

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 (heute)**
- 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

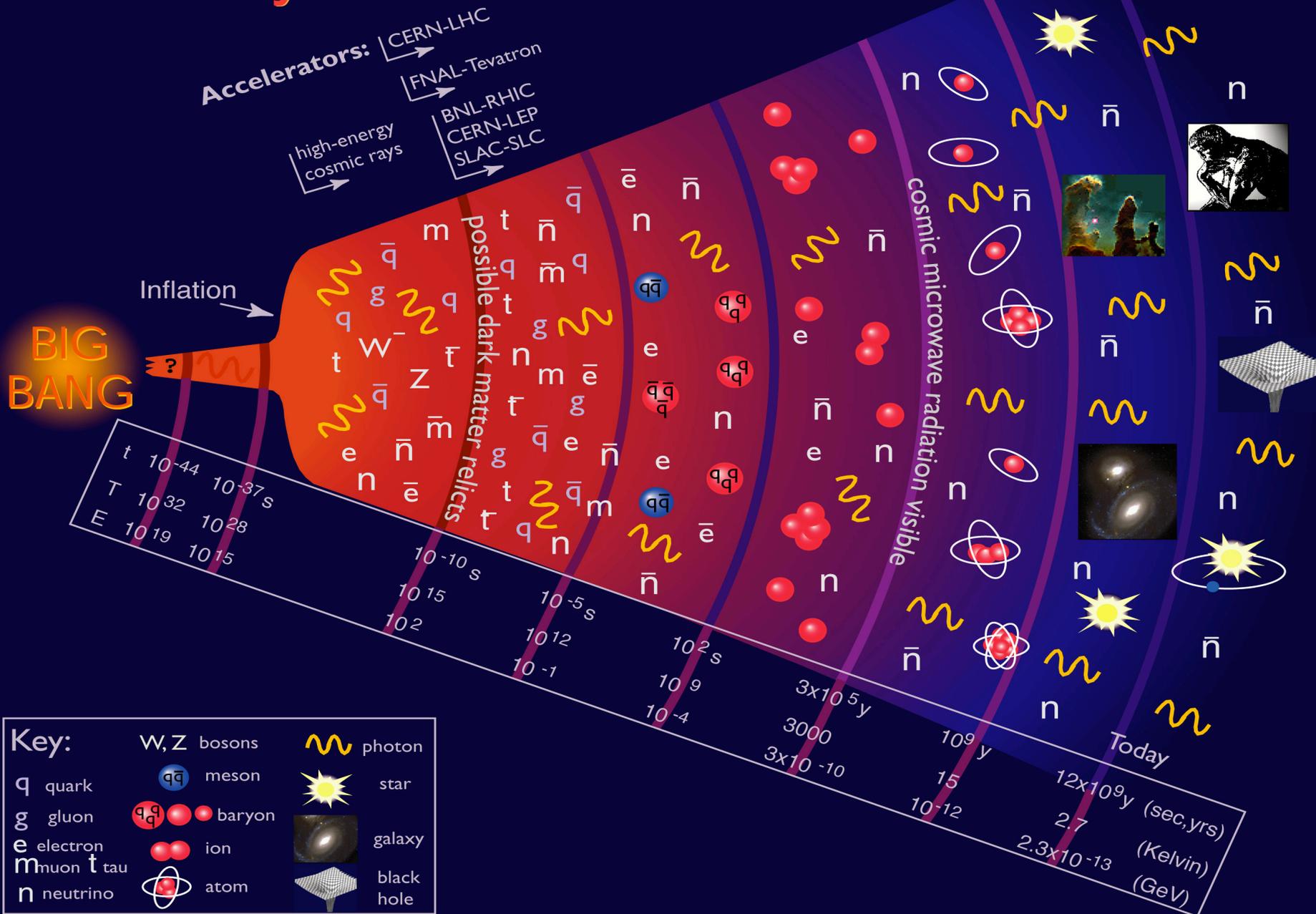
6. Vorlesung, 13.05.2014



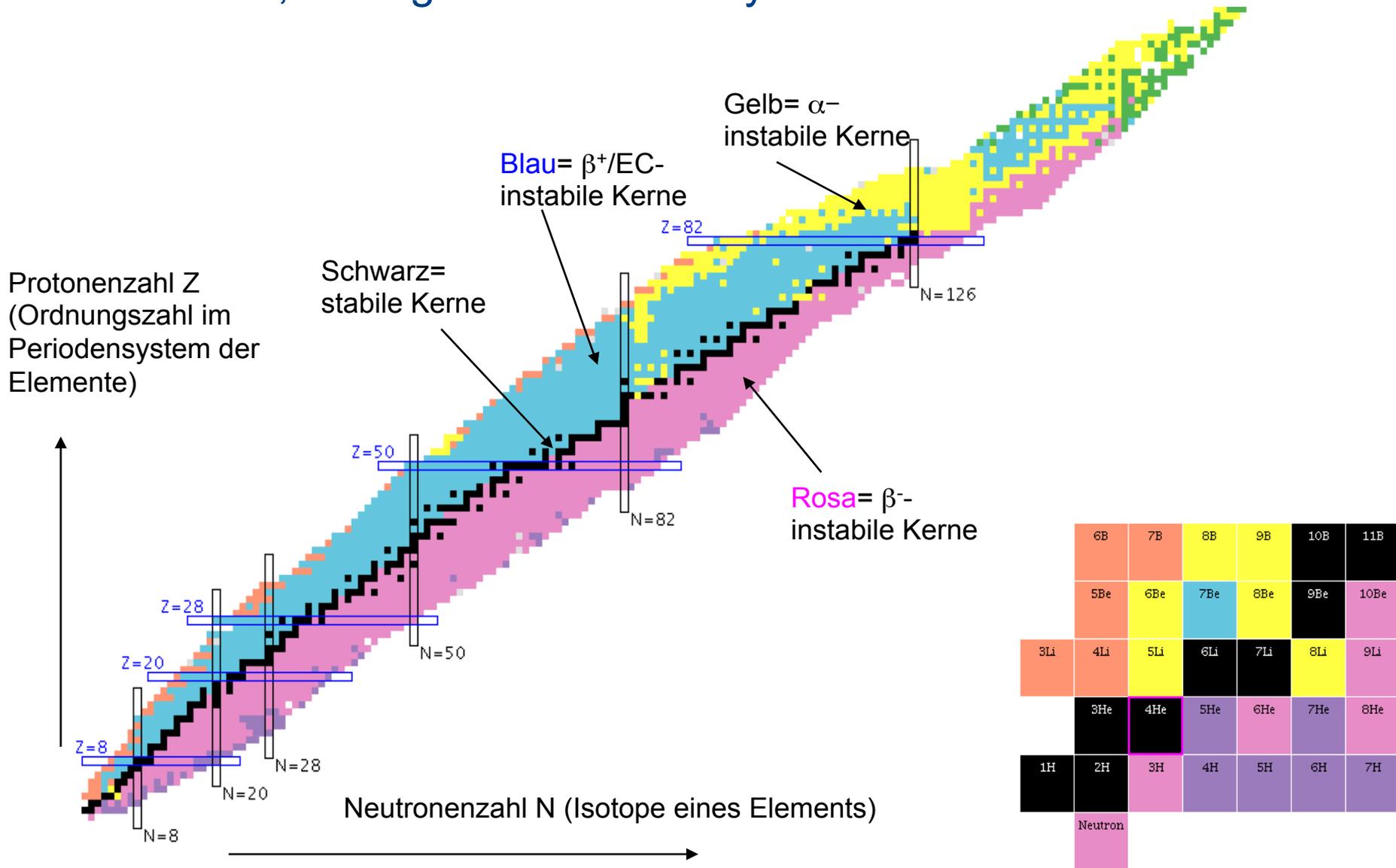
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



History of the Universe



Nuklidkarte, analog zum Periodensystem der Elemente



Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

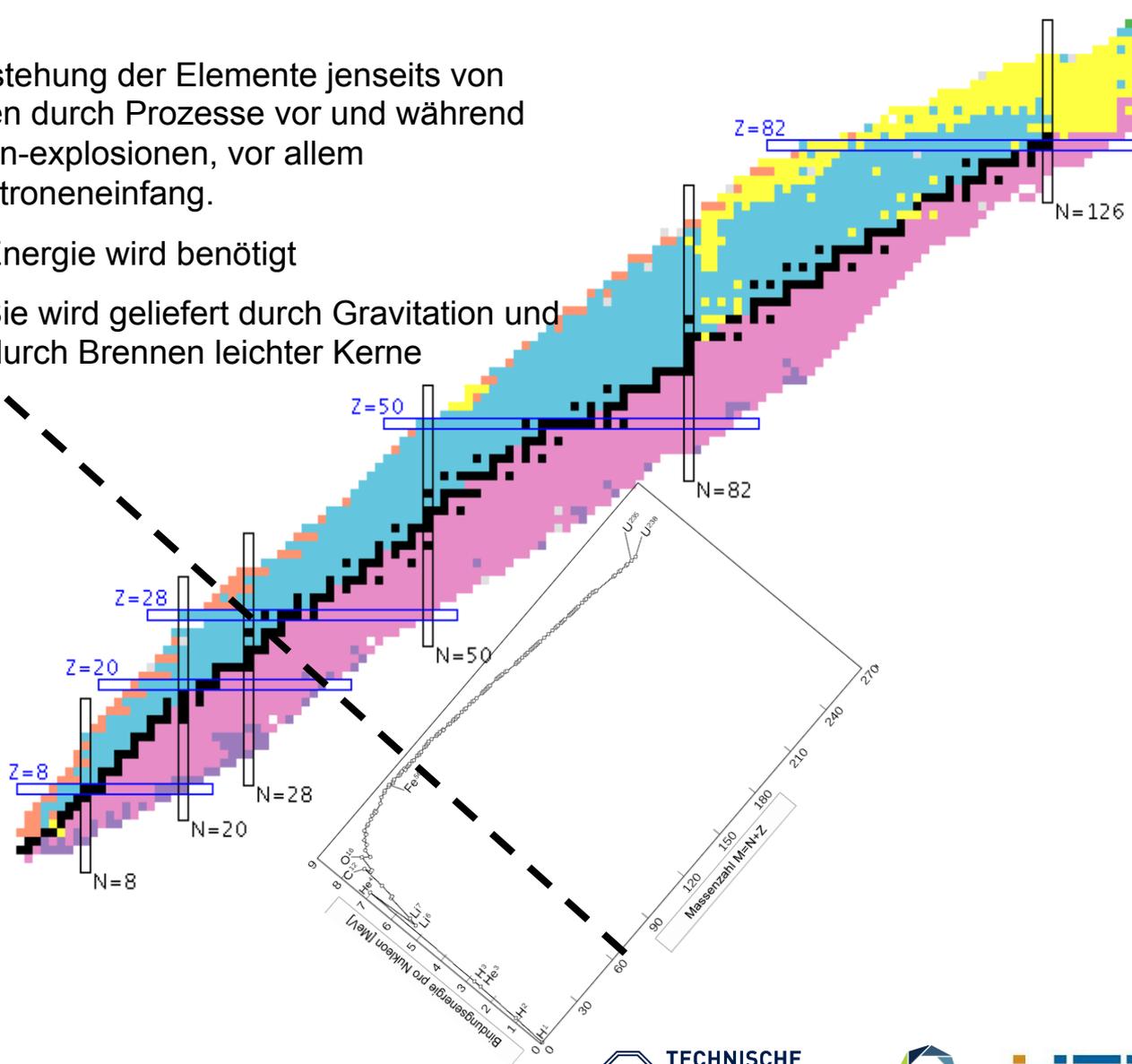
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

→ 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



Zur Notation von Zweikörper-Kernreaktionen

Projektil		Target		Ejektil		Restkern	
a	+	A	→	b	+	B	Kurz: A(a,b)B
Anfangszustand, „initial“, i				Endzustand, „final“, f			

a, A, b, B: Kurzform für beteiligte Kerne, z.B. ^{208}Pb
Abkürzung für leichte Teilchen **p, d, t, α**

Es gelten Energie- und Impulserhaltung, unter Berücksichtigung der Kernmassen $m(a)$, $m(A)$, $m(b)$, $m(B)$:
 $m(a) + m(A) = m(b) + m(B) + Q$

Q = sogenannter Q -Wert der Reaktion; $Q > 0$ bedeutet Energiegewinn bei der Reaktion
 $Q < 0$ bedeutet Energieverlust bei der Reaktion

Rechne statt der Massen zur Vereinfachung mit dem Massenüberschuss (*mass excess*) Δ :

$\Delta(\text{Kern}) = m(\text{Kern}) - A \cdot \text{a.m.u.}$ (*atomic mass unit*, definiert als 1/12 der ^{12}C -Masse), z.B.

$\Delta(^{12}\text{N}) = 11195 \text{ MeV}/c^2 - 12 \cdot 931.494 \text{ MeV}/c^2 = 17 \text{ MeV}/c^2$

Kernreaktionen: Definition des Wirkungsquerschnitts

Reaktion A(a,b)B	a= Projektil	A = Target
------------------	--------------	------------

- Geometrische Vorstellung: Immer, wenn ein Projektil die am Target “angeheftete” Fläche σ trifft, findet die Reaktion A(a,b)B statt

$$\frac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}} = \sigma \cdot \text{Targetatome} \frac{\text{Projektil}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

- Praktisch messbar:
Atommasse
- Targetatome pro Fläche = Dicke * Dichte /
- Projektil pro Zeit = Ionenstrom

$$\sigma = \frac{\frac{\text{Reaktionen}}{\text{Zeit}}}{\frac{\text{Targetatome}}{\text{Fläche}} \cdot \frac{\text{Projektil}}{\text{Zeit}}}$$

Besonderheiten:

- Differentieller Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$
- Partieller Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{elast}} + \sigma_{\text{inelast}}$

Lebensdauer und Halbwertszeit

- Differentialgleichung des radioaktiven Zerfalls, und ihre Lösung:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$

- Lebensdauer τ , Zerfallskonstante λ und Halbwertszeit $t_{1/2}$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$$

- Bei verschiedenen Zerfallsmöglichkeiten ein- und desselben Kerns addieren sich die $\lambda_{1,2}$:

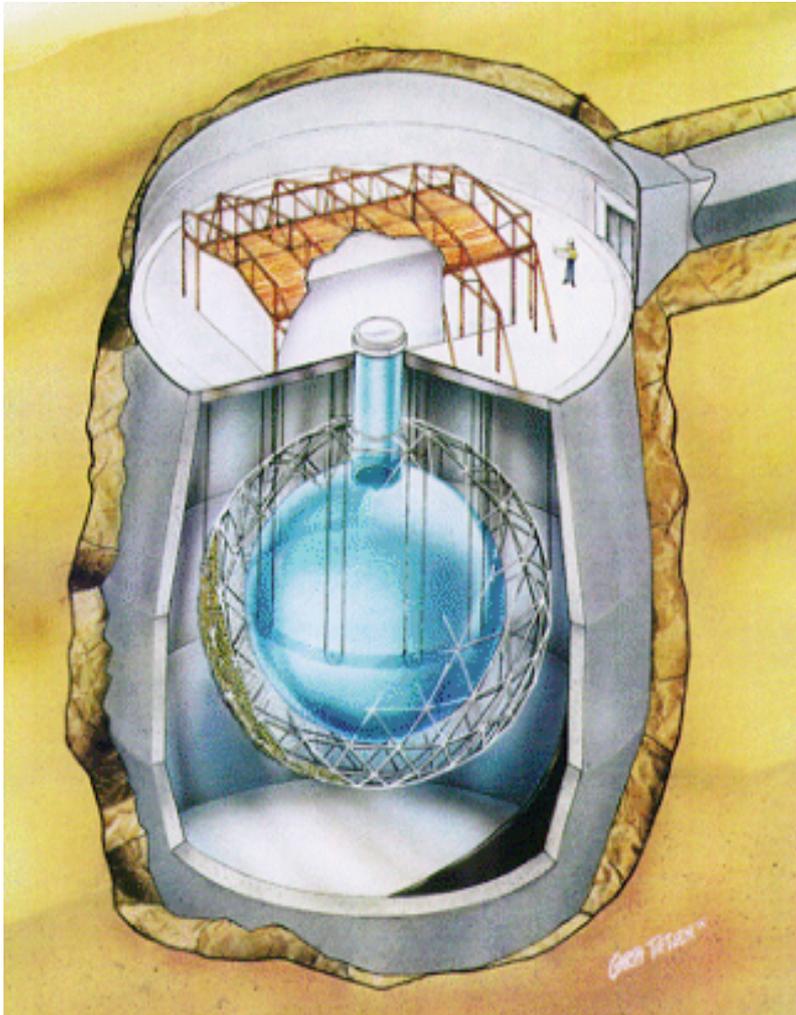
$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \dots$$

- Es kann auch konkurrierend zu einem radioaktiven Zerfall die Zerstörung desselben Kerns durch eine Kernreaktion auftreten:

$$\lambda_{\text{Reaktion}} = \sigma \frac{\text{Projektile}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

Gerechnet wird analog (Beispiel Hot-CNO-Zyklus)

Lebensdauer von gebundenem Neutron und Proton: Experiment



SNO-Detektor, Sudbury/Kanada, 2000 m unter Tage
1000 t D₂O (schweres Wasser)

Gesucht wird nach γ -Strahlen aus dem Zerfall angeregter Zustände von ^{15}N und ^{15}O (entstanden durch das Verschwinden eines Neutrons oder Protons aus dem im Wasser enthaltenen ^{16}O -Kern).

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

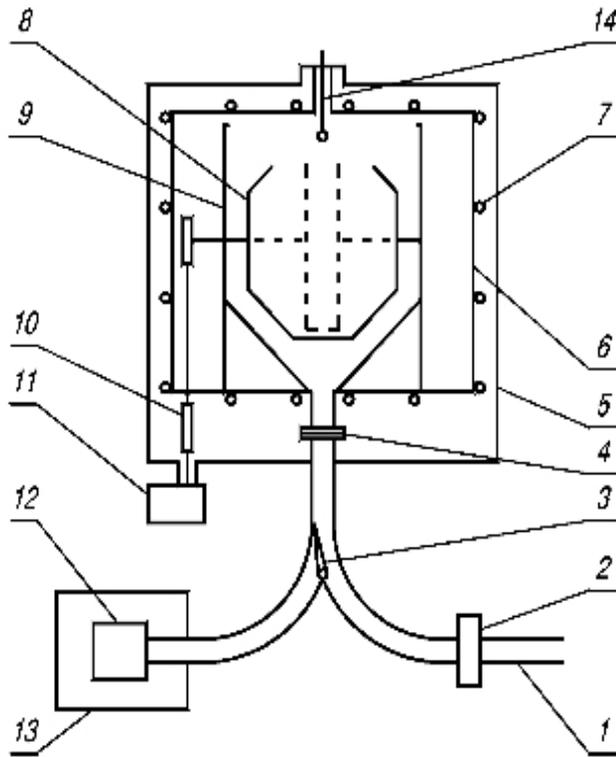
<http://www.sno.phy.queensu.ca/>

Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment



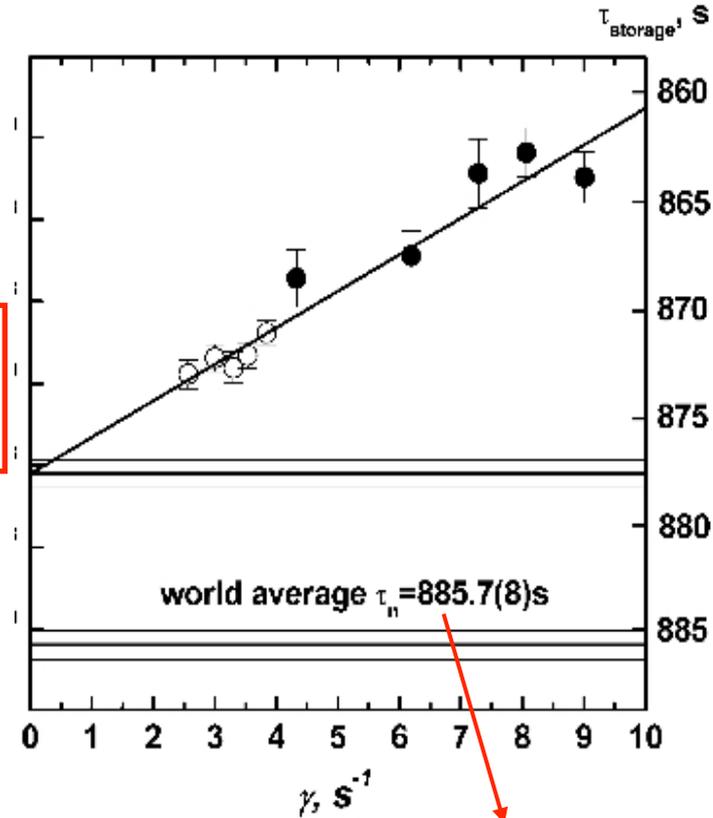
$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2 > 938.3 \text{ MeV}/c^2 + 0.5 \text{ MeV}/c^2 = m_p + m_e$$

Also Neutronen-Zerfall energetisch möglich!



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

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

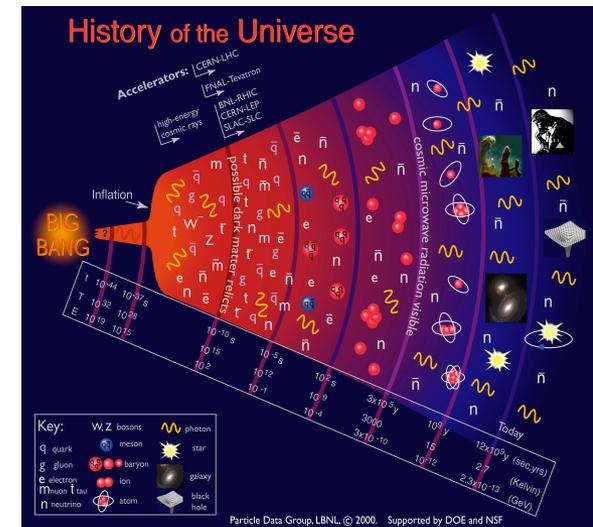


Experiment mit Neutronenfalle (geschlossen durch Gravitation)

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)
 $n/p \sim \exp(- (m_n - m_p)/T)$
 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 $T \sim 0.7 \text{ MeV}$
 $n/p = \exp(- (m_n - m_p)/T) = \exp(-1.3/0.7) = 0.16$
- Freier Zerfall der Neutronen für etwa 200 s, danach dann $n/p \sim 0.14 = 1/7$



Entstehung von ^4He

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

- Berechnung des Massenanteils von ^4He an der Masse des Nukleonen-Universums durch einfaches Abzählen:

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

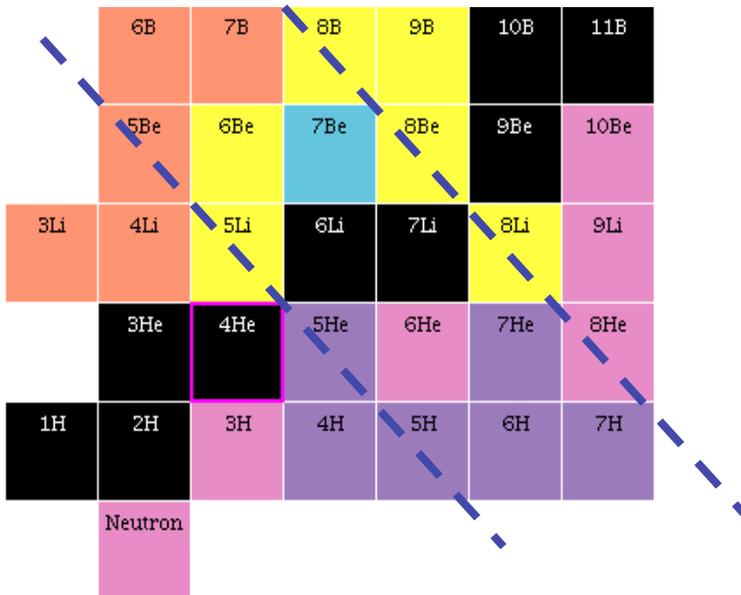
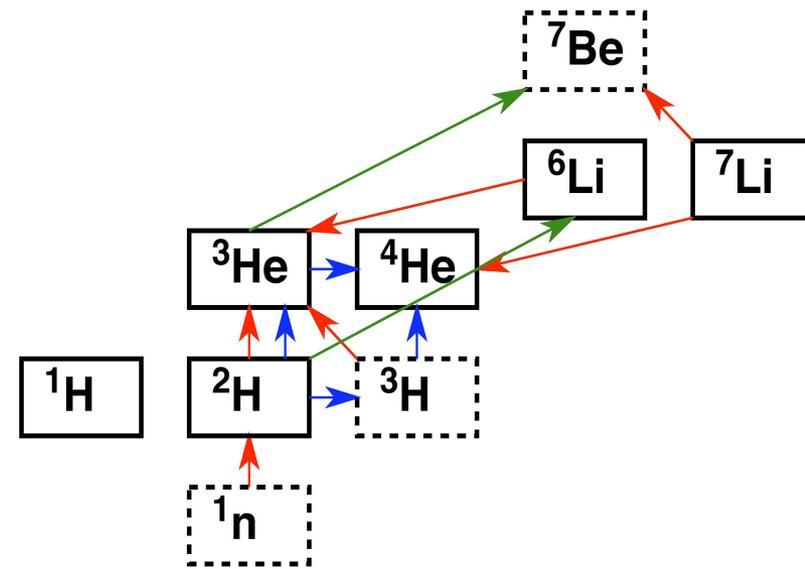
- Der Rest der Masse bleibt im Element Wasserstoff, bis auf kleine Verunreinigungen

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

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

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

(p, γ) 
 (p, α) 
 (p, n) 
 (d, n) 
 (d, p) 
 (α, γ) 



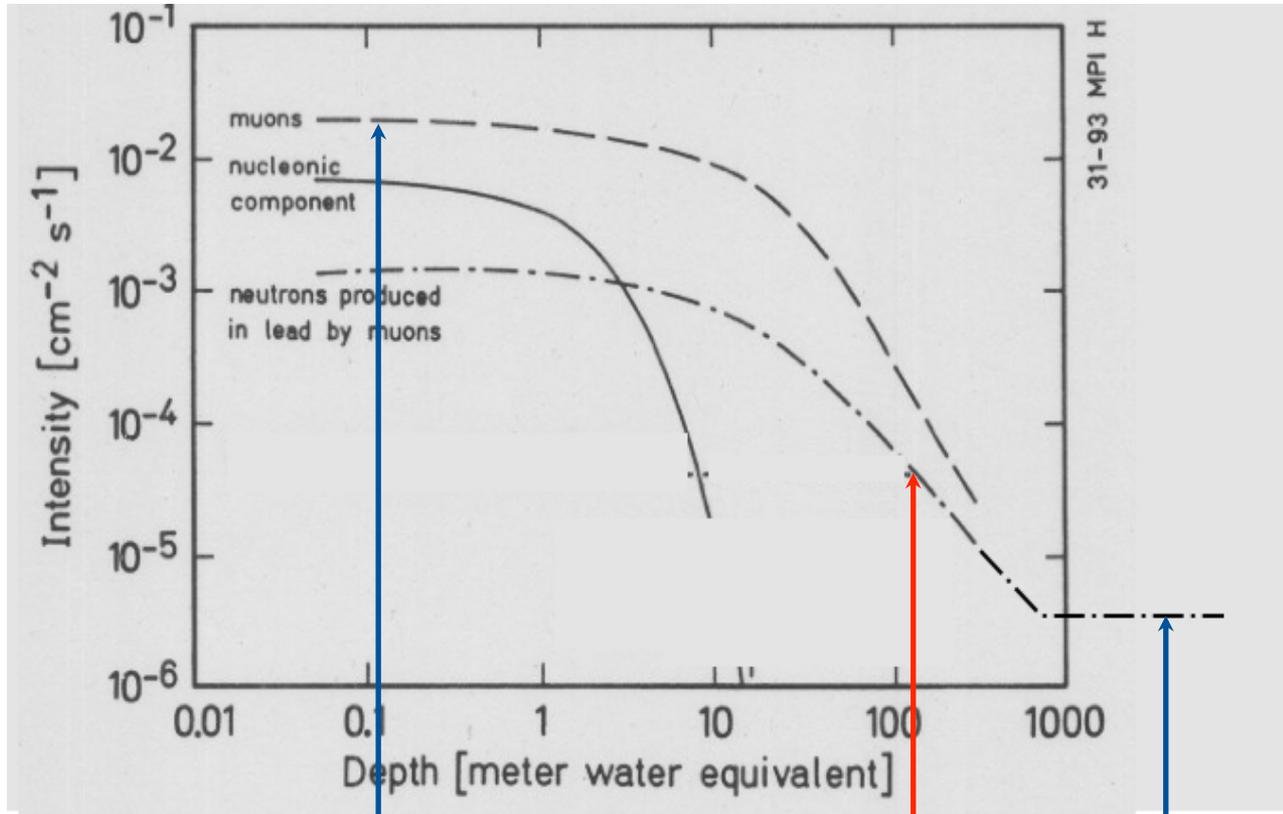
- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in ^4He gebunden
- Coulombschwelle $\sim Z_1 Z_2$ behindert den Einfang von ^4He
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei ^7Li

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



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.

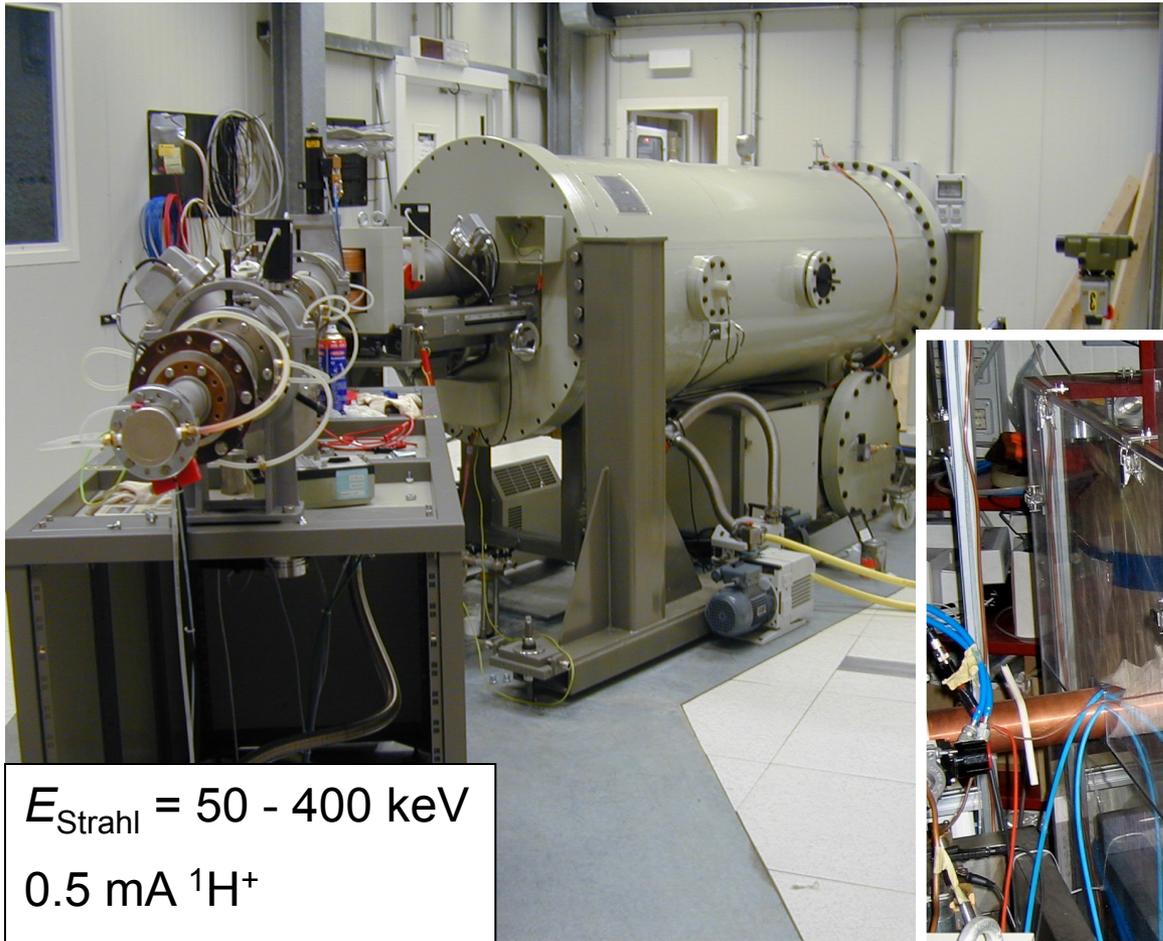
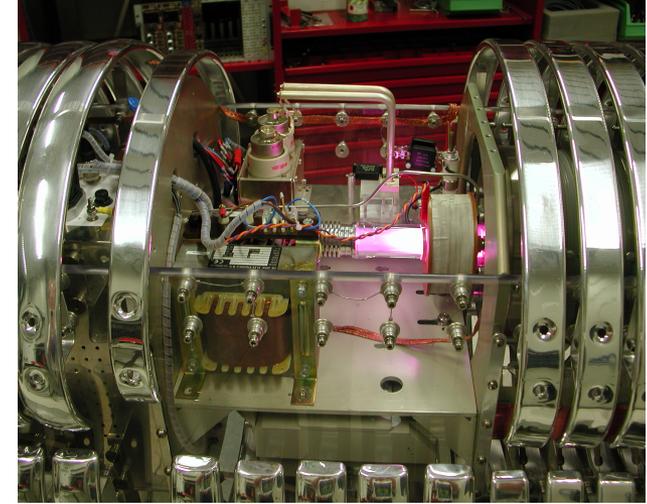


Erdoberfläche

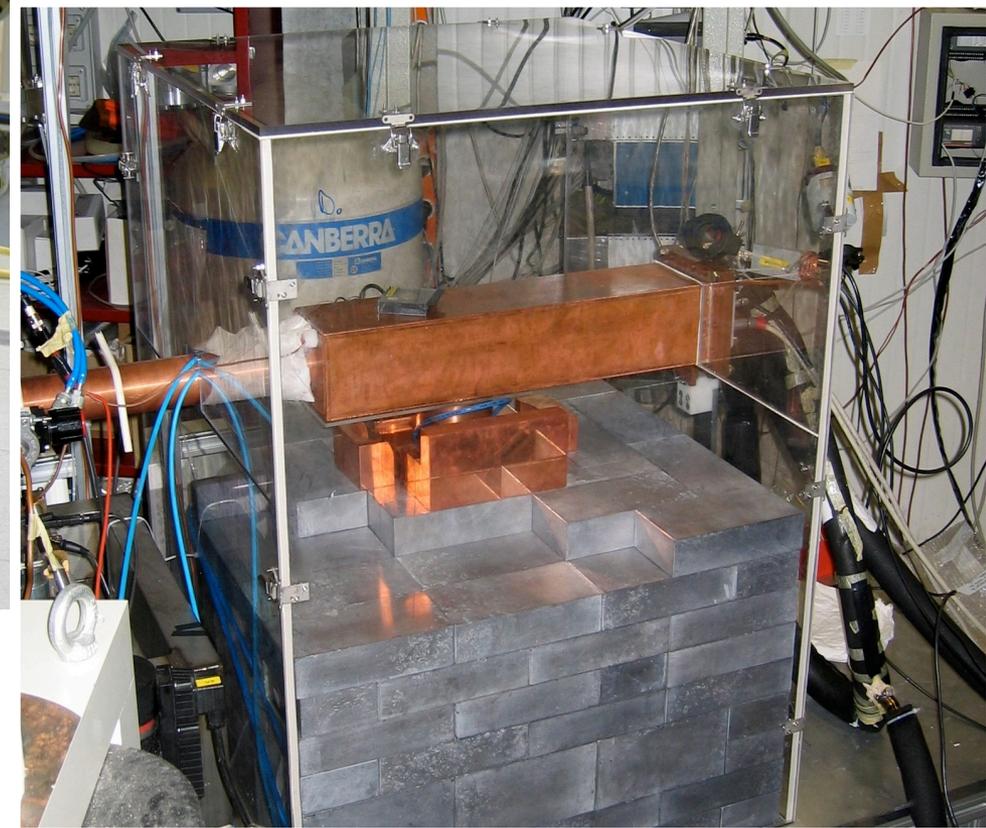
Felsenkeller
Dresden

Gran
Sasso

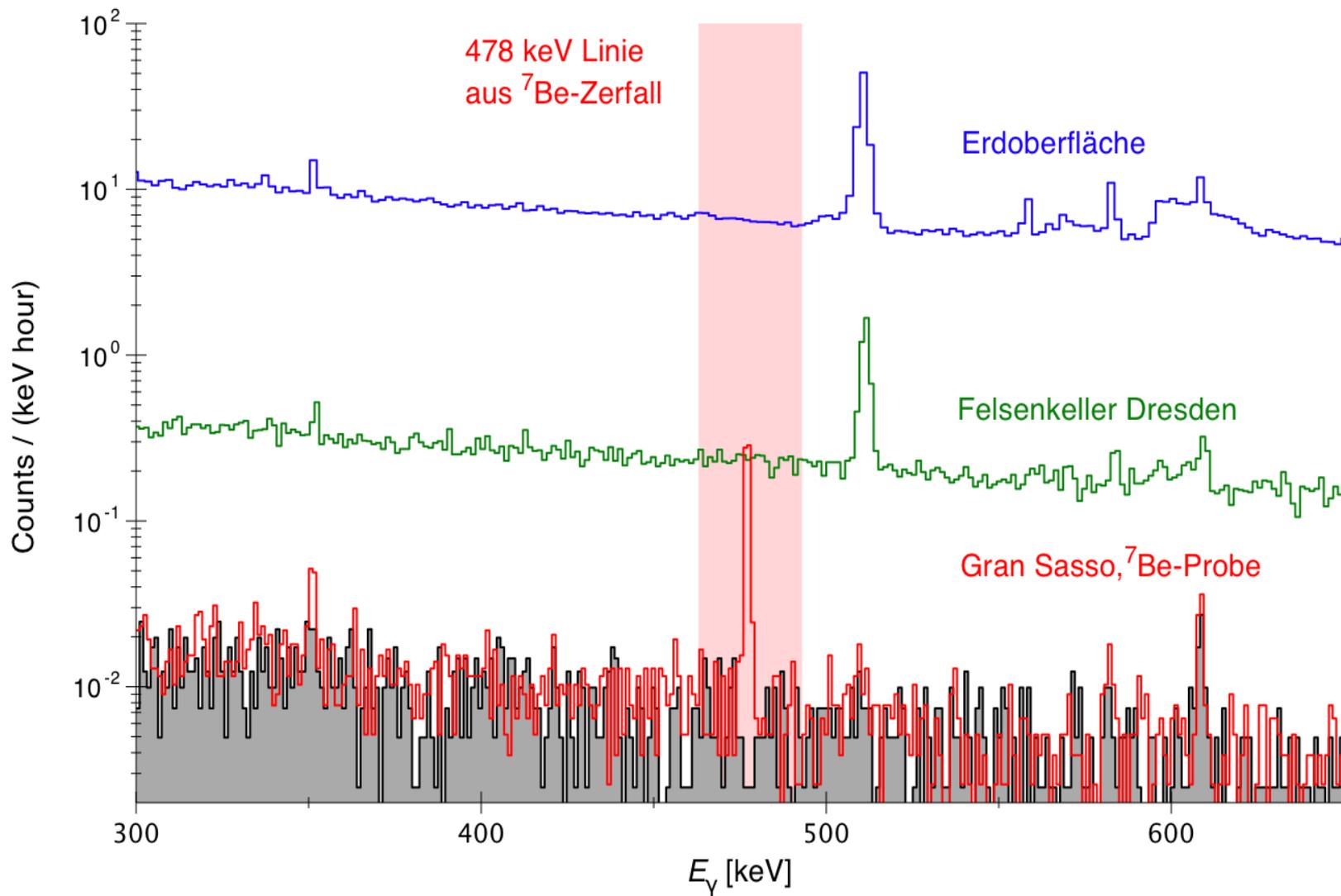
Experiment zu ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$: Der Beschleunigerraum von LUNA



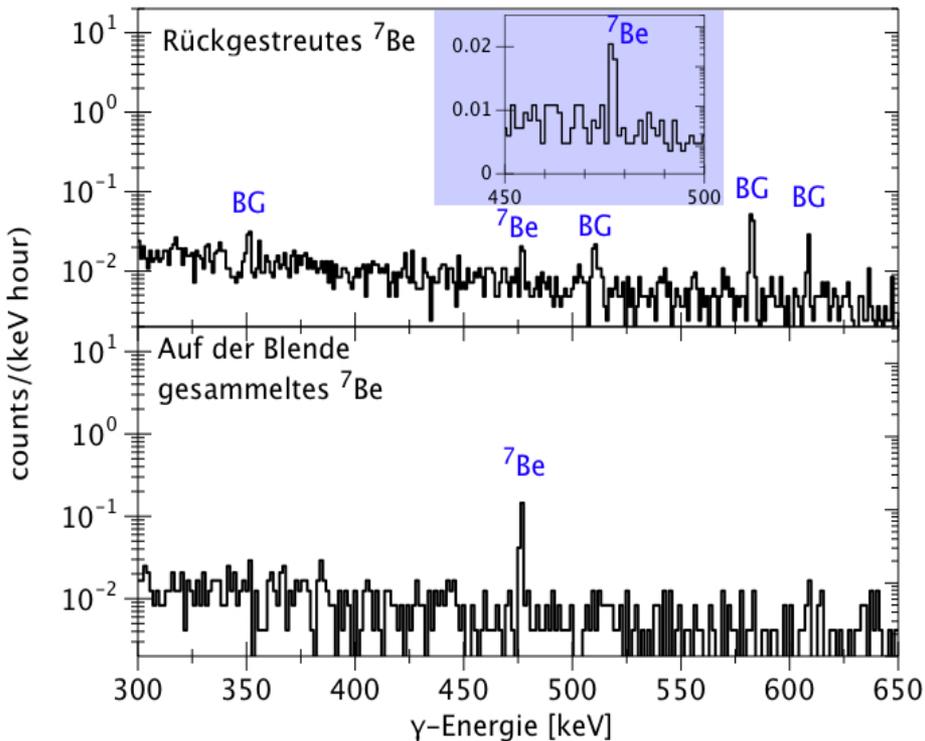
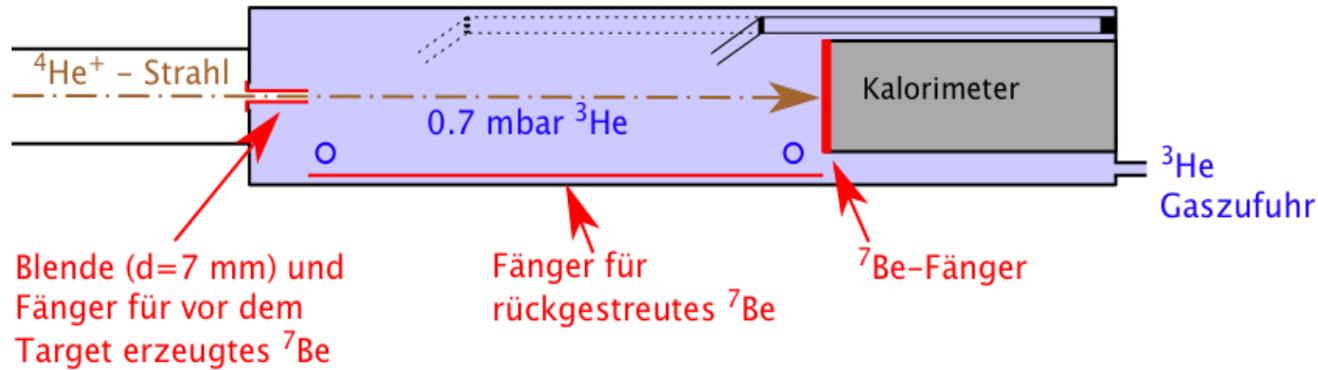
$E_{\text{Strahl}} = 50 - 400 \text{ keV}$
 $0.5 \text{ mA } {}^1\text{H}^+$
 $0.3 \text{ mA } {}^4\text{He}^+$



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

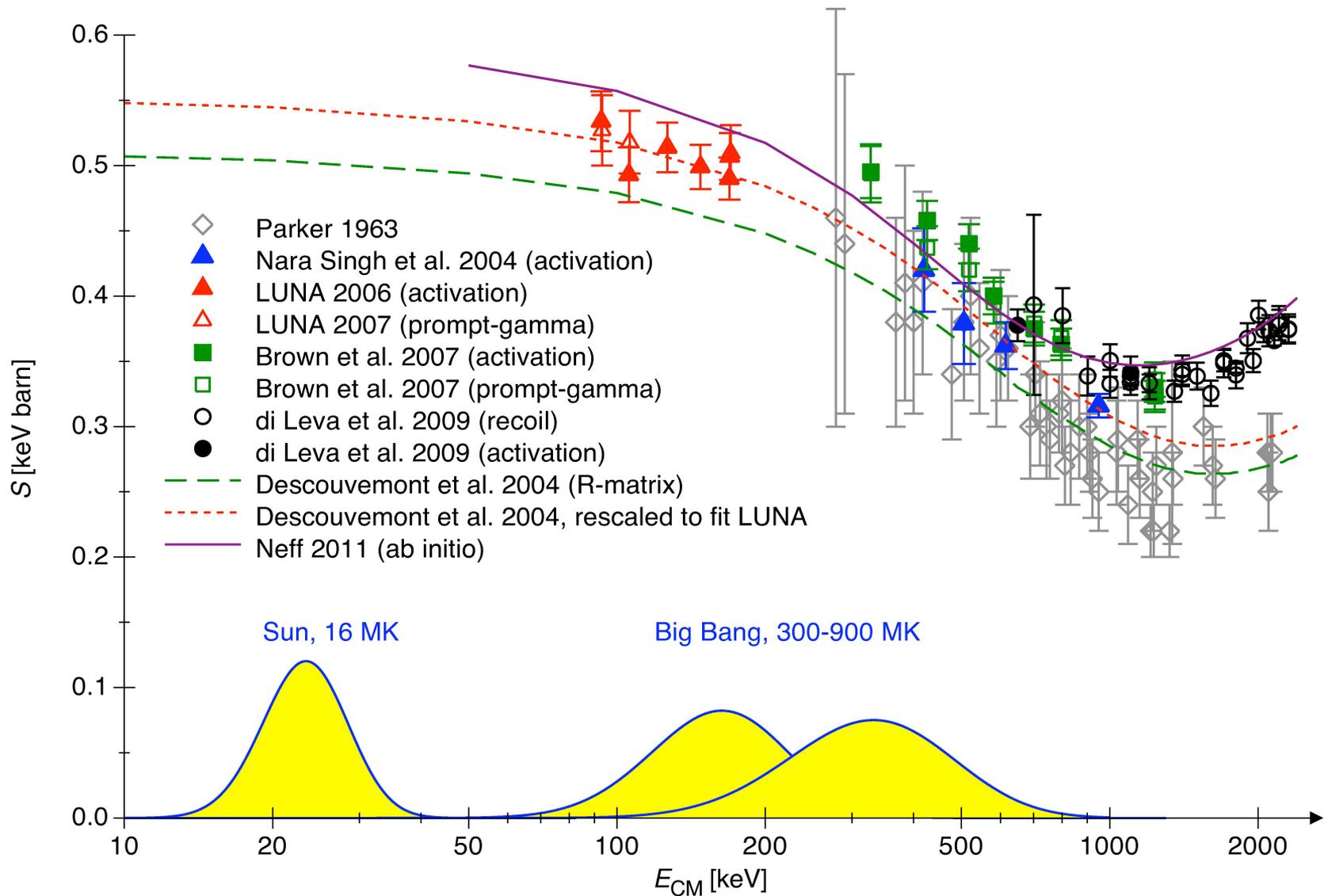


$^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ -Aktivierungsmessung an LUNA

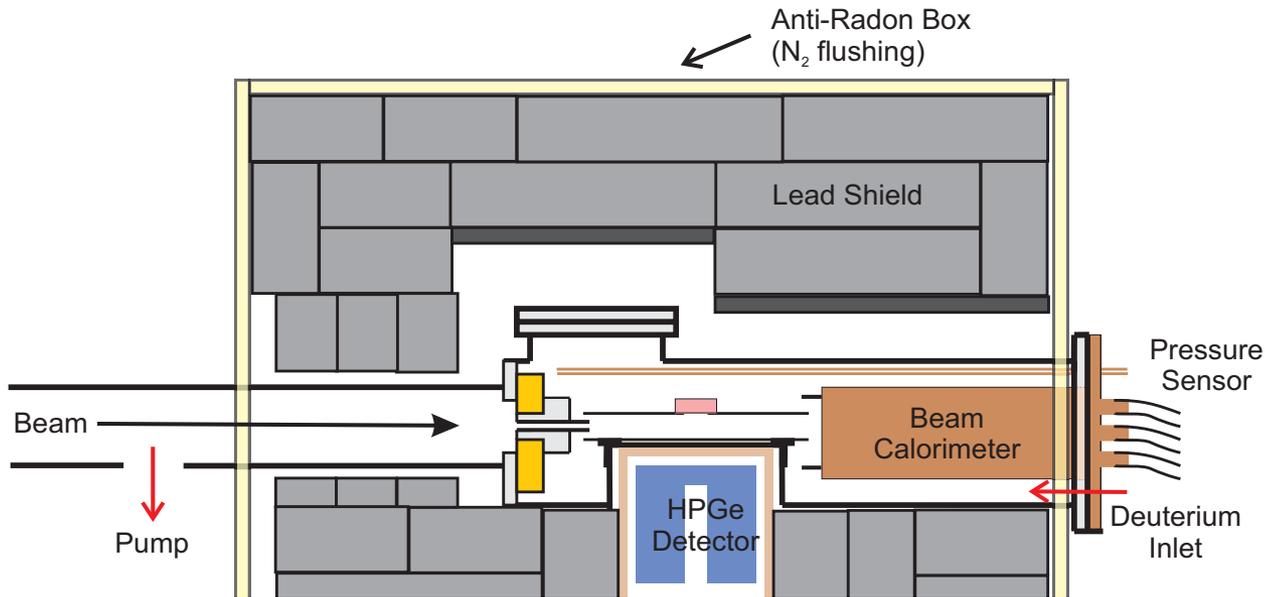


γ -Nachweiswahrscheinlichkeit	1.8%
Strahlintensität	1.5%
Gasdichte	1.5%
^7Be -Verluste	0.7%
Systematische Unsicherheit	3.0%

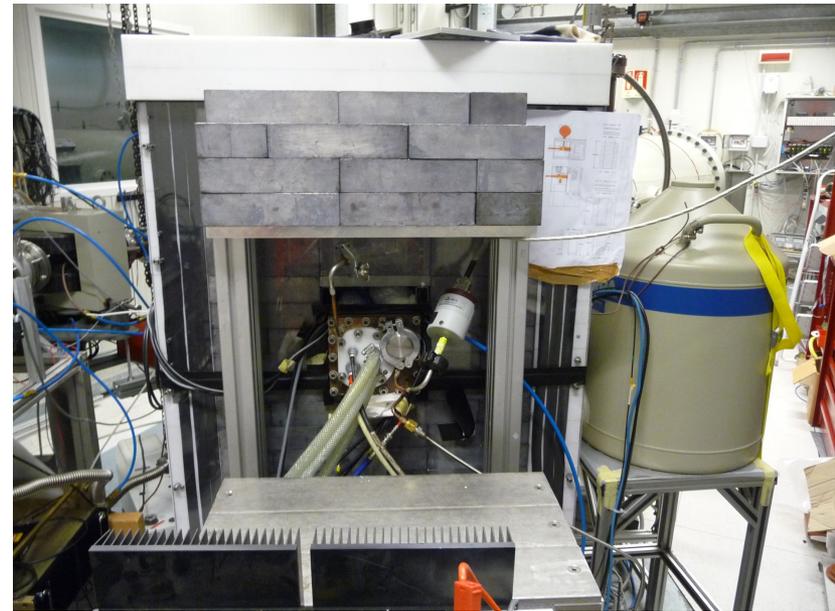
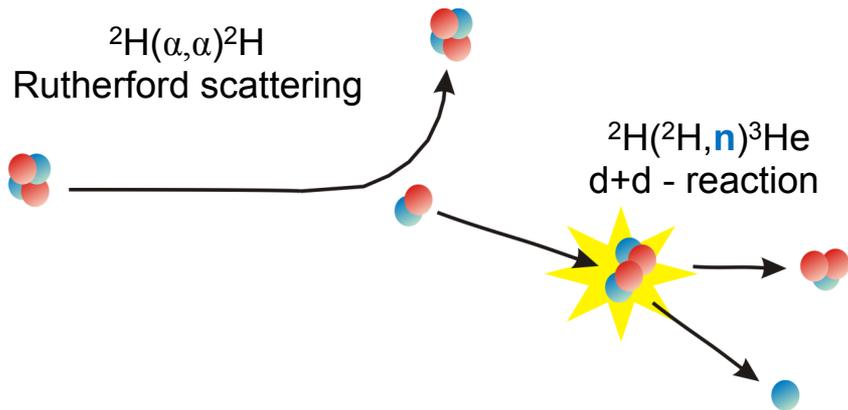
$^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ -Aktivierungsmessung an LUNA, Ergebnisse



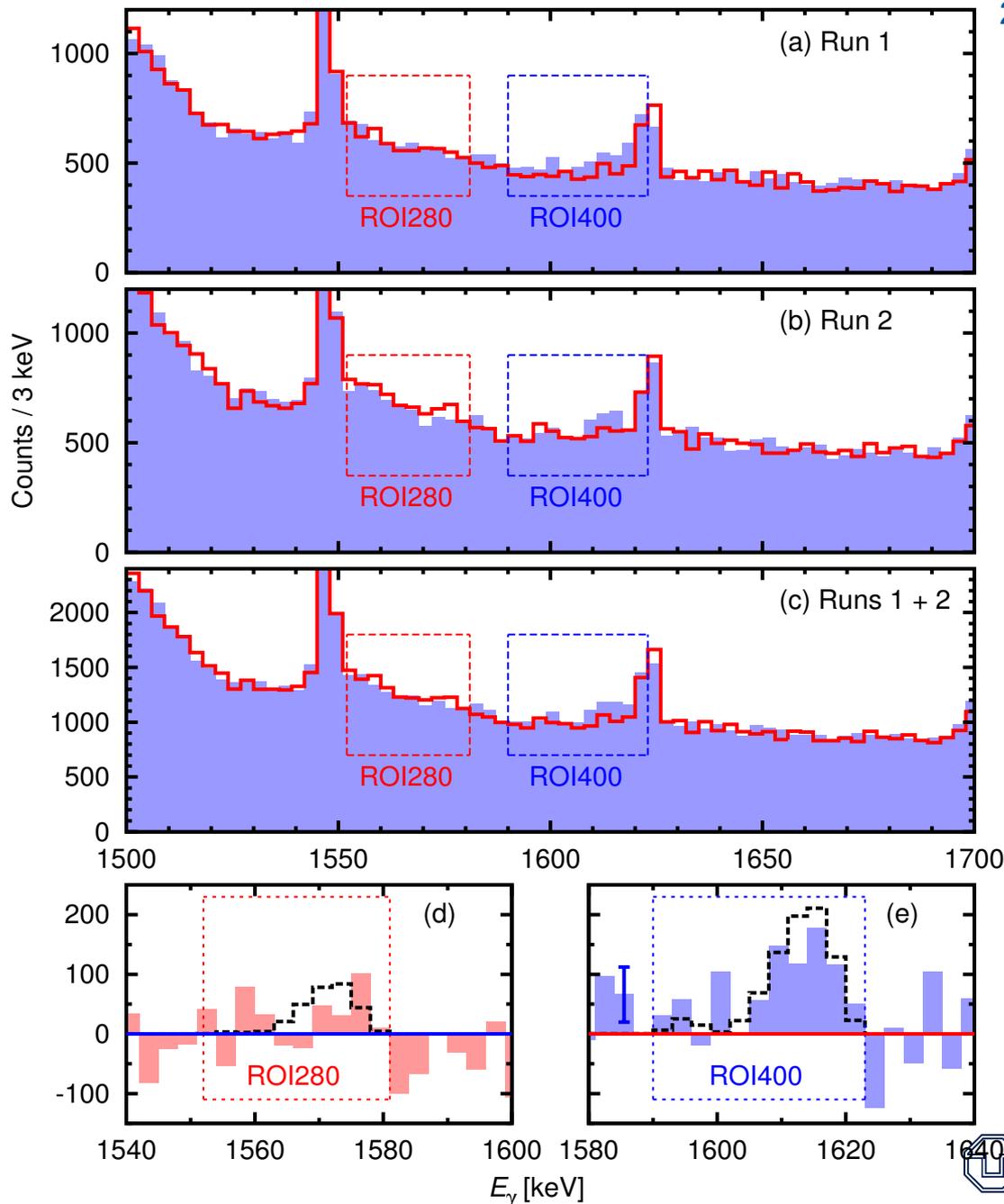
Experiment zu ${}^2\text{H}(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$ bei LUNA: Versuchsaufbau



Untergrund durch Prozess 2. Ordnung:



${}^2\text{H}(\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$, Gammaspektren



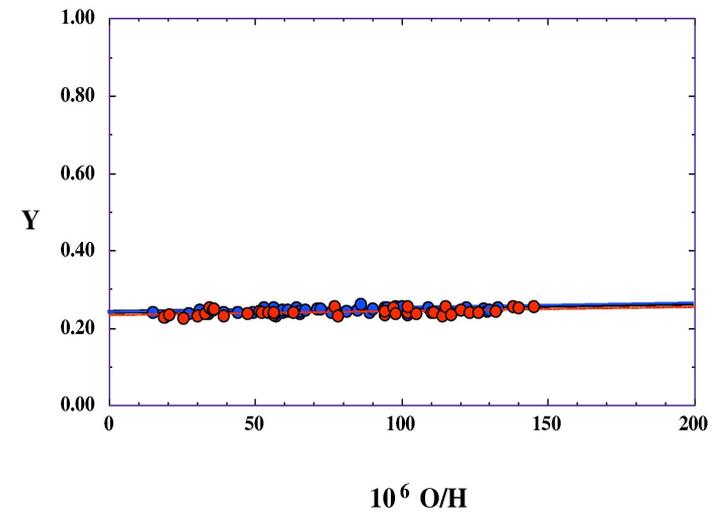
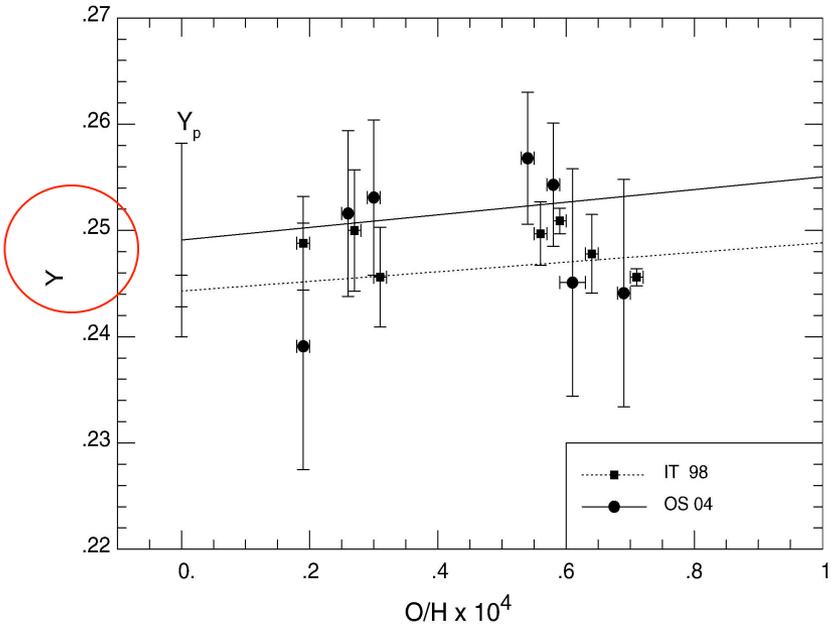
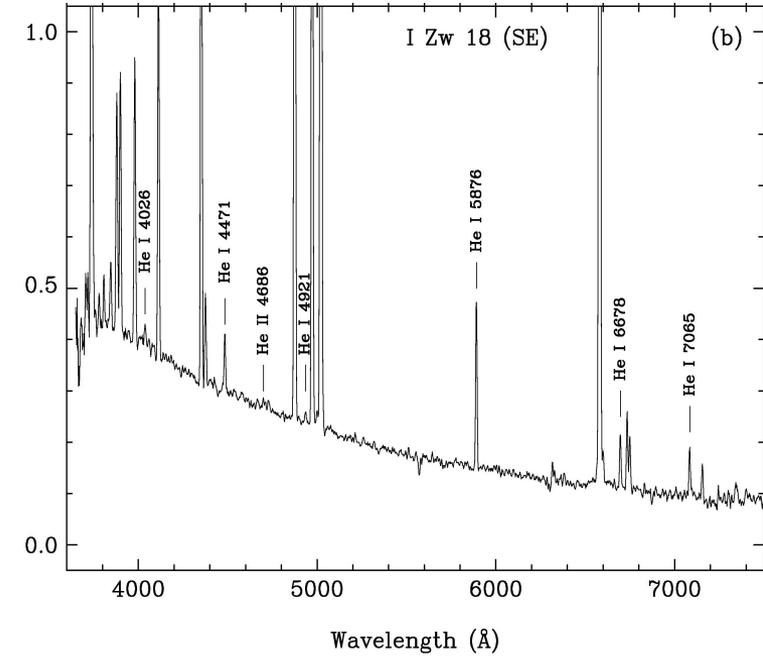
Blau: $E_\alpha = 400$ keV

Rot: $E_\alpha = 280$ keV

Michael Anders (HZDR
und TU Dresden),
Doktorarbeit 2013

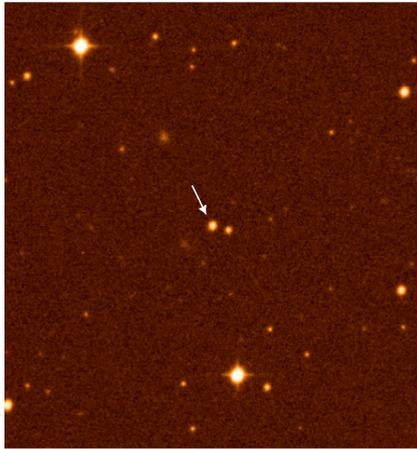
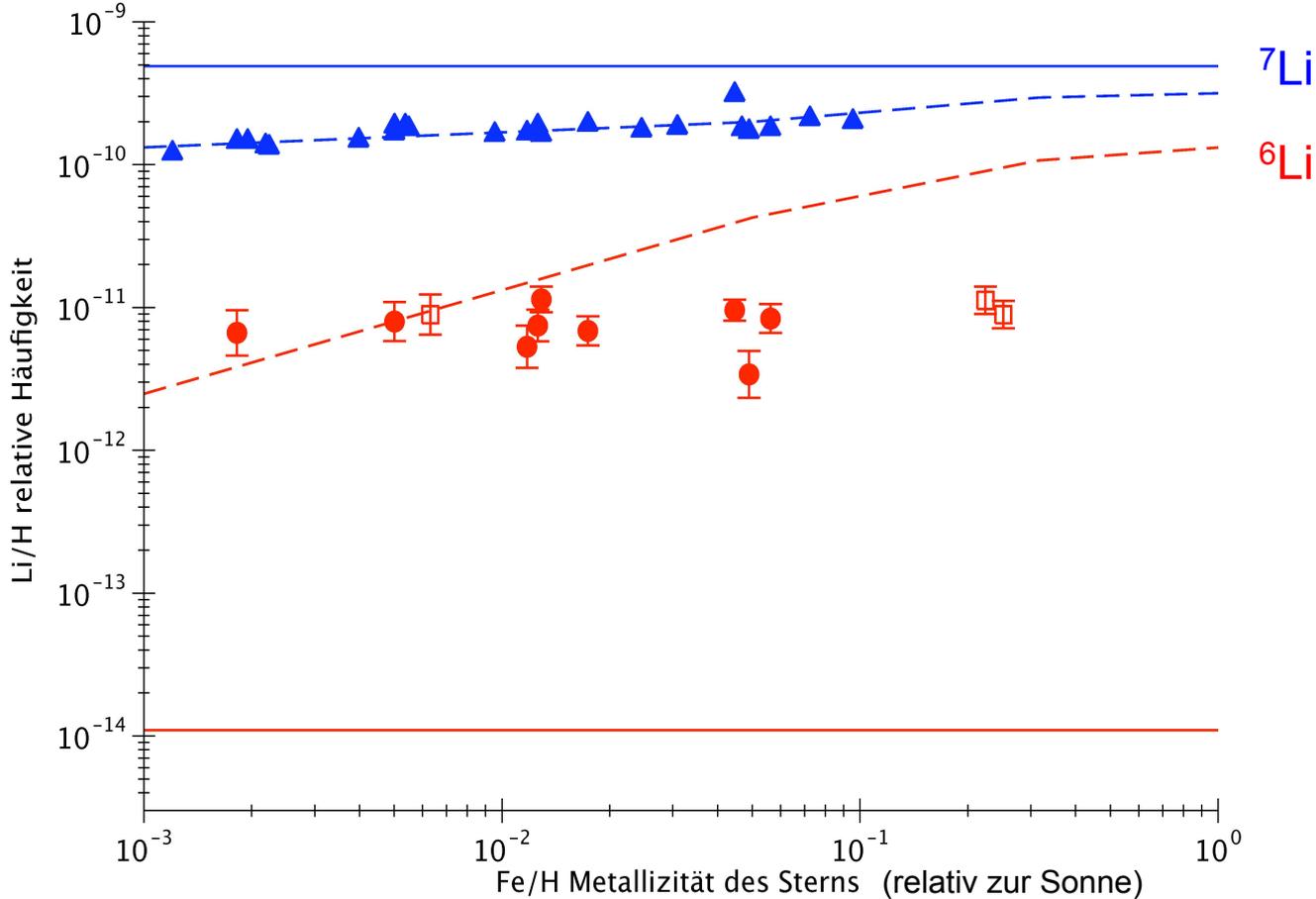
Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: ^4He

- Beobachtung von ^4He -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“

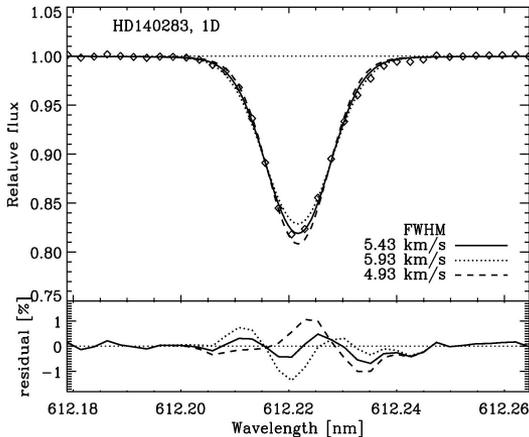
- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit $A > 7$
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null



The Very Metal-Deficient Star HE 0107-5240

ESO PR Photo 25a.02 (30 October 2003)

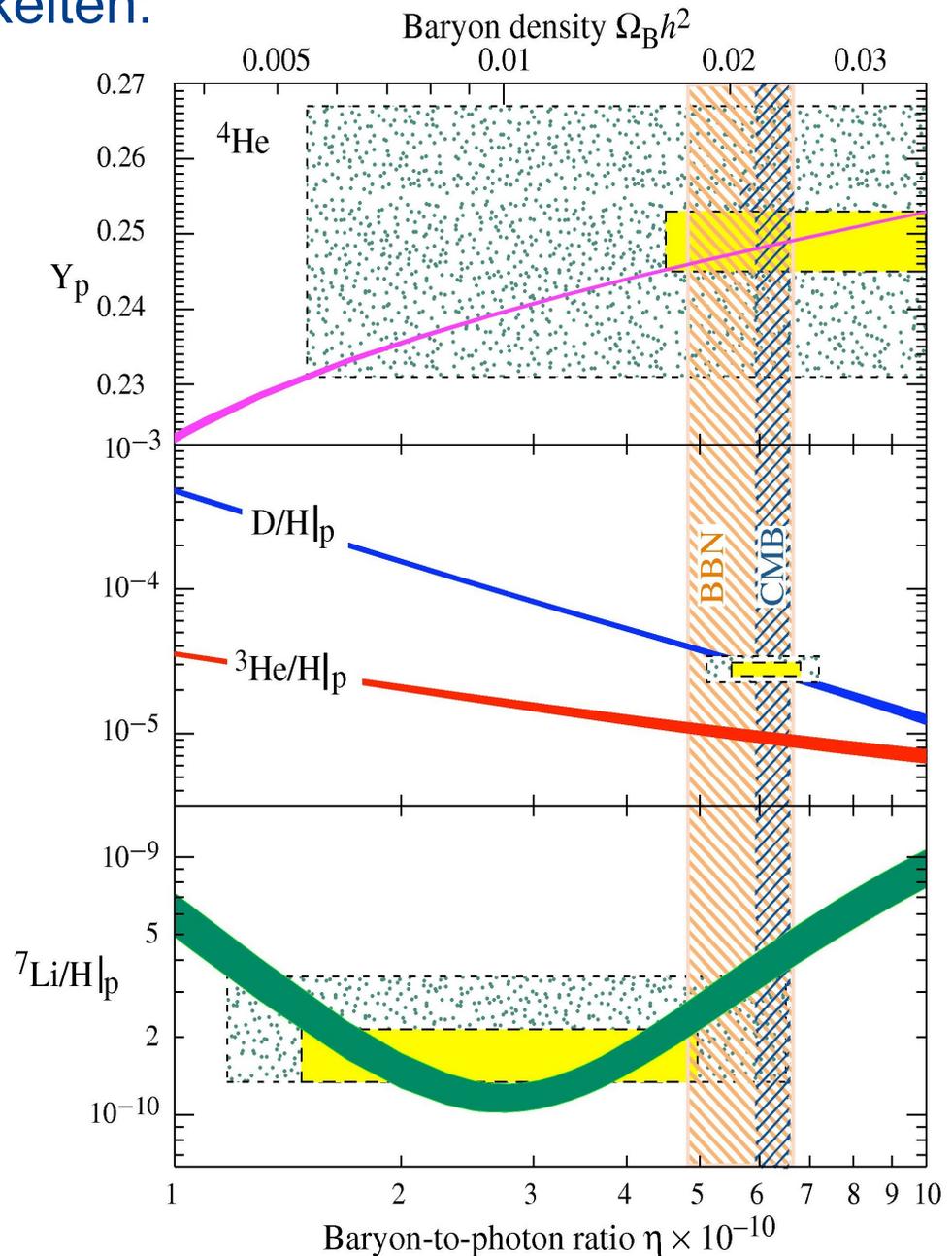
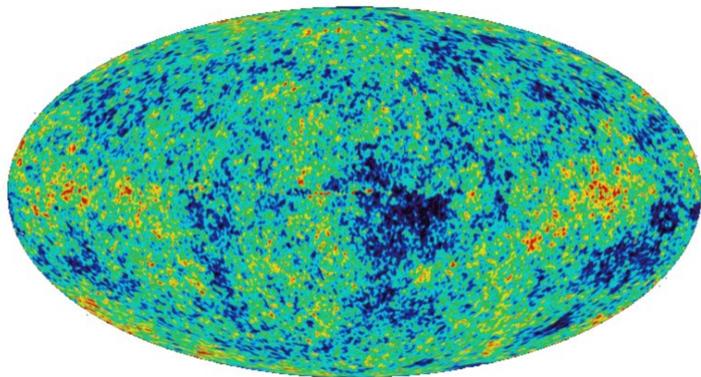
© European Southern Observatory



Gesamtschau der Nuklidhäufigkeiten:

^4He , ^2H , ^7Li

Vorhersage und Beobachtung stimmen einigermaßen überein für diese drei Nuklide!



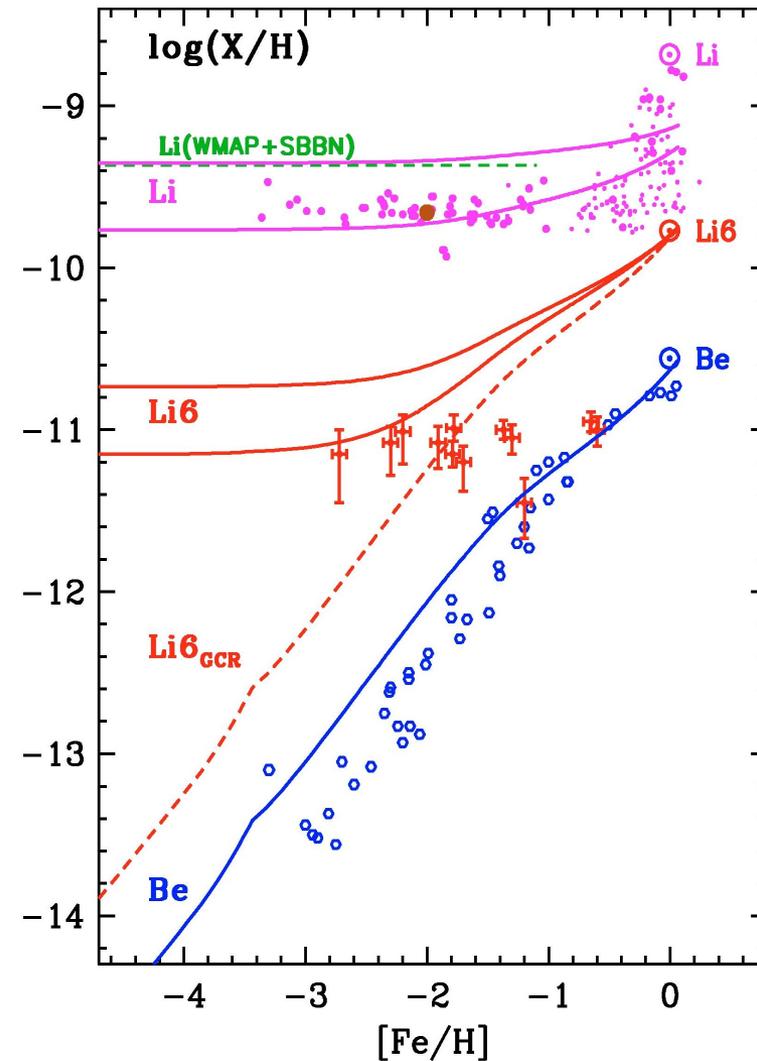
Entstehung von Nukliden durch Spallation: ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$, (${}^6\text{Li}$)

- Sukzessive Anreicherung als Funktion der Zeit, hier $[\text{Fe}/\text{H}]$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log \left[\frac{(n_{\text{Fe}} / n_{\text{H}})}{(n_{\text{Fe,Sonne}} / n_{\text{H,Sonne}})} \right]$$

Sonne: $[\text{Fe}/\text{H}] = \log 1 = 0$

- Erklärung: hochenergetische Teilchen ("cosmic rays") stoßen auf interstellare Materie (Spallation)
- Erzeugung von Be, B, (${}^6\text{Li}$)
- keine schwereren Elemente



Zusammenfassung

- Die Nuklide ^1H , ^2H , ^3He , ^4He und ^7Li 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 ^9Be , ^{10}Be , ^{10}B , ^{11}B und wahrscheinlich ^6Li entstanden durch Stöße von kosmischer Strahlung mit dem interstellaren Medium (“Spallation”).
- Alle weiteren bekannten Nuklide entstanden in Sternen und deren Explosionen.

