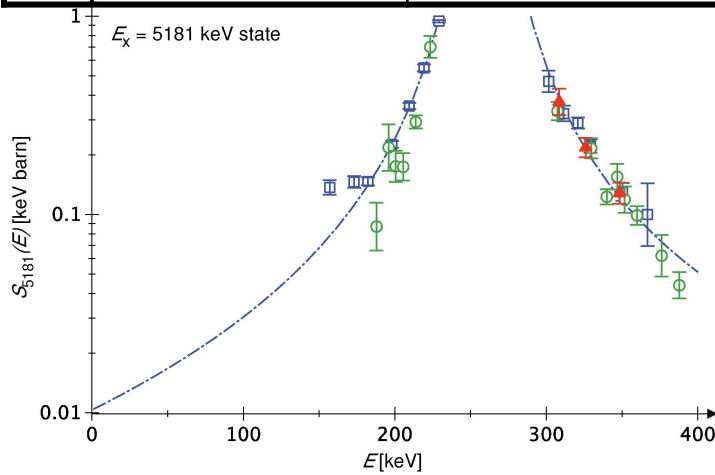


LUNA total cross section of $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ in a 4π BGO summing crystal



LUNA divided the $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ cross section by 2!

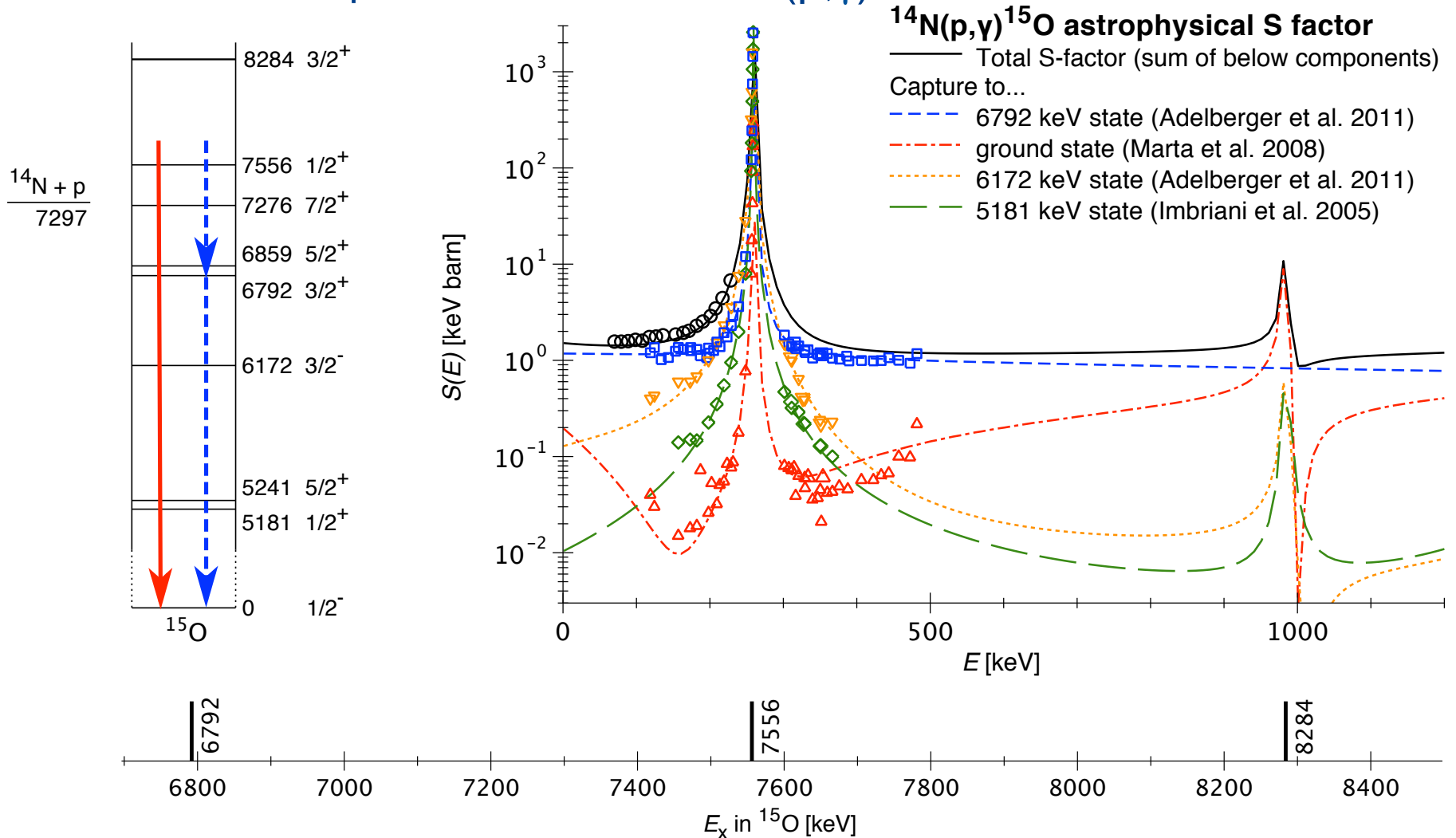
Capture to...	NACRE compilation 1999	LUNA, phase 1 2004	TUNL 2005	LUNA, phase 3 2008+2011
...ground state in ^{15}O	1.55 ± 0.34	0.25 ± 0.06	0.49 ± 0.08	0.27 ± 0.05
...excited states in ^{15}O	1.65 ± 0.05	1.36 ± 0.05	1.27 ± 0.05	(1.39 ± 0.05)
S(0) in keV barn	3.2 ± 0.5 (tot)	1.6 ± 0.2 (tot)	1.8 ± 0.2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



Adelberger et al.
2011
recommended
precision 7%...

...but it should be
further improved!

Needed: new experimental data on $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$



- The S-factor is the sum of several components with very different energy dependence.
- New cross section data between 0.4 and 2.0 MeV are needed!
- This requires a high-intensity, low background accelerator with a few MeV energy range.

Planned Felsenkeller accelerator, HZDR and TU Dresden



- ◆ 12-year old, working 5 MV accelerator
- ◆ Bought off an insolvent spin-off of York Univ.
- ◆ Transported to HZDR (July 2012)
- ◆ 250 μA upcharge current (double pellet chains)
- ◆ Two Cs sputter ion sources: 100 μA H^- and C^-
- ◆ Well-suited for low-energy nuclear astrophysics
- ◆ Develop new terminal ion source
- ◆ Work on CAMAC control and gas target systems



- ◆ Prof. Dr. Burkhard Kämpfer (Theorie)
- ◆ PD Dr. Daniel Bemmerer (Experiment)
- ◆ VL-Webseite: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=38601&pNid=164> (Link im Physik-KVV)

- ◆ *Vorlesung* montags 4. DS (13:00-14:30), SE2/102
- ◆ *Übung* mittwochs 5. DS (14:50-16:20), SE2/102, nur gerade Wochen (Beginn 17.4.)

- *Hörerkreis:* Vertiefung Bachelor (PV) und Master (alle)
- *Vertiefungsgebiet:* Teilchen- und Kernphysik (Vorlesung im Wahlpflichtvertiefungsgebiet, masterartig)
Theoretische Physik (Vorlesung im Fakultativteil der Wahlpflichtvertiefung)
- *Vorkenntnisse:* Einführung in die Kern- und Teilchenphysik

- ◆ Bei Bedarf Vergabe eines Leistungsnachweises (bei Bedarf benotet), bitte rechtzeitig anmelden!
Voraussetzungen: regelmäßige Teilnahme an Vorlesung und Übungen,
erfolgreiches Lösen von drei Übungsaufgaben.

VL-Webseite: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=38601&pNid=164> (Link im Physik-KVV)

Hauptsächlich benutzte Literatur:

- Edward W. Kolb und Michael S. Turner: The Early Universe (Frontiers in Physics). Westview Press 1994
- Christian Iliadis, Nuclear Physics of Stars, Wiley-VCH Weinheim, 2007

Ergänzend kann verwendet werden:

- Donald D. Clayton: Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. Chicago: University of Chicago Press 1983.
- Donald D. Clayton, Handbook of Isotopes in the Cosmos: Hydrogen to Gallium, Cambridge University Press, 2007
- N.K. Glendenning, After the Beginning, Imp. Coll. Press & World Scientific, 2004
- D. Perkins, Particle Astrophysics, Oxford University Press, 2003
- S. Dodelson, Modern Cosmology, Academic Press Amsterdam, 2003
- G. Börner, The Early Universe, Springer Verlag Berlin, 2003
- B. Kämpfer, B. Lukacs, Gy. Paal, Cosmic Phase Transitions, Teubner Verlag, 1994
- P. Coles, F. Lucchin, Cosmology, John Wiley & Sons, 1995
- C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, Gravitation, Freeman & Co, San Francisco, 1973
- C. Berger, Teilchenphysik, Springer Verlag Berlin, 1992