

# Astroteilchenphysik und Kosmologie

Prof. Dr. B. Kämpfer und Dr. D. Bemmerer

- Kernphysikalische Grundbegriffe zur Elemententstehung
- **Entstehung chemischer Elemente im Urknall und durch kosmische Strahlen (heute)**
- Teilchenphysik in Sternen
- Boten aus dem All: Neutrinos von Supernovae und aus der Sonne
- Kosmische Teilchenbeschleuniger – schneller als der CERN-LHC
- Urknall und kosmologische Inflation
- Dunkel-Energie und Dunkel-Materie als wichtig(st)e Materieformen im Universum
- Kosmische Teilchen und das Standardmodell
- Weltmodelle und Alternativen

3. Vorlesung, TU Dresden 26.04.2010



Forschungszentrum  
Dresden Rossendorf

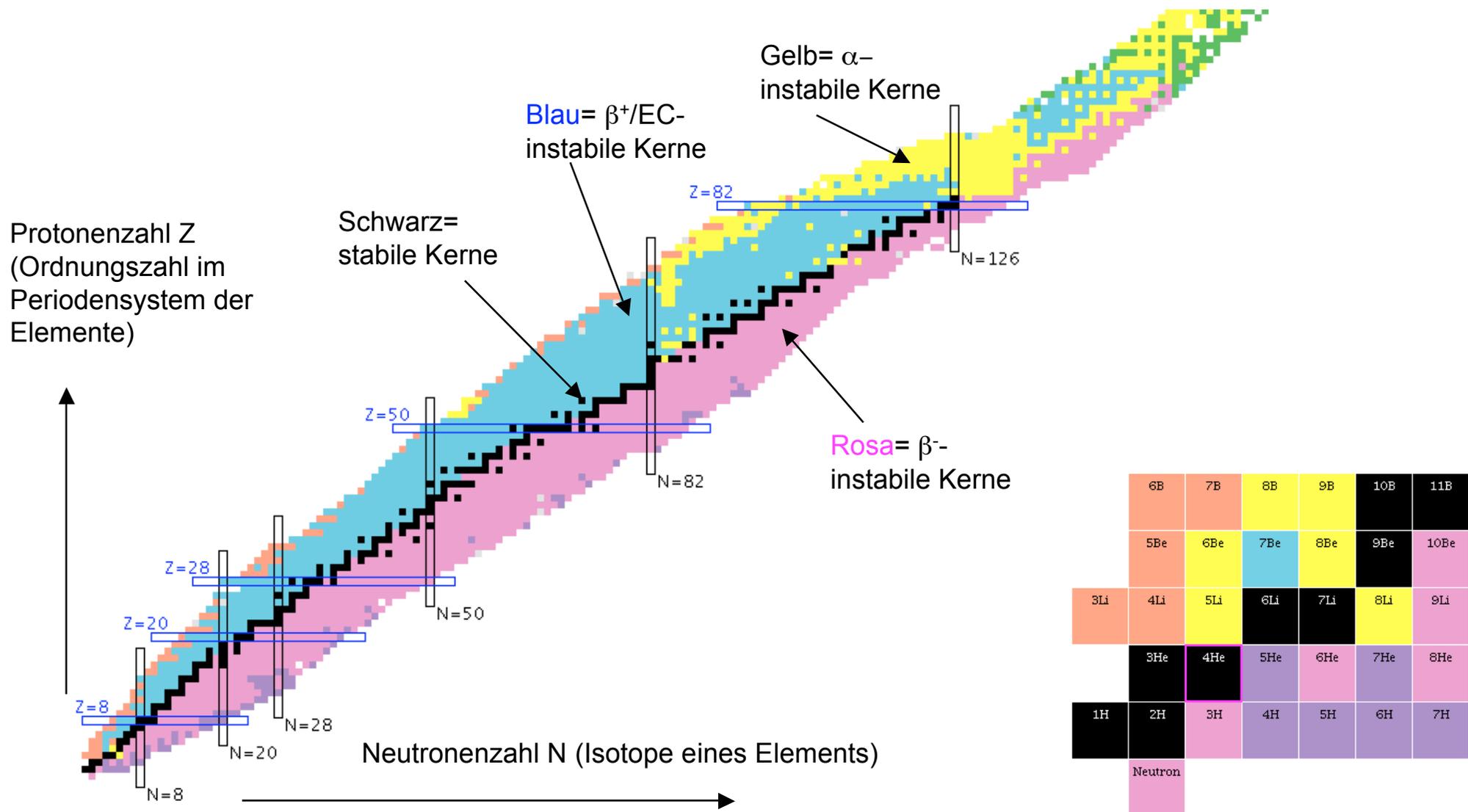
## Zusammenfassung der 2. Vorlesung, letzte Woche

- Durch Umwandeln eines Kerns in einen anderen (durch radioaktiven Zerfall oder Kernreaktionen) werden große Mengen an Energien freigesetzt, typisch 0.1% der Masse, Umrechnung mit  $E = mc^2$
- Nur Kernumwandlungen liefern ausreichend Energie für die sehr aufwändigen Prozesse in Sternen.
- Die Rate von Kernreaktionen mit geladenen Teilchen ist stark von der Temperatur des astrophysikalischen Plasmas abhängig.

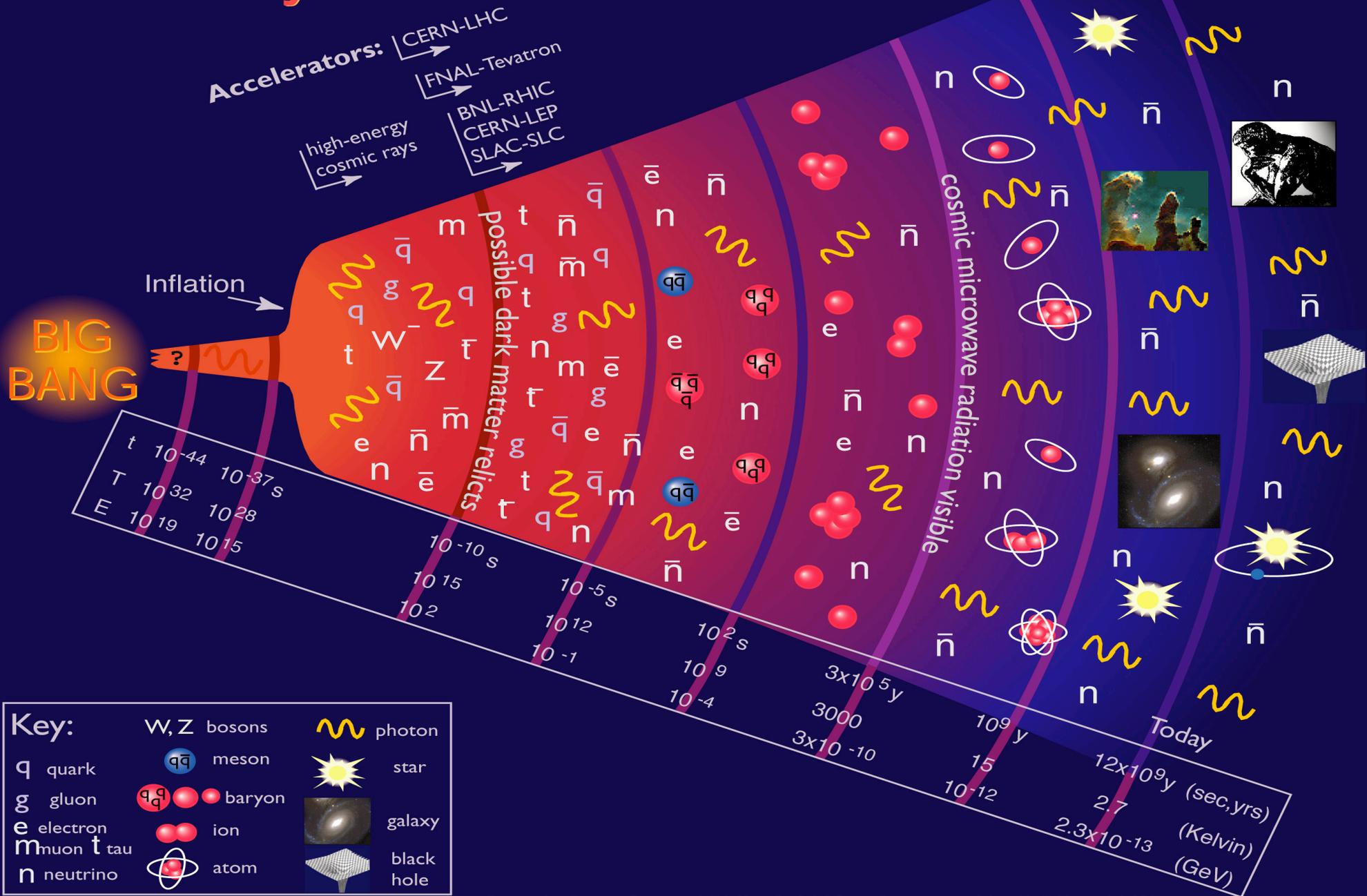
## Heute

- Ausfrieren von Neutron und Proton aus dem Quark-Gluon-Plasma
- Theorie zur Entstehung der leichten Elemente im Urknall
- Experiment zur Entstehung der leichten Elemente im Urknall
- Beobachtungen von Urknall-Elementhäufigkeiten

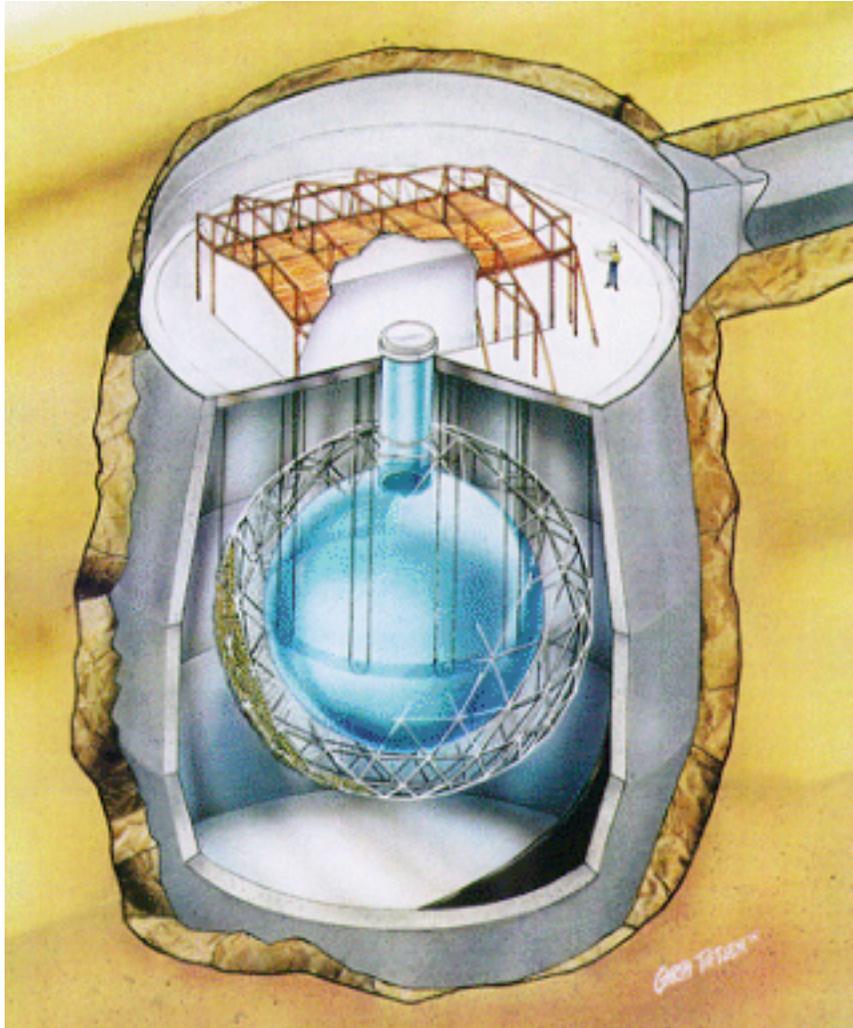
# Nuklidkarte



# History of the Universe



## Lebensdauer von gebundenem Neutron und Proton: Experiment



SNO-Detektor, Sudbury/Kanada, 2000 m unter Tage

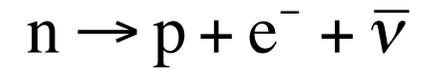
1000 t D<sub>2</sub>O (schweres Wasser)

Gesucht wird nach  $\gamma$ -Strahlen aus dem Zerfall angeregter Zustände von <sup>15</sup>N und <sup>15</sup>O (entstanden durch das Verschwinden eines Neutrons oder Protons aus dem im Wasser enthaltenen <sup>16</sup>O-Kern).

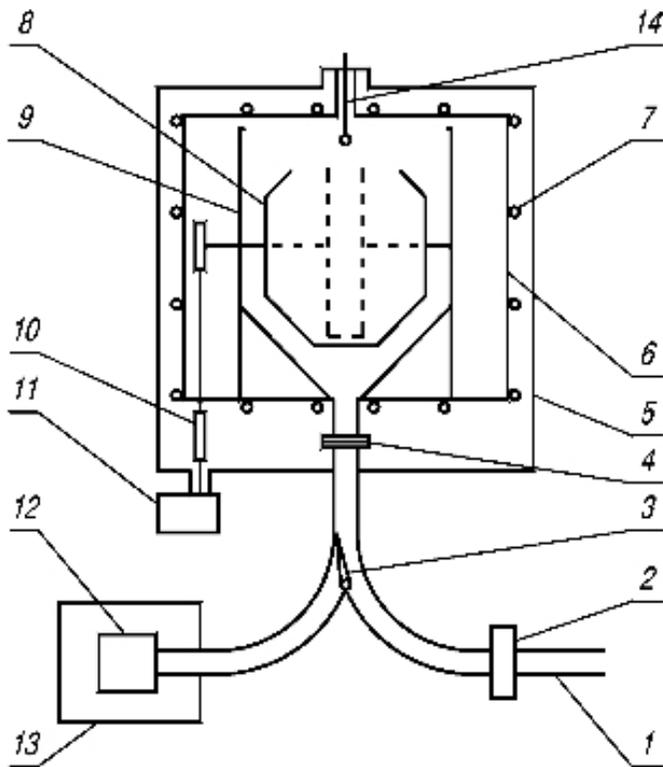
Es wurden keine solchen Ereignisse beobachtet, entsprechend einer unteren Grenze für die Lebensdauer des Protons von  $\tau > 10^{29}$  a

<http://www.sno.phy.queensu.ca/>

# Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment

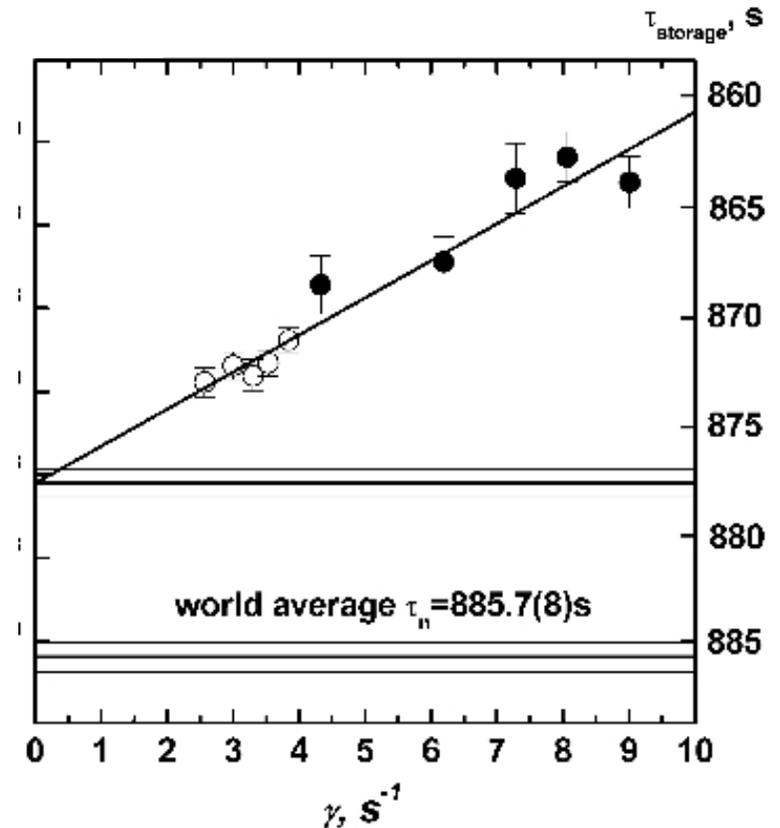


$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2 > 938.3 \text{ MeV}/c^2 + 0.5 \text{ MeV}/c^2 = m_p + m_e$   
 Also Neutronen-Zerfall energetisch möglich!



$$t_{1/2} = \tau_n \ln 2$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{storage}}} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{\text{loss}}}$$

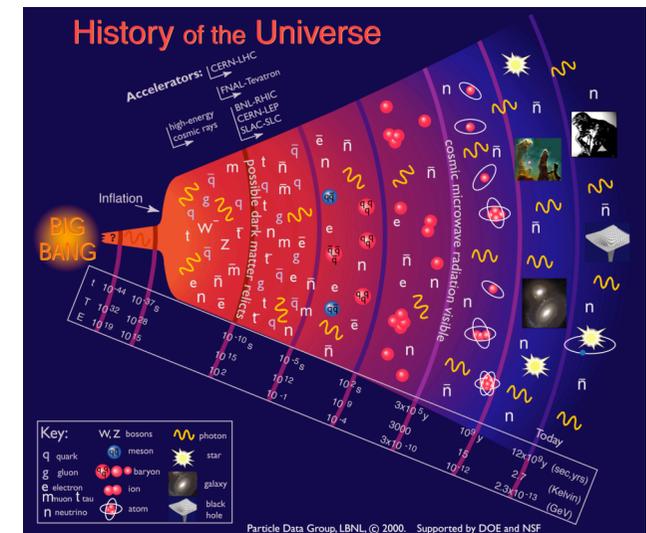


Experiment mit Neutronenfalle (geschlossen durch Gravitation)

A. Serebrov et al., Physics Letters B (2005), <http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0408009>

# Verhältnis von Neutronen- zu Protonenzahl zu Beginn der Nukleosynthese

- $m_n - m_p = 939.6 \text{ MeV}/c^2 - 938.3 \text{ MeV}/c^2 = 1.3 \text{ MeV}/c^2$
- Im chemischen Gleichgewicht ergibt sich dann eine Boltzmann-Verteilung für die Häufigkeit des Neutrons (= um  $m_n - m_p$  höhere Energie)  
 $\sim \exp(- (m_n - m_p) / T)$   
 bei Temperatur  $T$  (in MeV)
- Ausfrieren ("freeze-out") des n/p-Verhältnisses im weiteren Verlauf des Urknalls, wenn die Wechselwirkung zwischen n und p schneller sinkt als die Expansionsrate des Universums, bei  $T \sim 0.8 \text{ MeV}$   
 $\exp(- (m_n - m_p) / T) = \exp(-1.3 / 0.8) \sim 0.2$
- Freier Zerfall der Neutronen für etwa 200 s, im Endeffekt  $n/p \sim 1/7$



## Entstehung von ${}^4\text{He}$

- Neutron und Proton nicht mehr im Gleichgewicht miteinander, nun können sie Kerne bilden
- Gewinn von Bindungsenergie durch Bildung von Kernen, größter Gewinn bei  ${}^4\text{He}$
- Konzentration fast aller überlebenden Neutronen in  ${}^4\text{He}$ ,  $n/p \sim 1/7$

- Berechnung des Massenanteils von  ${}^4\text{He}$  an der Masse des Nukleonen-Universums durch einfaches Abzählen:

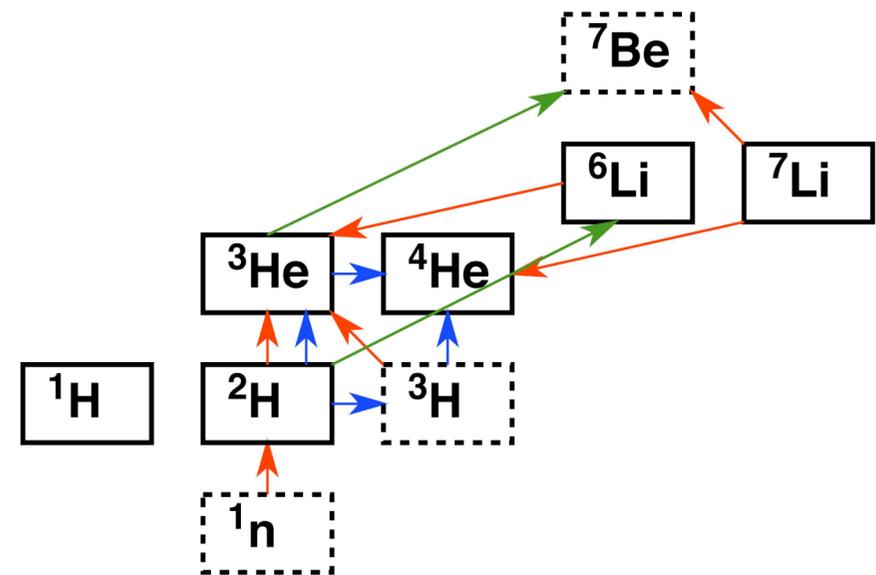
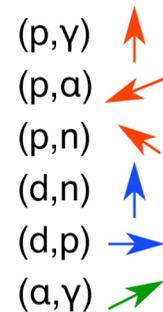
$$\frac{m({}^4\text{He})}{m_{\text{tot}}} = \frac{2n}{p+n} = \frac{2n/p}{1+n/p} = \frac{2/7}{8/7} = 0.25$$

- Der Rest der Masse bleibt im Element Wasserstoff, bis auf kleine Verunreinigungen

	5Be	6Be 92 KeV	7Be 53.22 D	8Be 5.57 eV
	P	$\alpha$ : 100.00% P: 100.00%	$\epsilon$ : 100.00%	$\alpha$ : 100.00%
	0	4487.2	5371.549	7062.435
3Li	4Li 6.03 MeV	5Li $\approx 1.5$ MeV	6Li STABLE 7.59%	7Li STABLE 92.41%
P	P: 100.00%	$\alpha$ : 100.00% P: 100.00%	5332.331	5606.4409
-2.3E+3	1.15E+3	5266		
	3He STABLE 0.000137%	4He STABLE 99.999863%	5He 0.60 MeV	6He 806.7 MS
	2572.6809	7073.915	N: 100.00% $\alpha$ : 100.00%	$\beta^-$ : 100.00%
			5481	4878.20
1H STABLE 99.985%	2H STABLE 0.015%	3H 12.32 Y	4H 4.6 MeV	5H 5.7 MeV
	1112.283	$\beta^-$ : 100.00%	N: 100.00%	N: 100.00%
		2827.2661	1.40E+3	1336
	Neutron 10.23 M			
	$\beta^-$ : 100.00%			

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

- 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  $^7\text{Li}$

	6B	7B	8B	9B	10B	11B
	5Be	6Be	7Be	8Be	9Be	10Be
3Li	4Li	5Li	6Li	7Li	8Li	9Li
	3He	4He	5He	6He	7He	8He
1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H
...	Neutron					

# Experiment zu ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}$ an LUNA, Gran Sasso (Italien)

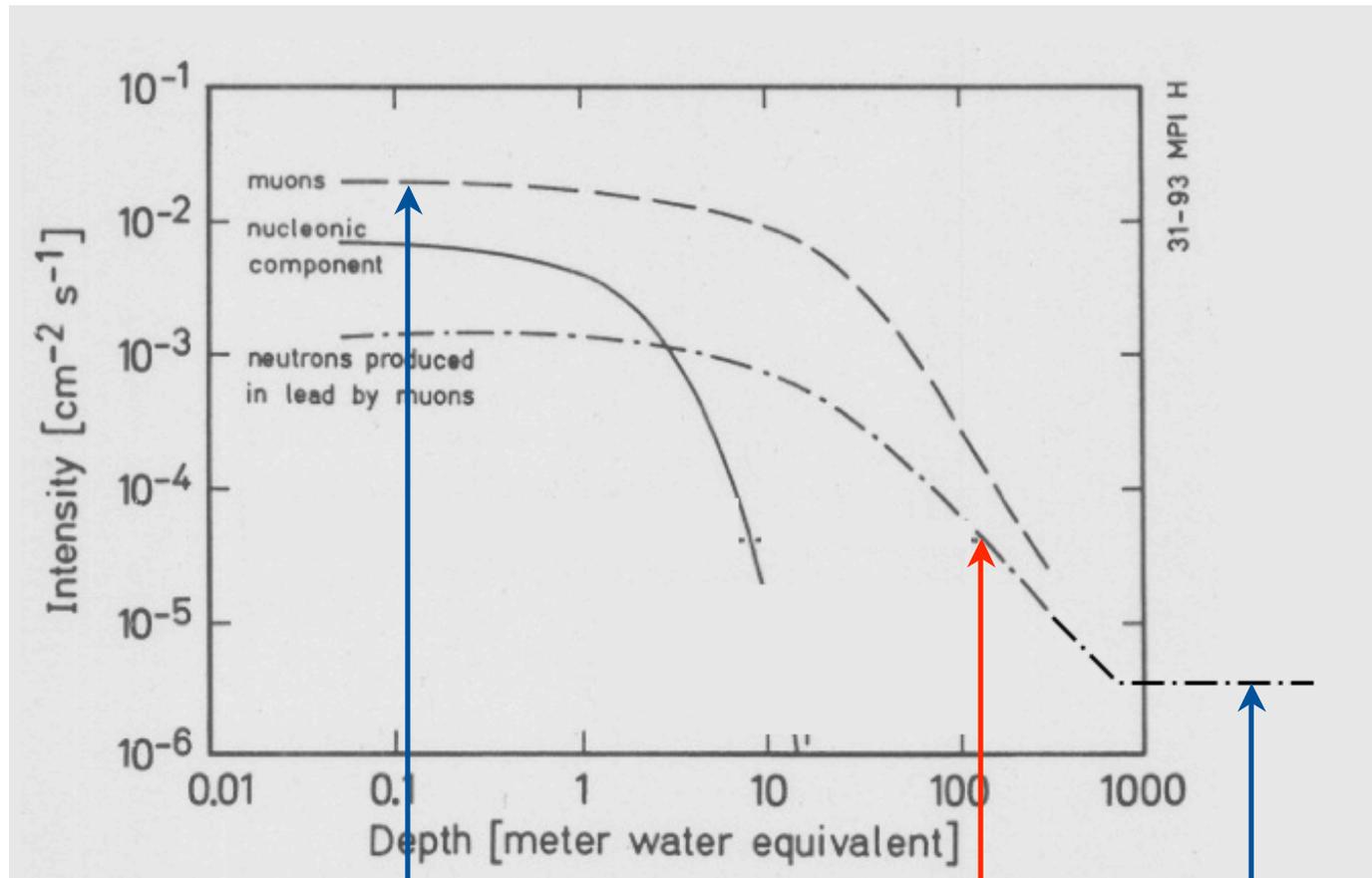


Labor unter 1400 m Fels



## Was nützen die 1400 m Fels (3400 m.w.e.)?

Felsdecke umgerechnet in m.w.e. = meters water equivalent; 1 m Fels = 2.7 m.w.e.

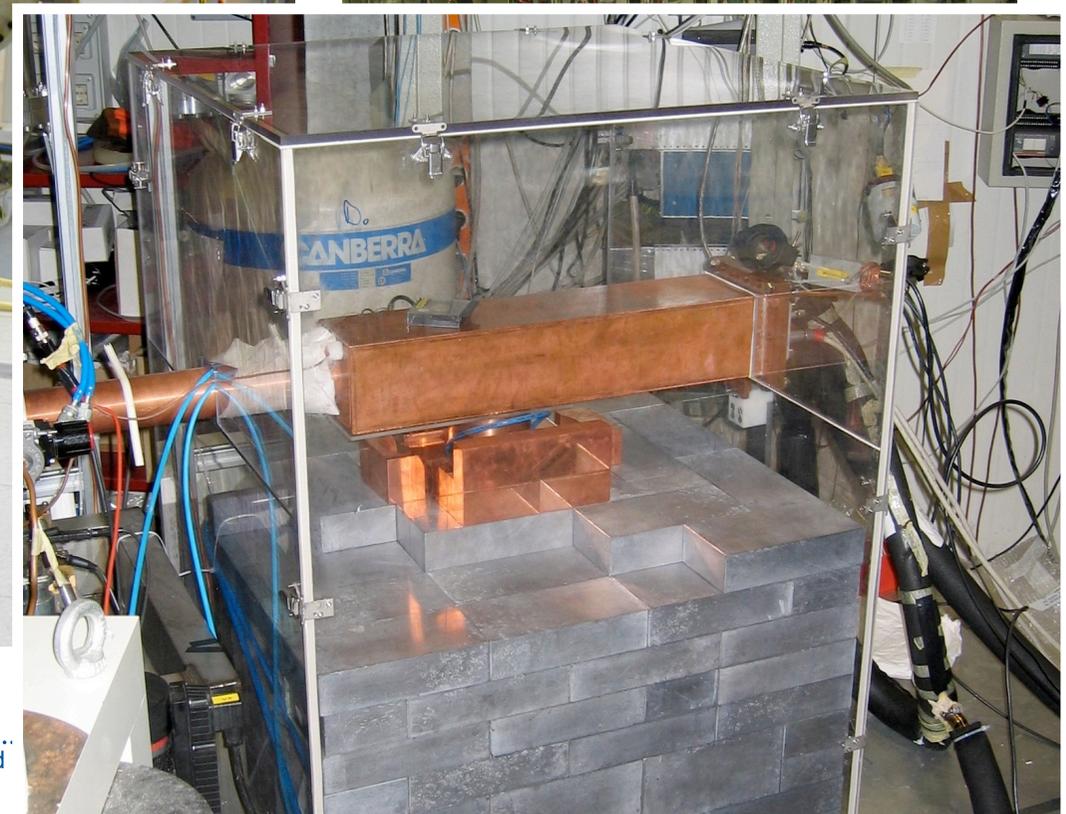
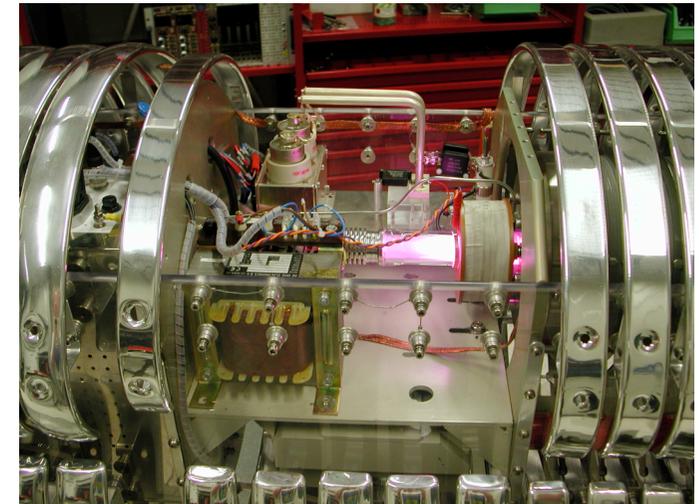
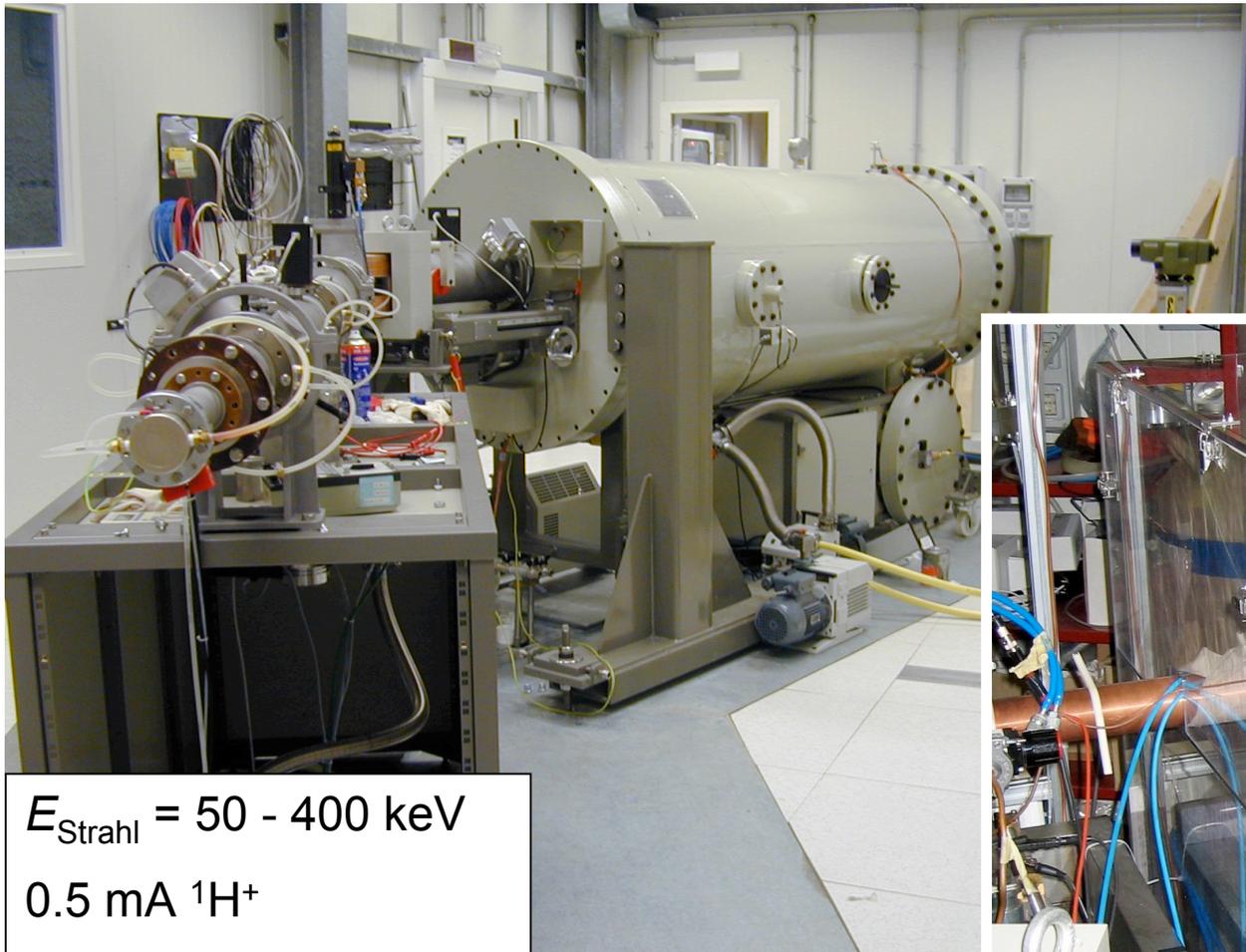


Erdoberfläche

Felsenkeller  
Dresden

Gran Sasso

# Experiment zu ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ : Der Beschleunigerraum von LUNA

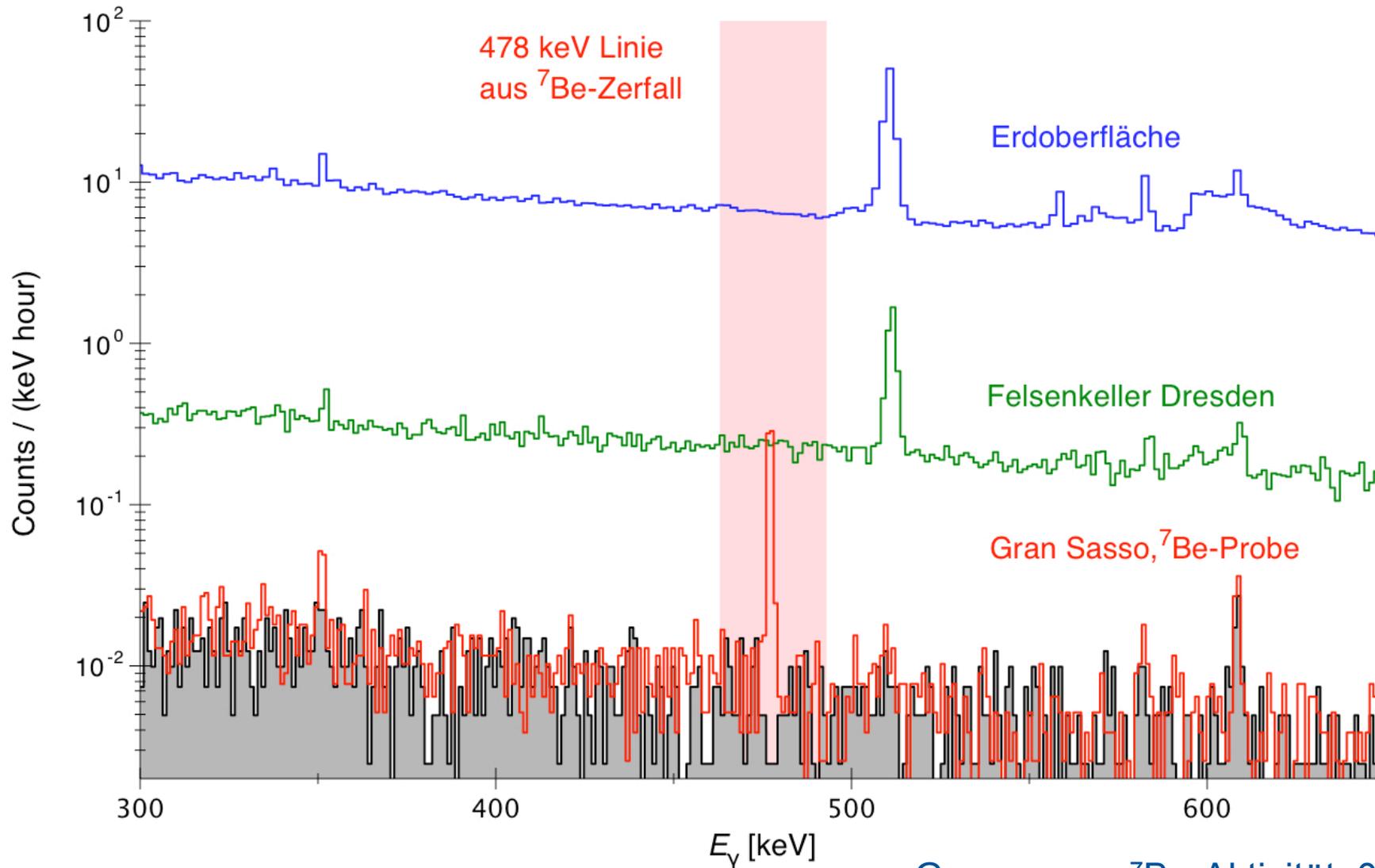


$E_{\text{Strahl}} = 50 - 400 \text{ keV}$

0.5 mA  ${}^1\text{H}^+$

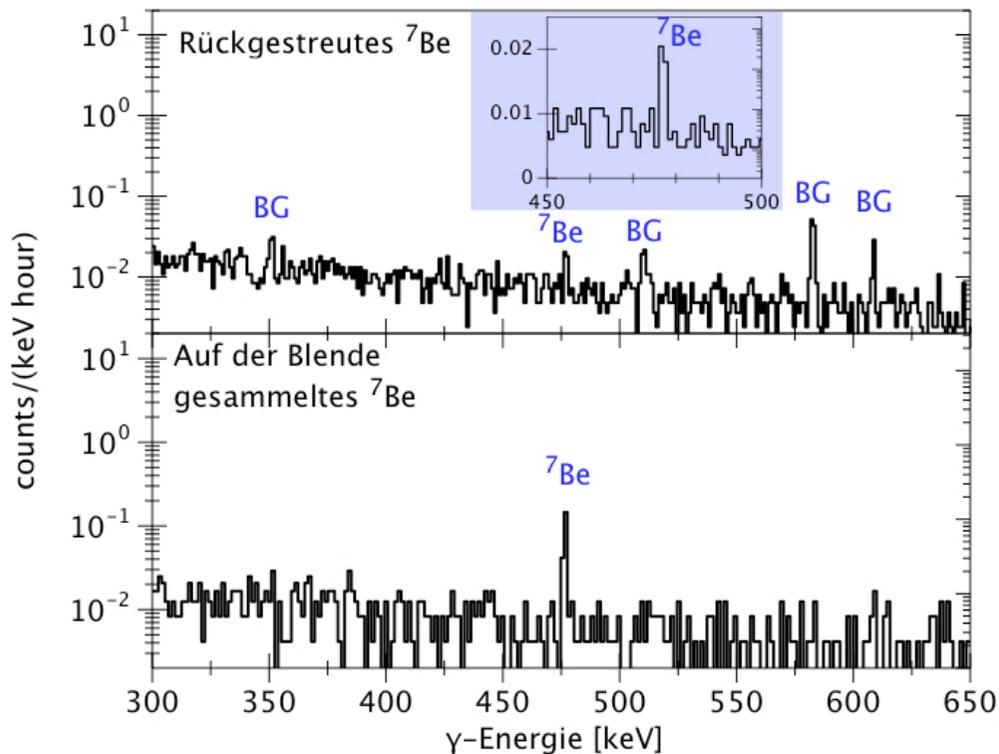
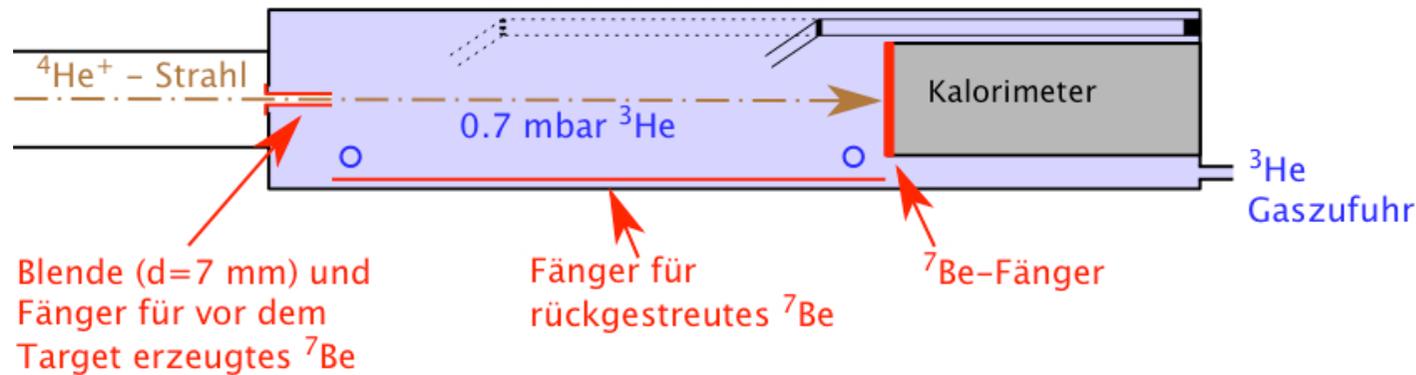
0.3 mA  ${}^4\text{He}^+$

# Messung zur Urknall-Nukleosynthese: ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ an LUNA, ${}^7\text{Be}$ -Spektren



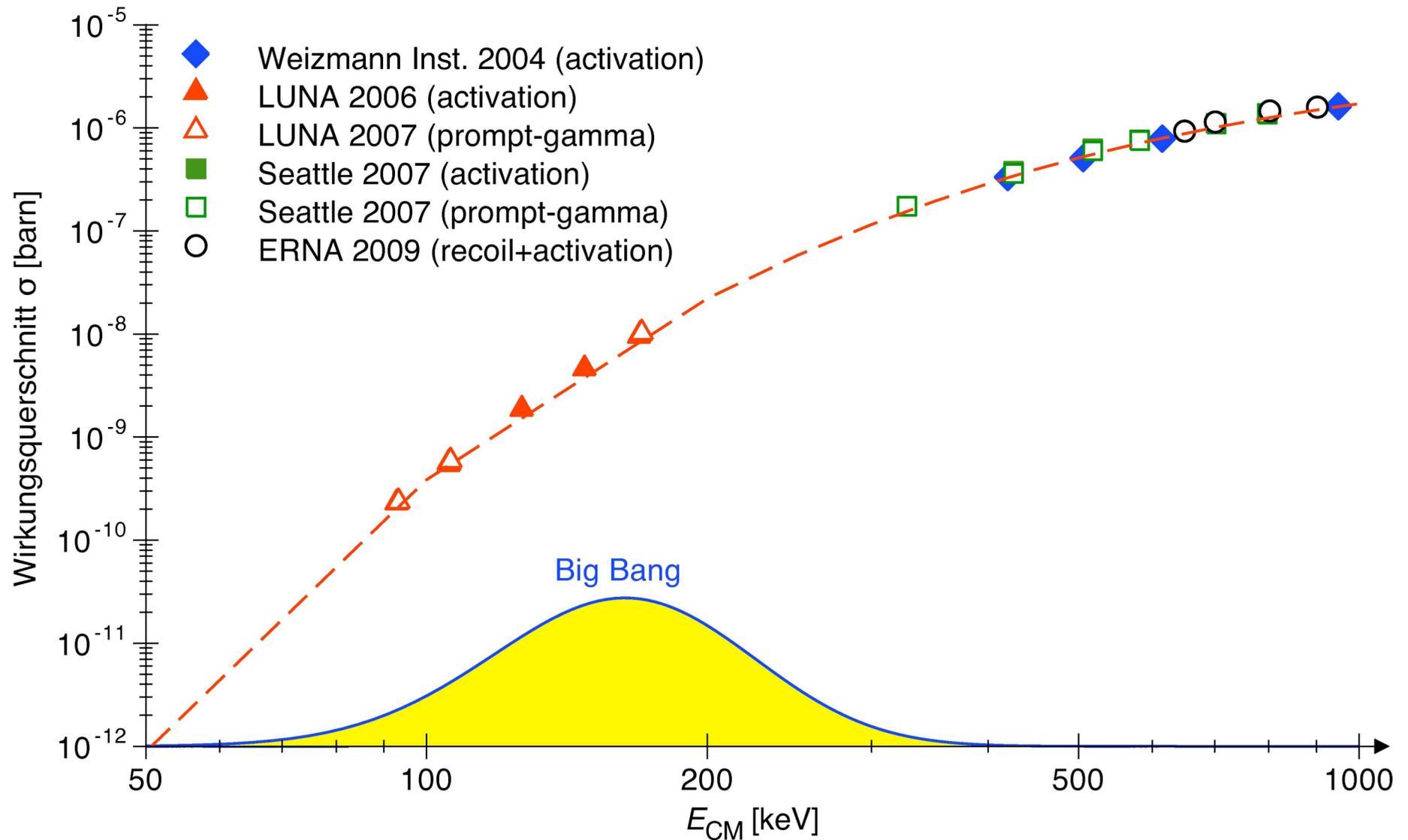
Gemessene  ${}^7\text{Be}$ -Aktivität: 0.8 - 600 mBq

# $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ -Aktivierungsmessung an LUNA



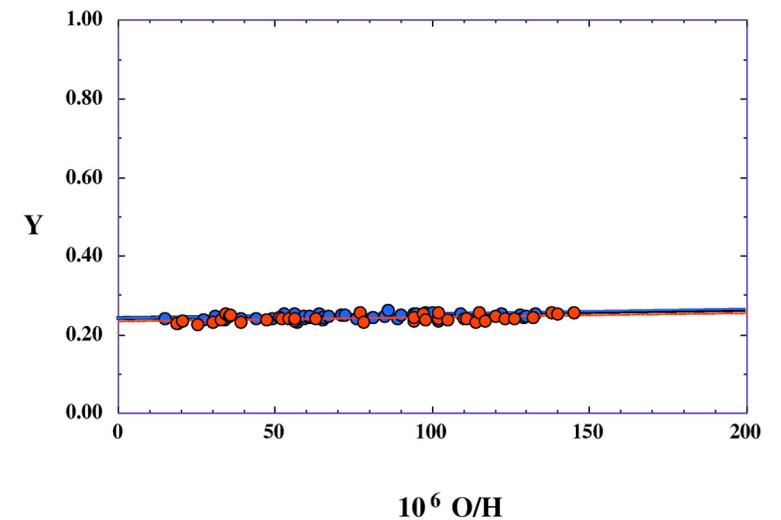
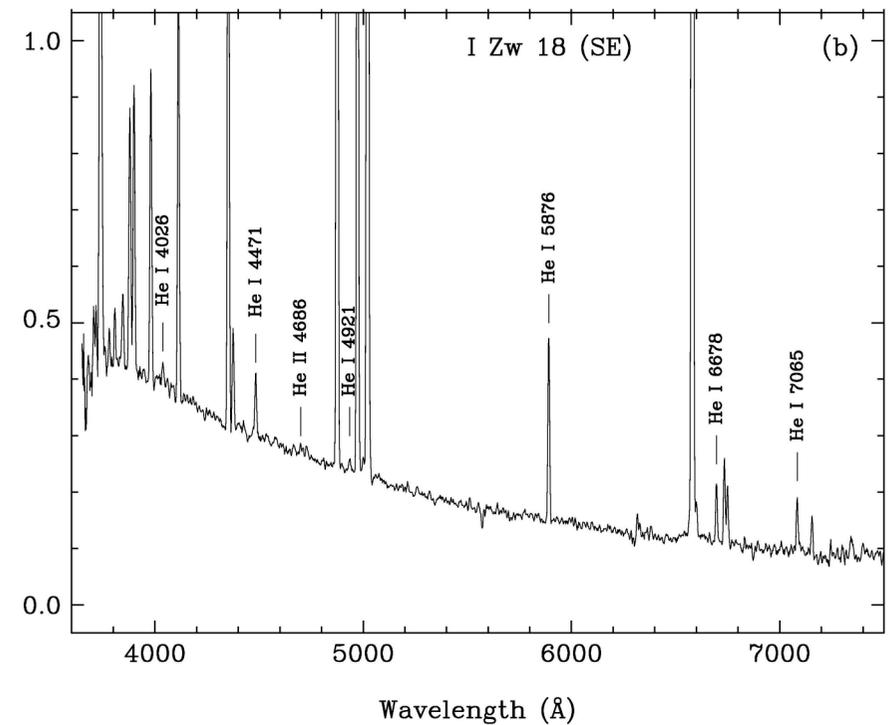
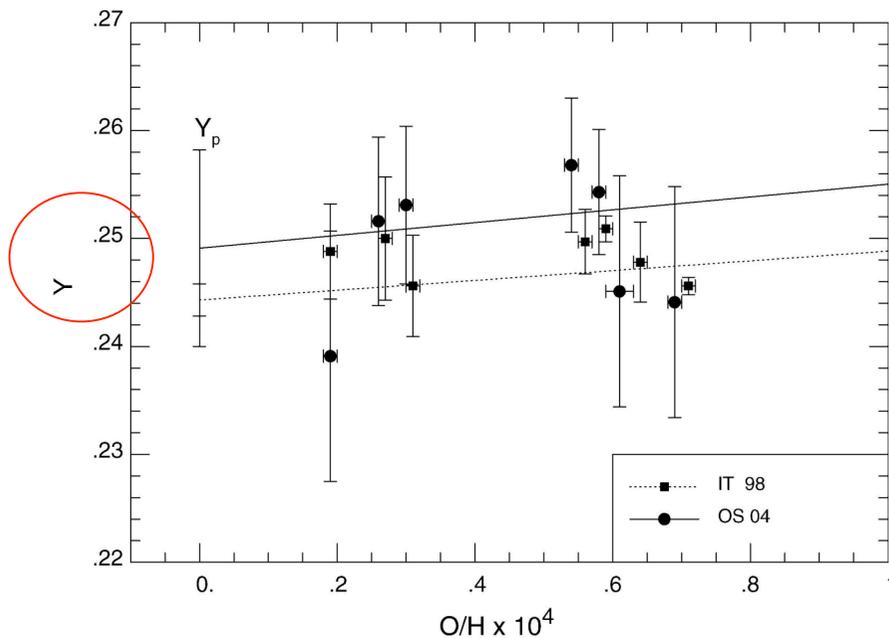
$\gamma$ -Nachweiswahrscheinlichkeit	1.8%
Strahlintensität	1.5%
Gasdichte	1.5%
$^7\text{Be}$ -Verluste	0.7%
<b>Systematische Unsicherheit</b>	<b>3.0%</b>

## ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ -Aktivierungsmessung an LUNA, Ergebnisse

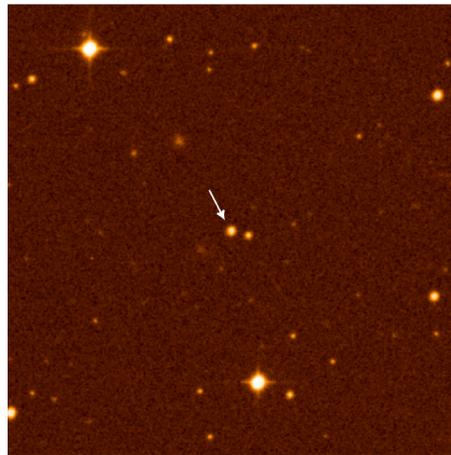


# Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: $^4\text{He}$

- Beobachtung von  $^4\text{He}$ -Linien in Gaswolken
- Häufigkeit als Funktion des Alters, ausgedrückt als Anreicherung der Gaswolke in Sauerstoff O/H
- Fit und Extrapolation zu Null



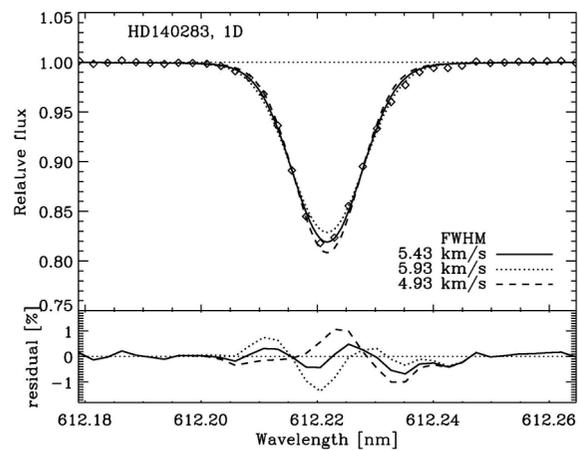
# Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-„Plateau“



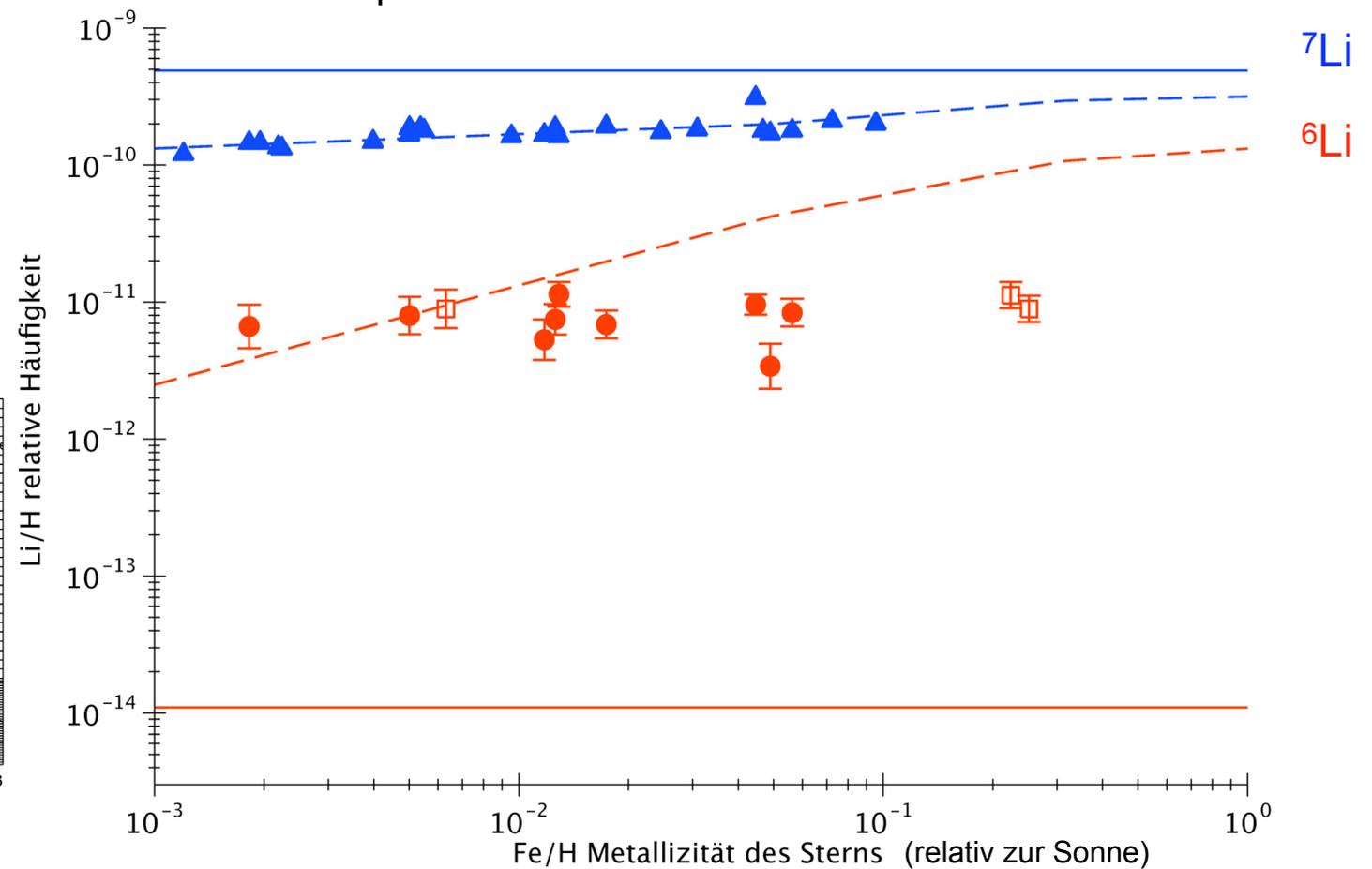
The Very Metal-Deficient Star HE 0107-5240

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

© European Southern Observatory

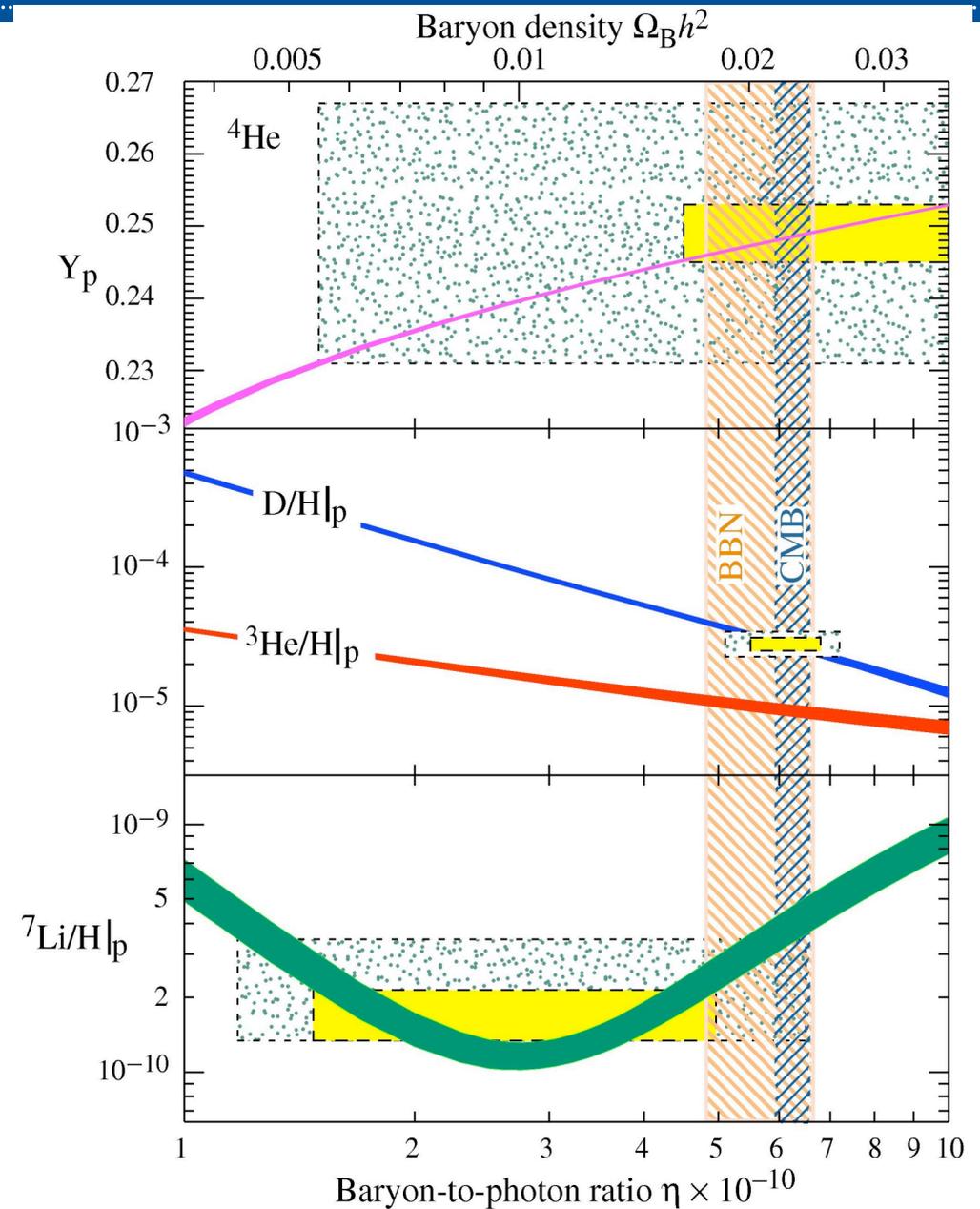
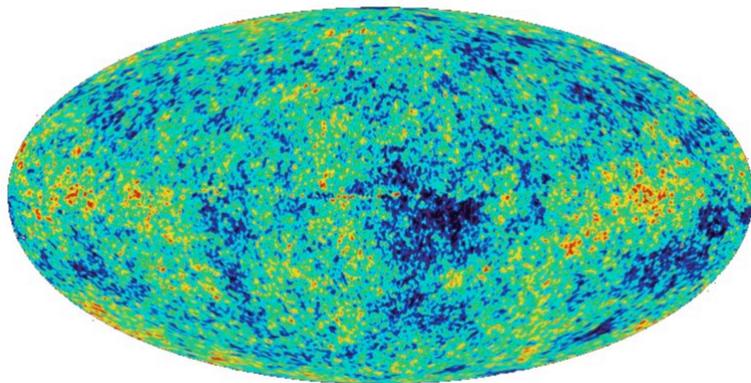


- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit  $A > 7$
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null



# Gesamtschau der Nuklidhäufigkeiten: $^4\text{He}$ , $^2\text{H}$ , $^7\text{Li}$

Vorhersage und Beobachtung stimmen  
 einigermaßen überein für diese drei  
 Nuklide!



## Zusammenfassung

- Die Nuklide  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  und  $^7\text{Li}$  der drei leichtesten Elemente entstanden in den ersten drei Minuten nach dem Urknall.
- Die makroskopisch beobachtbaren Häufigkeiten der leichten Elemente im Universum sind aufs Engste mit ihren mikroskopischen Eigenschaften verknüpft.
- Die Nuklide  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  und wahrscheinlich  $^6\text{Li}$  entstanden durch Stöße von kosmischer Strahlung mit dem interstellaren Medium (“Spallation”).
- Alle weiteren bekannten Nuklide entstanden in Sternen und deren Explosionen.

