Kosmologie und Astroteilchenphysik

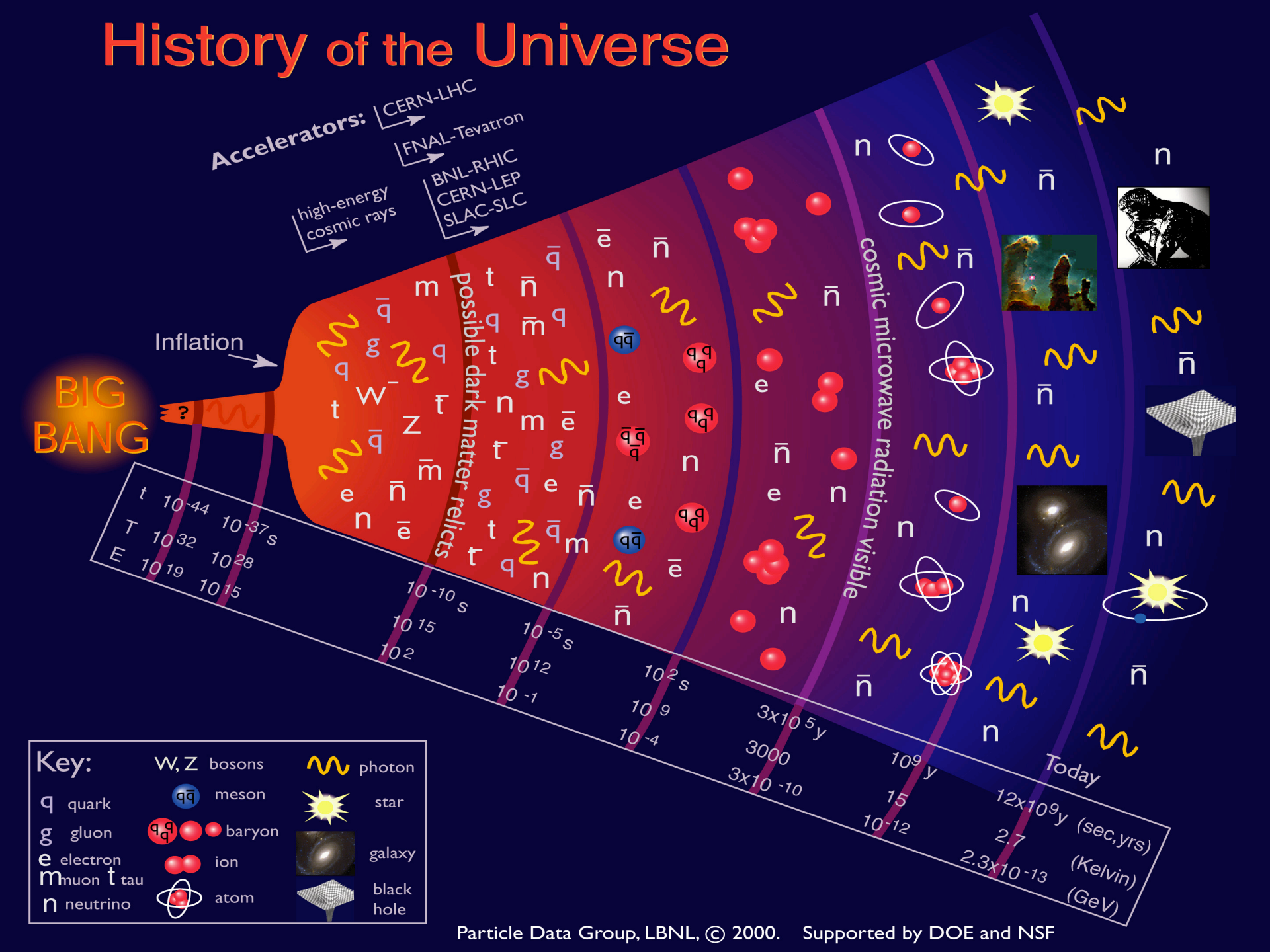
Prof. Dr. Burkhard Kämpfer, Dr. Daniel Bemmerer

- 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, 14.05.2012

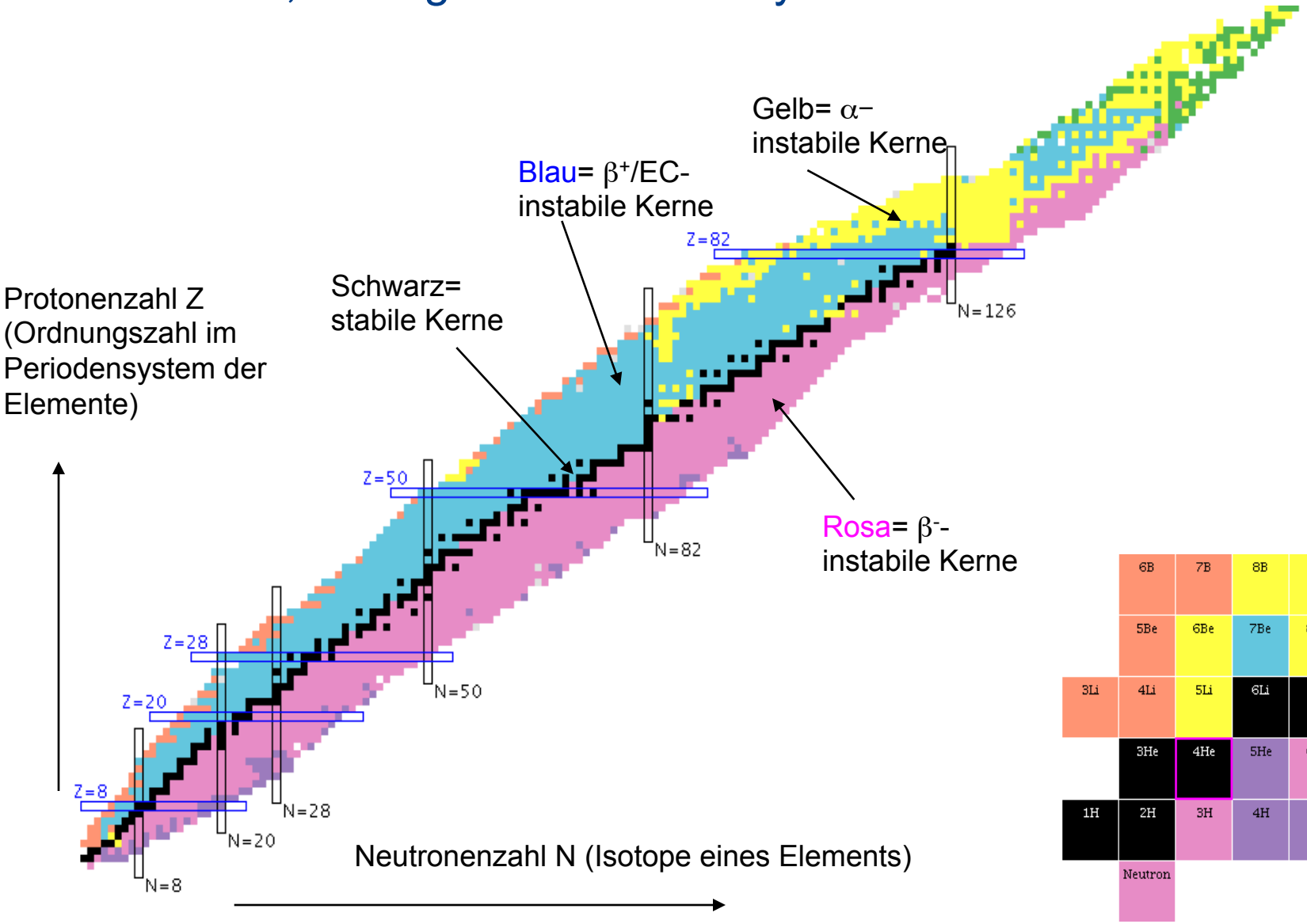
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Partner von DRESDEN concept exzellenz-dresden.de
HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

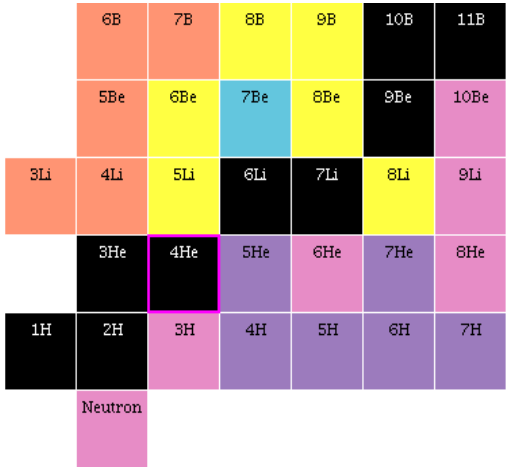
History of the Universe



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

Nuklidkarte, analog zum Periodensystem der Elemente





Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

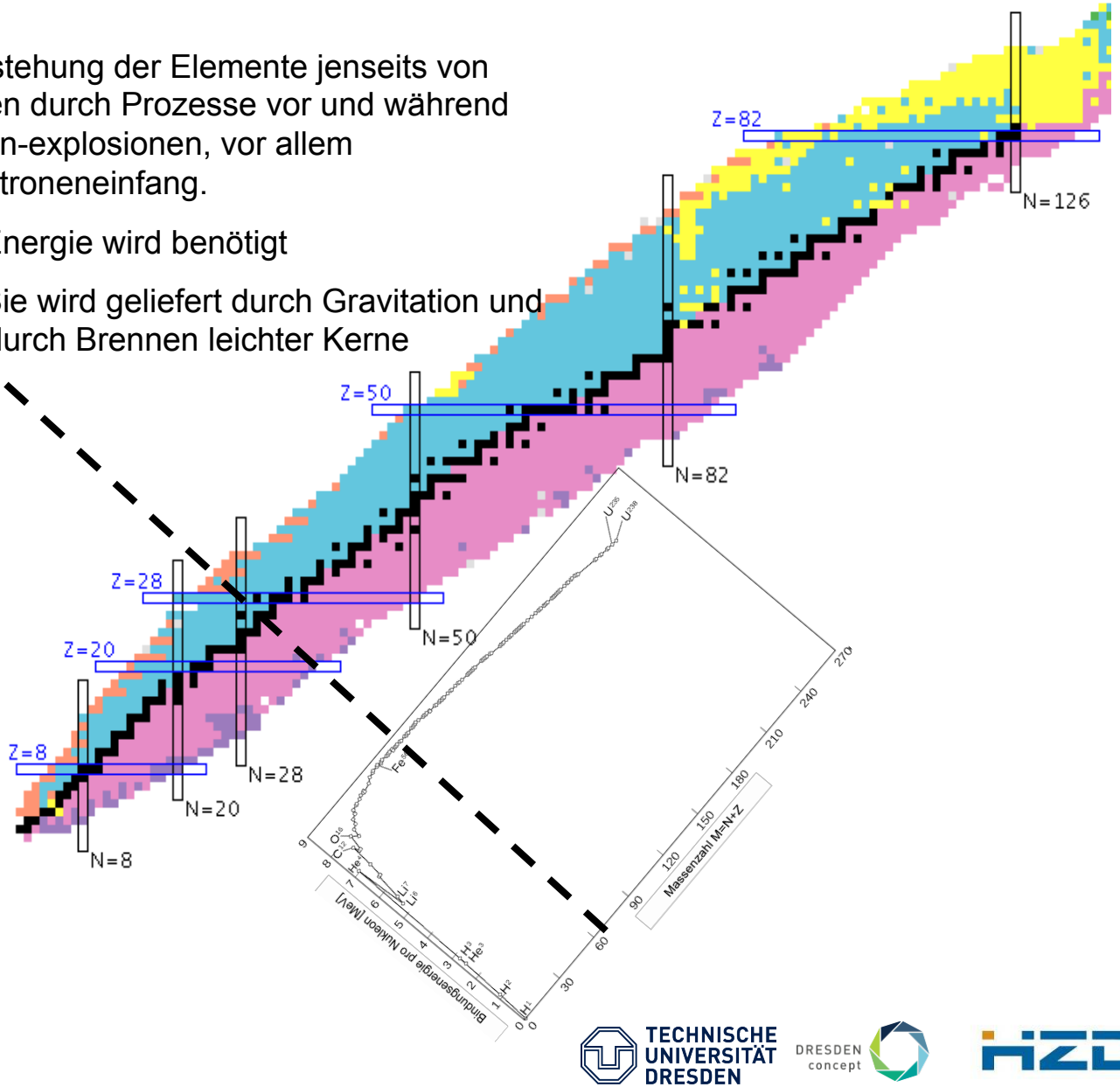
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

→ 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):

$$m(a) + m(A) = m(b) + m(B) + Q$$

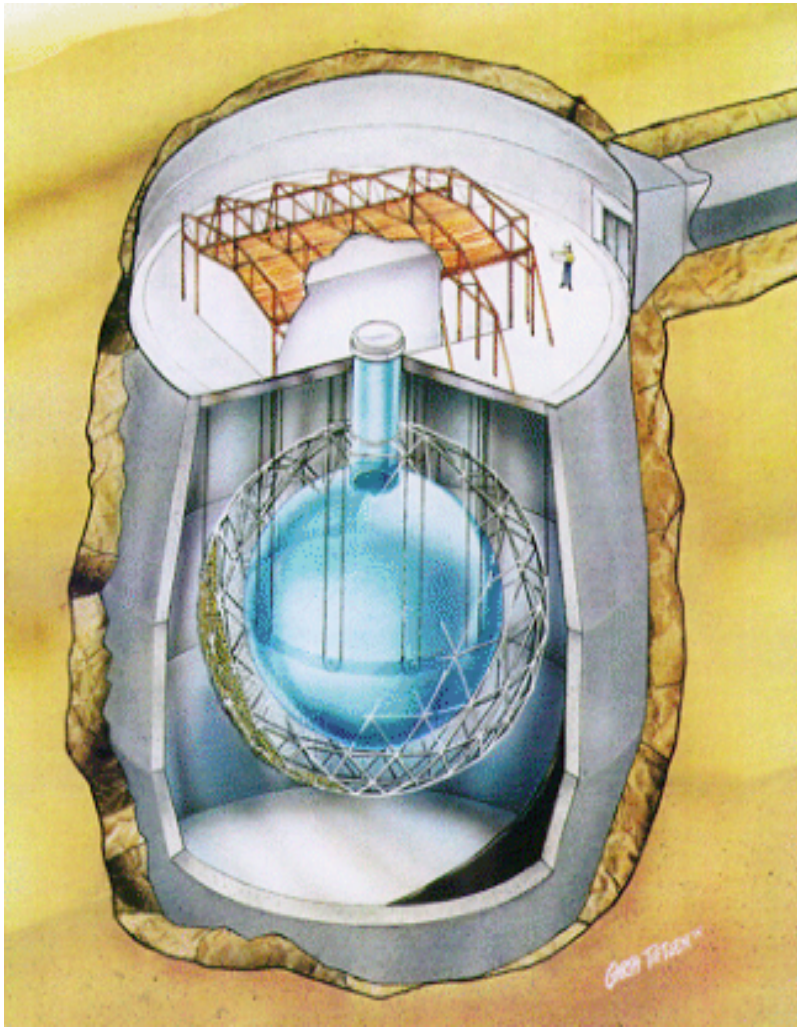
Q = sogenannter *Q*-Wert der Reaktion; *Q* > 0 bedeutet Energiegewinn bei der Reaktion
Q < 0 bedeutet Energieverlust bei der Reaktion

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

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

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

Lebensdauer von gebundenem Neutron und Proton: Experiment



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

1000 t D_2O (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).

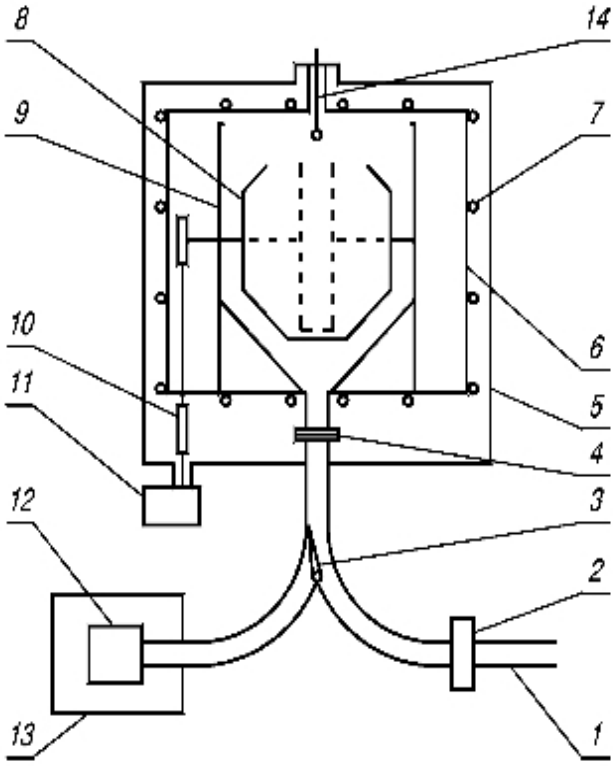
Es wurden keine solchen Ereignisse beobachtet, entsprechend einer unteren Grenze für die Lebensdauer des Protons von $\tau > 10^{29}$ a

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

Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment

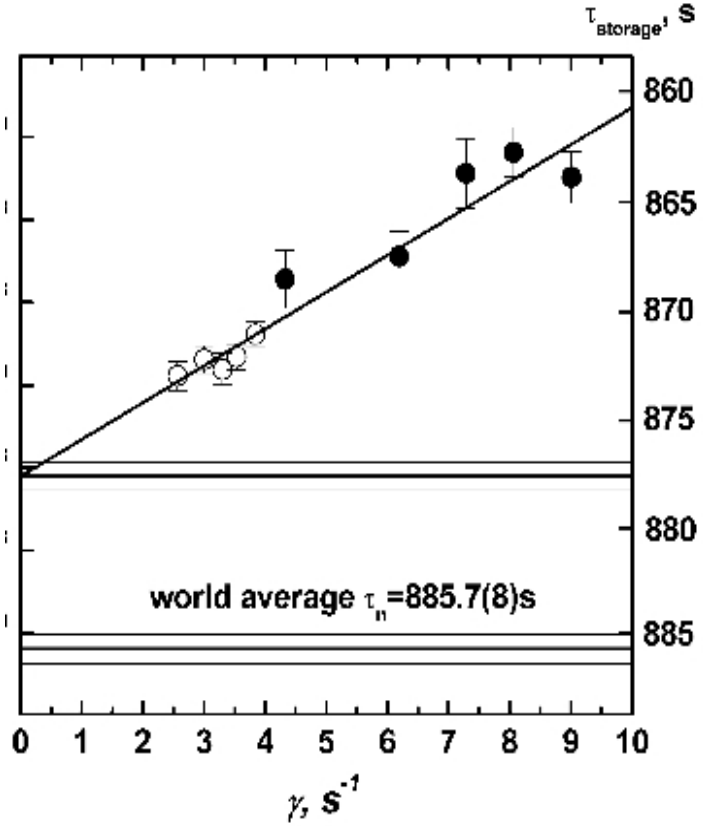
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

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



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

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



Experiment mit Neutronenfalle (geschlossen durch Gravitation)

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

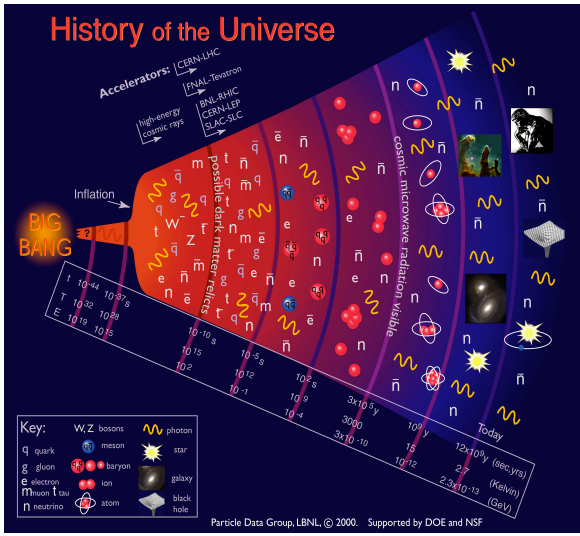
Verhältnis von Neutronen- zu Protonenzahl zu Beginn der Nukleosynthese

- m_n-m_p = 939.6 MeV/c^2 - 938.3 MeV/c^2 = 1.3 MeV/c^2

- Im chemischen Gleichgewicht ergibt sich sich dann eine Boltzmann-Verteilung für die Häufigkeit des Neutrons (= um m_n-m_p höhere Energie)
  n/p ~ 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 ~0.7 MeV
  n/p = exp(-(m_n-m_p)/T) = exp (-1.3/0.7) = 0.16

- Freier Zerfall der Neutronen für etwa 200 s, im Endeffekt n/p ~0.14=1/7

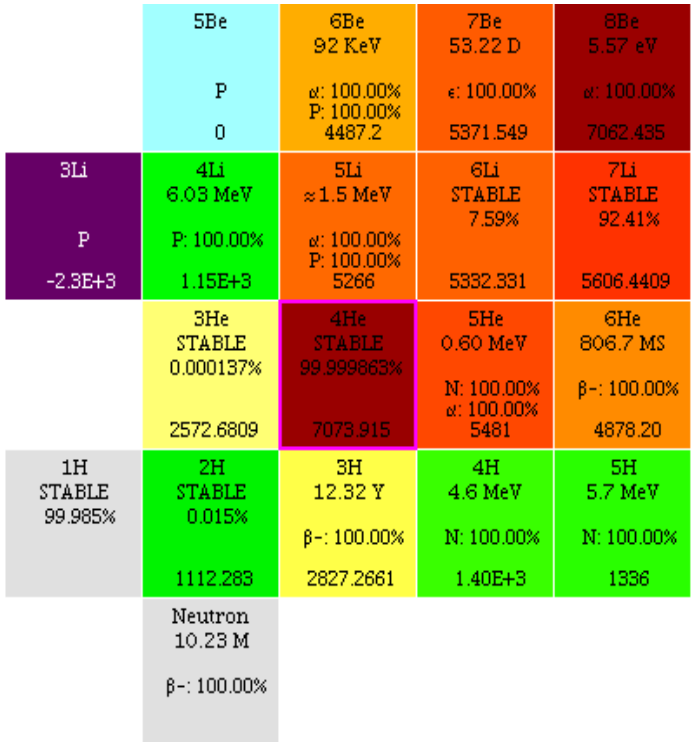


Entstehung von ^{4}He

- Neutron und Proton nicht mehr im Gleichgewicht miteinander, nun können sie Kerne bilden
- Gewinn von Bindungsenergie durch Bildung von Kernen, größter Gewinn bei ^{4}He
- Konzentration fast aller überlebenden Neutronen in ^{4}He, n/p ~ 1/7
- Berechnung des Massenanteils von ^{4}He an der Masse des Nukleonen-Universums durch einfaches Abzählen:

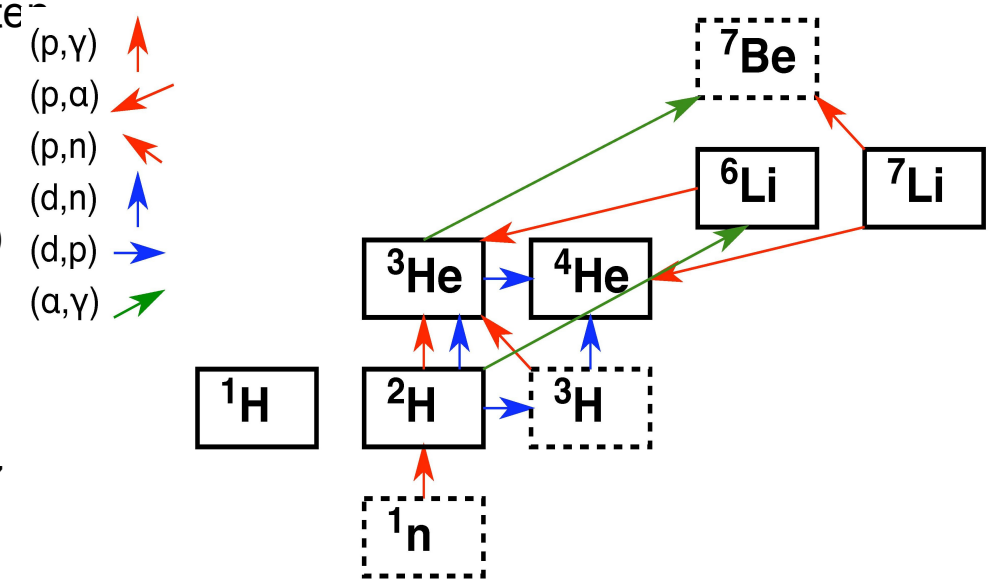
$$\frac{m(^4\mathrm{He})}{m_{\mathrm{tot}}} = \frac{2n}{p+n} = \frac{2n/p}{1+n/p} = \frac{2/7}{8/7} = 0.25$$

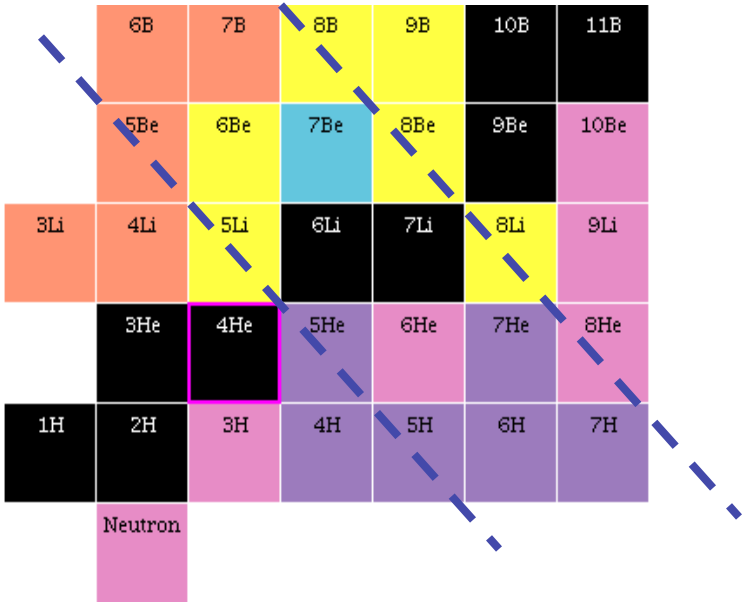
- Der Rest der Masse bleibt im Element Wasserstoff, bis auf kleine Verunreinigungen



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

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





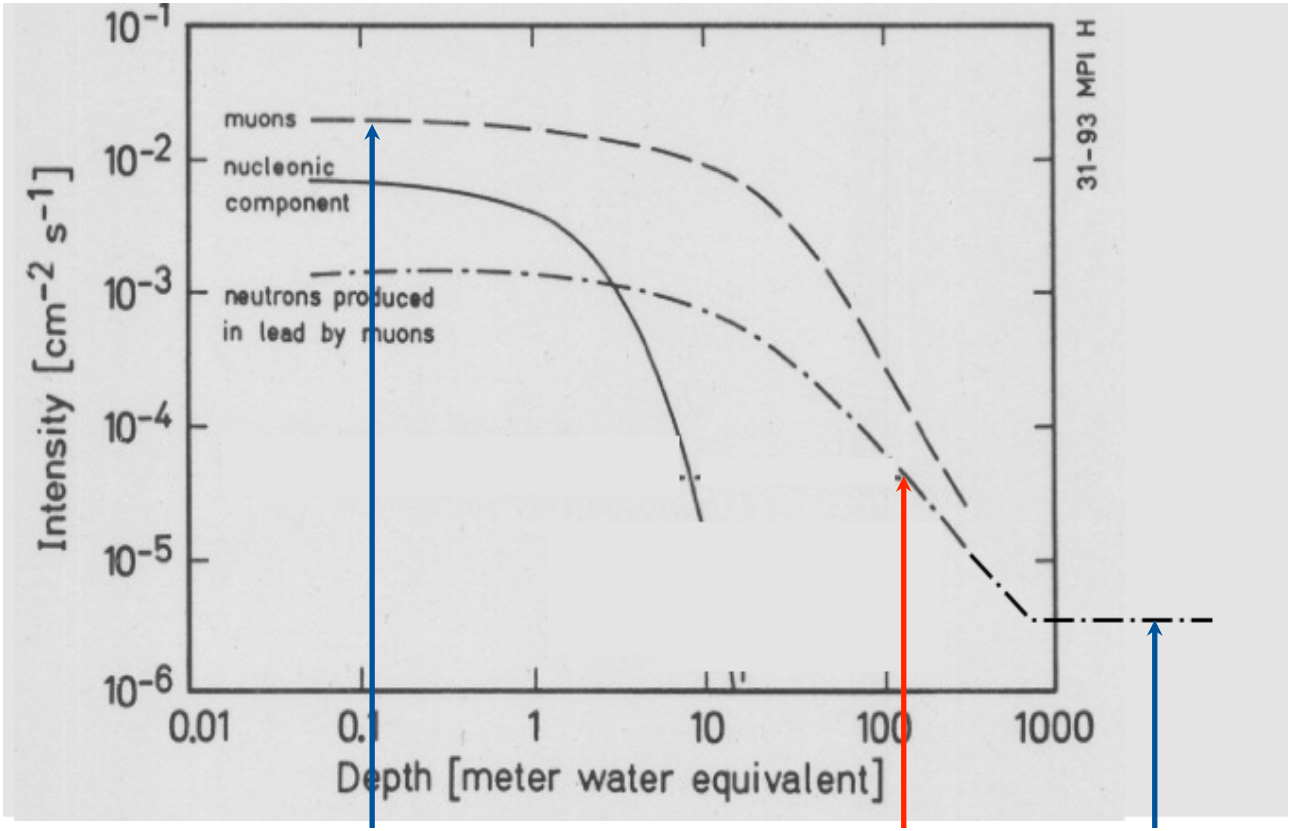
- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in ^{4}He gebunden
- Coulombschwelle ~Z_1Z_2 behindert den Einfang von ^{4}He
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei ^{7}Li

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

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
DRESDEN concept
HZDR

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.

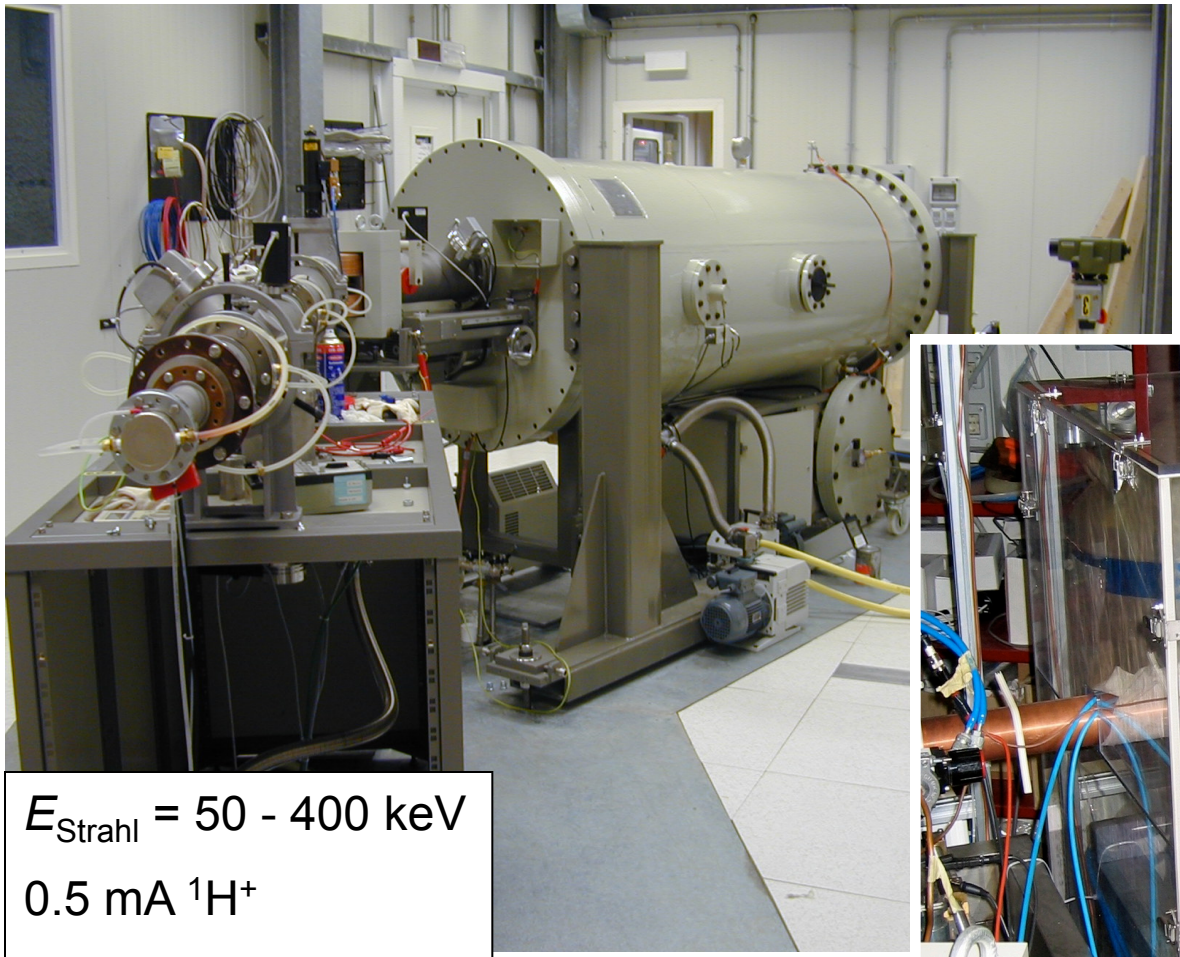


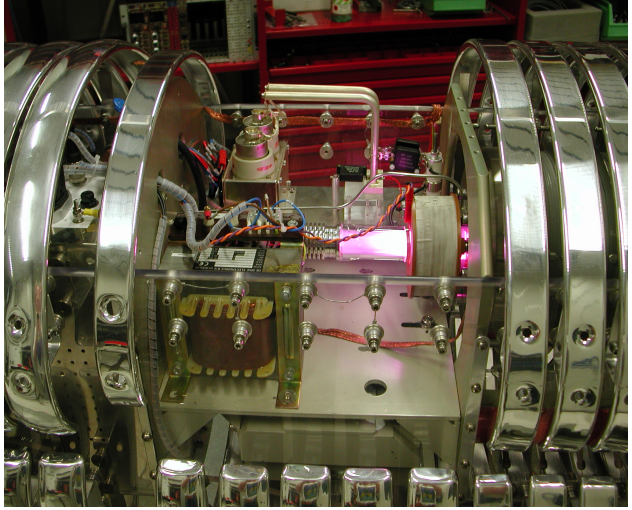
Erdoberfläche

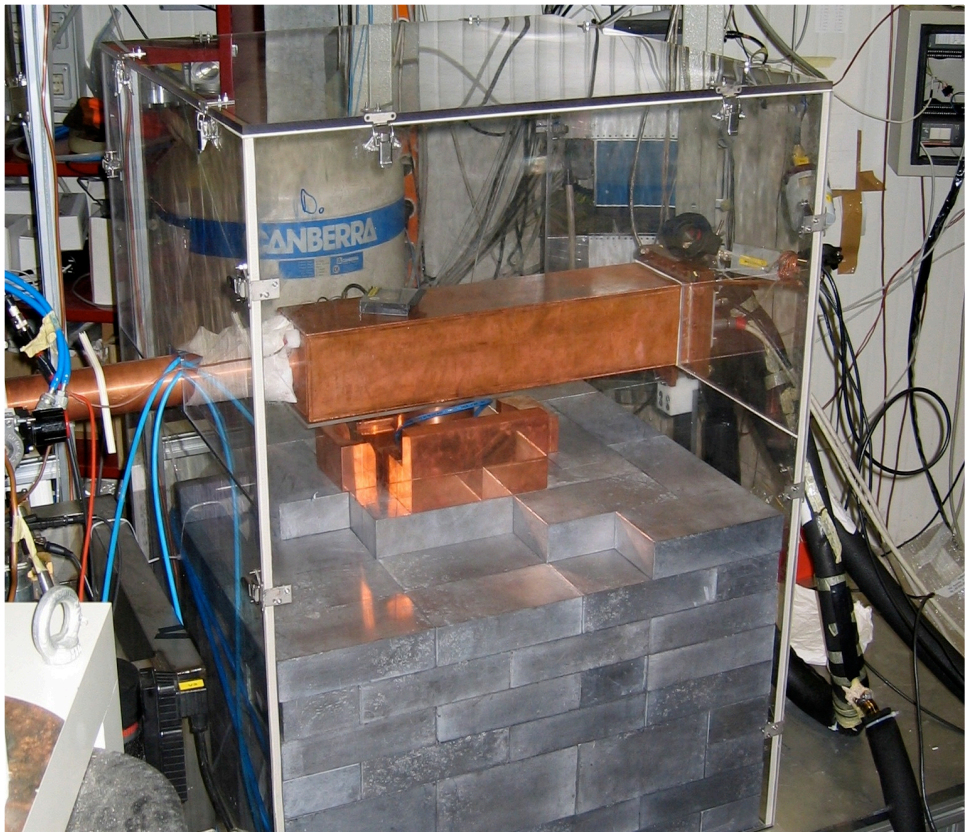
Felsenkeller Dresden

Gran Sasso

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





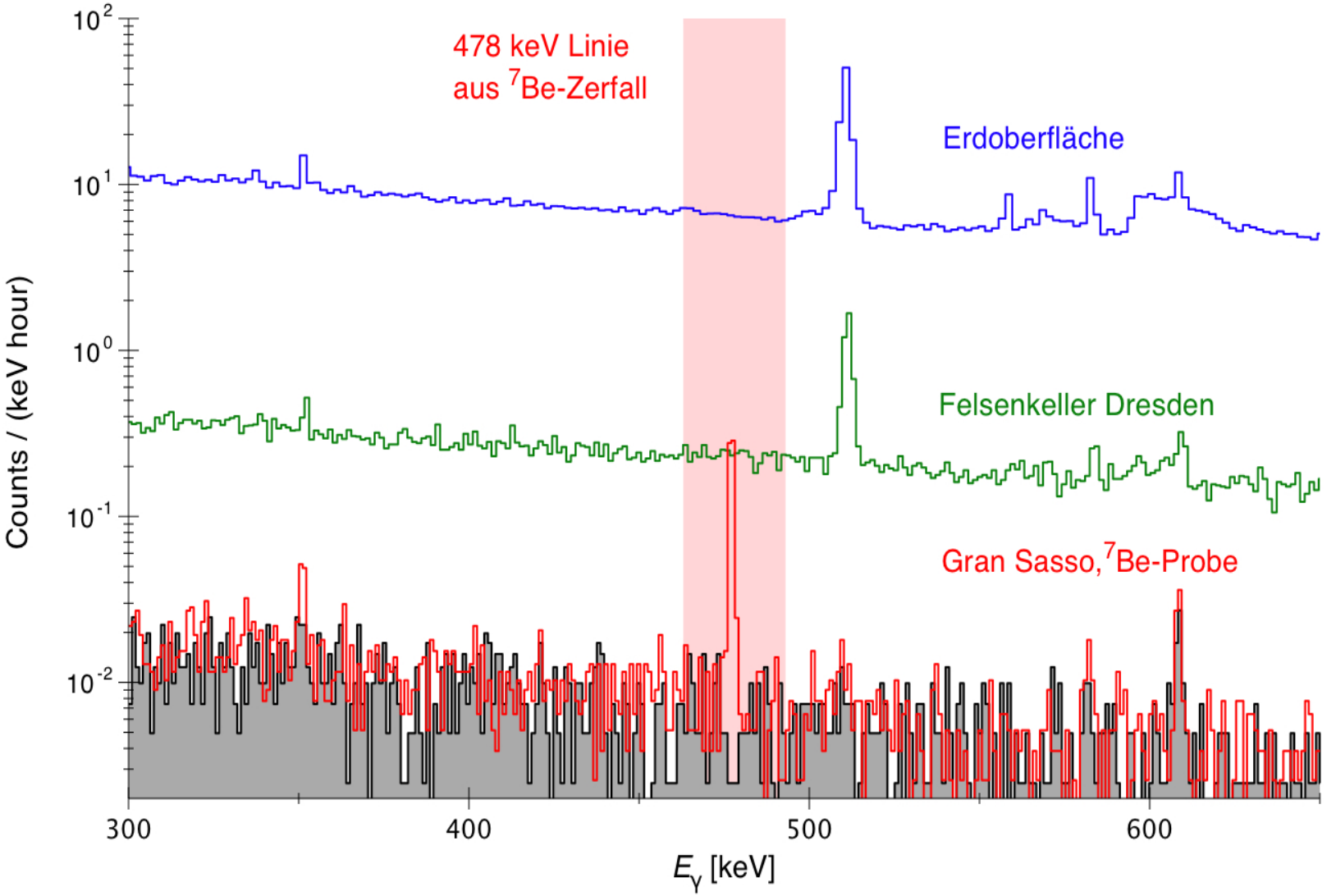


E_{Strahl} = 50 - 400 keV

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

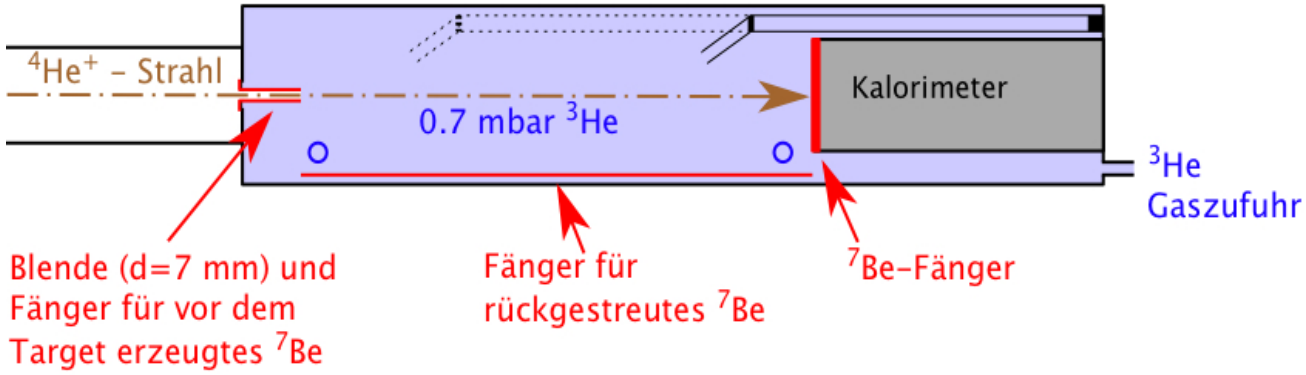
0.3 mA $^{4}He^{+}$

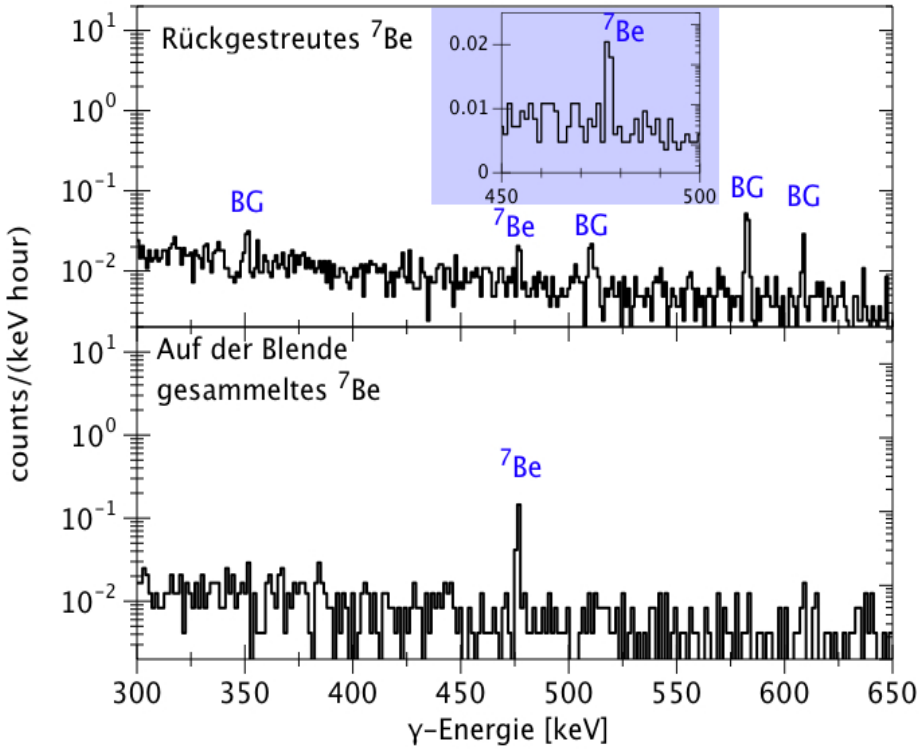
Messung zur Urknall-Nukleosynthese: $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$ an LUNA, ^{7}Be-Spektren



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

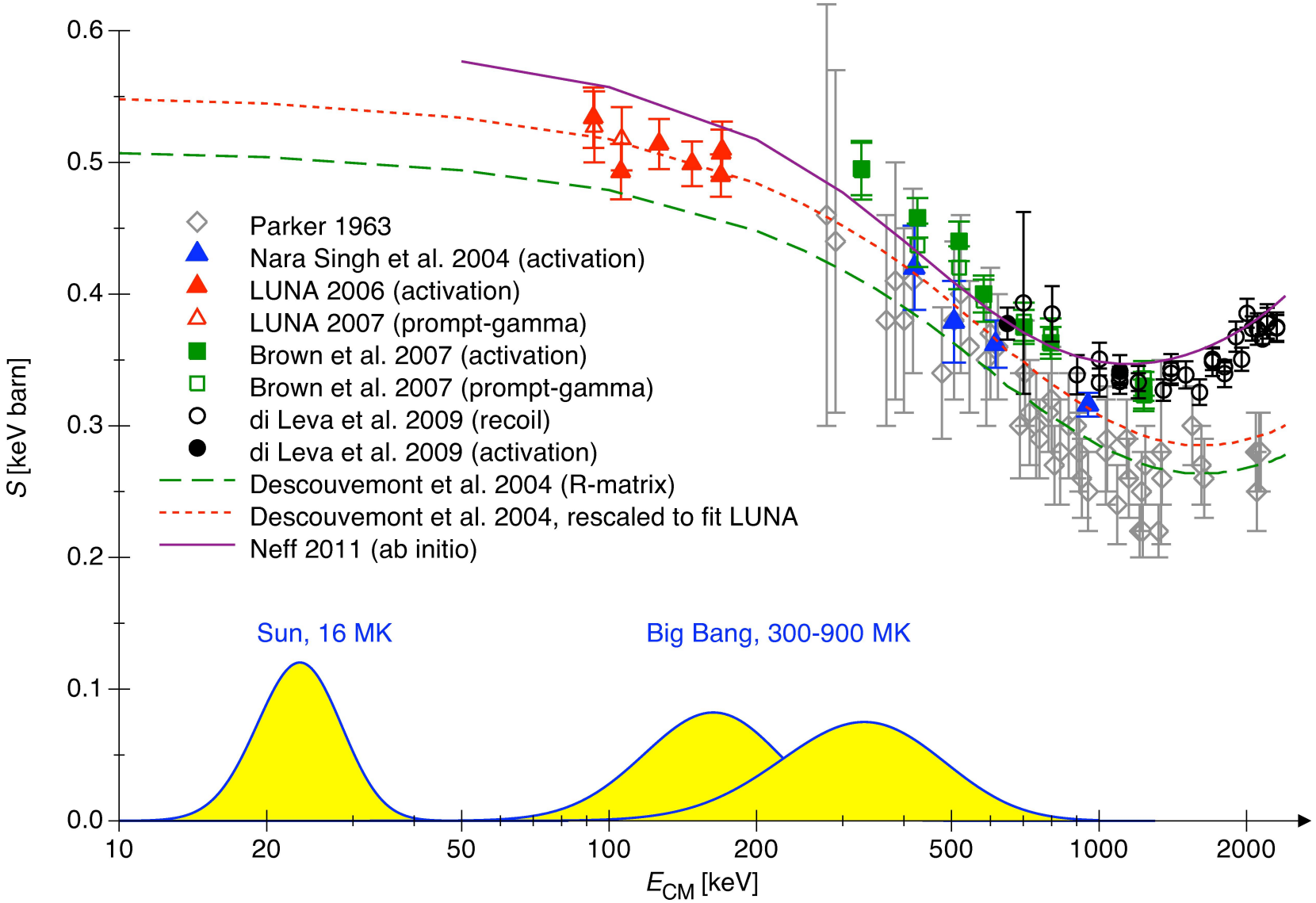
$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$-Aktivierungsmessung an LUNA





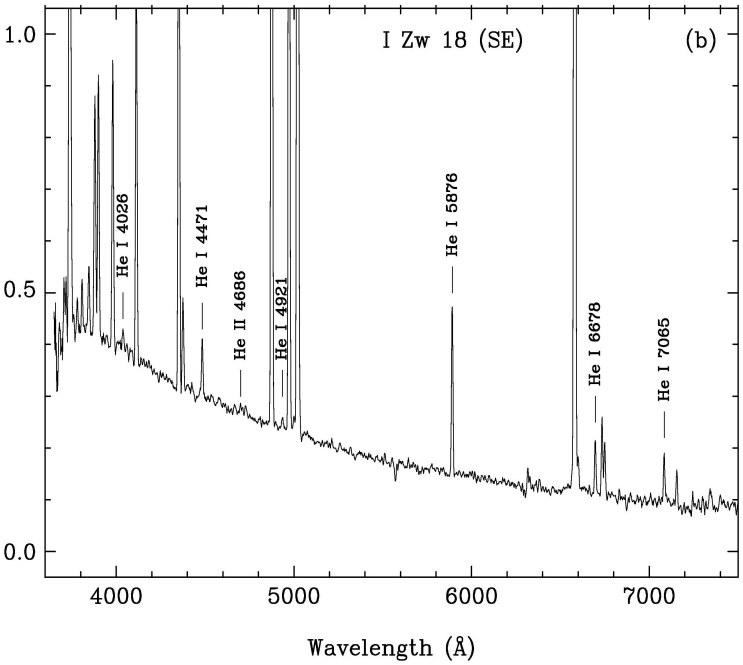
γ-Nachweiswahrscheinlichkeit	1.8%
Strahlintensität	1.5%
Gasdichte	1.5%
^7Be-Verluste	0.7%
Systematische Unsicherheit	**3.0%**

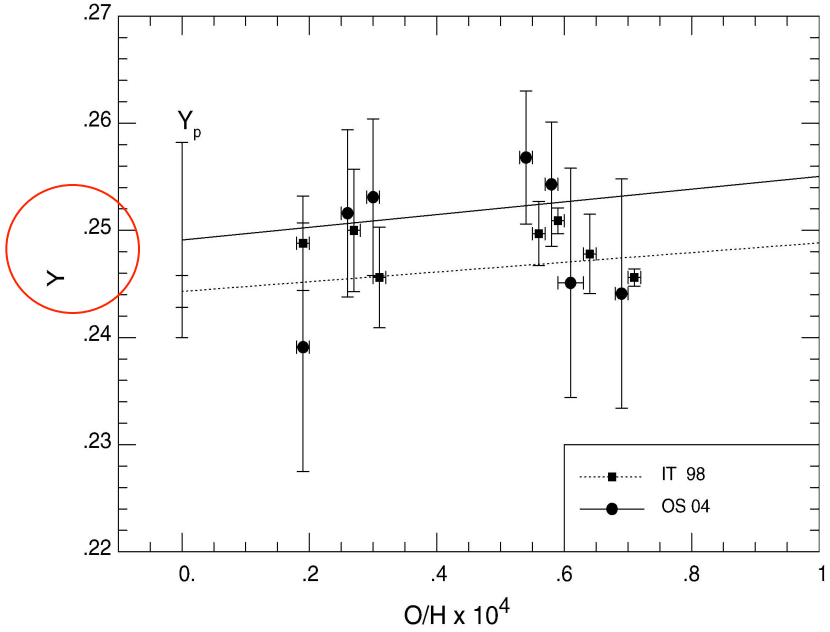
$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$-Aktivierungsmessung an LUNA, Ergebnisse

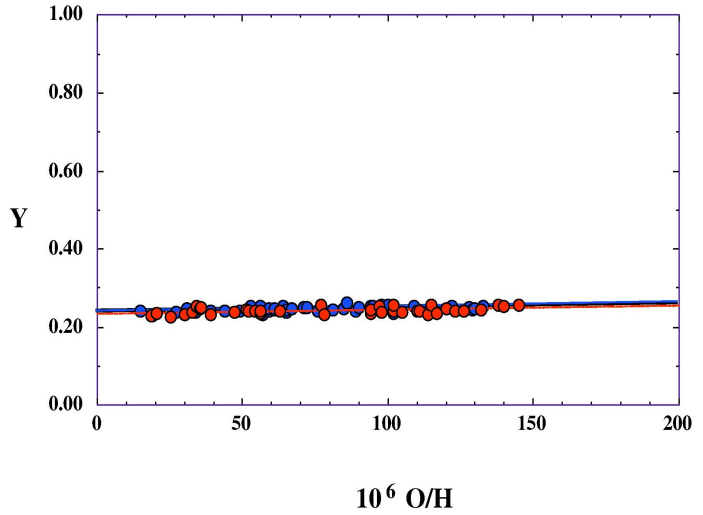


Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: ^{4}He

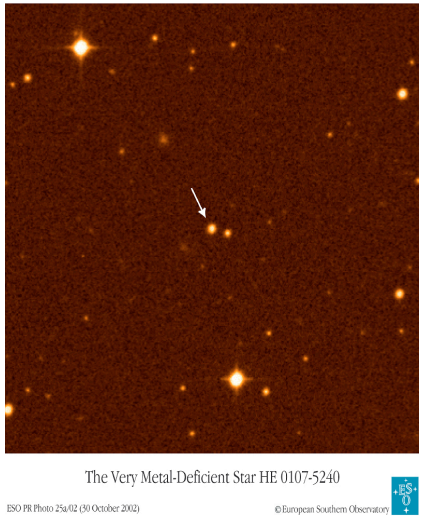
- Beobachtung von ^{4}He-Linien in Gaswolken
- Häufigkeit als Funktion des Alters, ausgedrückt als Anreicherung der Gaswolke in Sauerstoff O/H
- Fit und Extrapolation zu Null

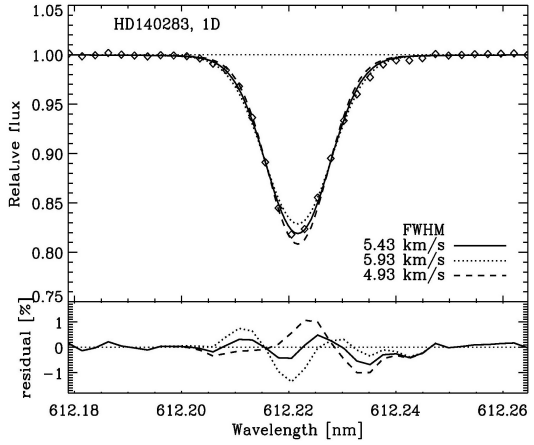




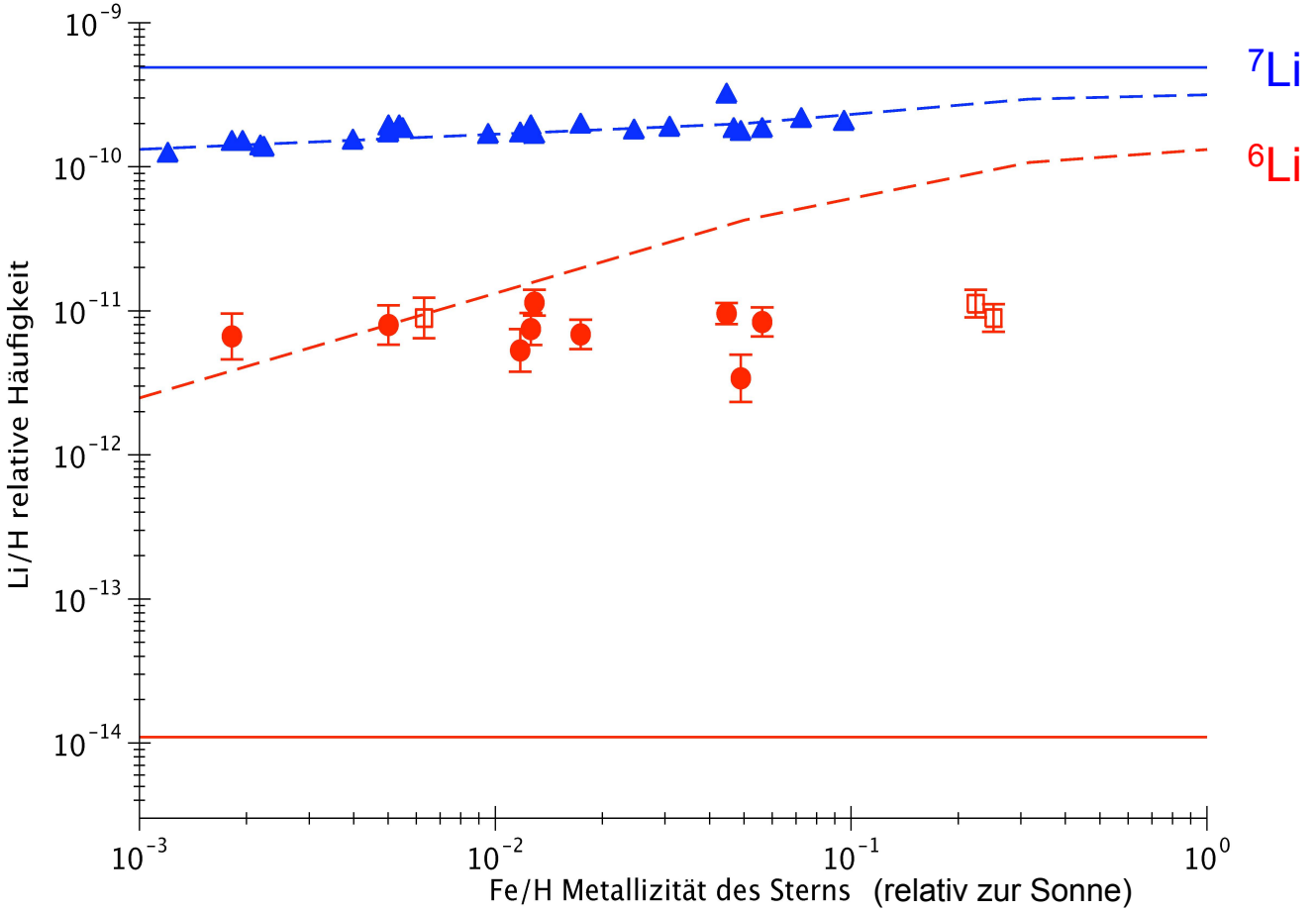


Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-”Plateau”



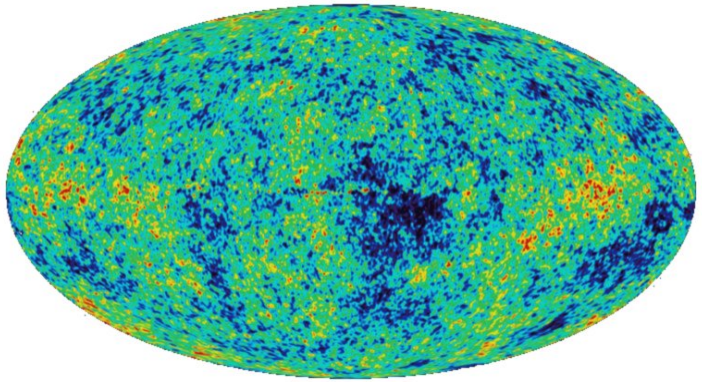


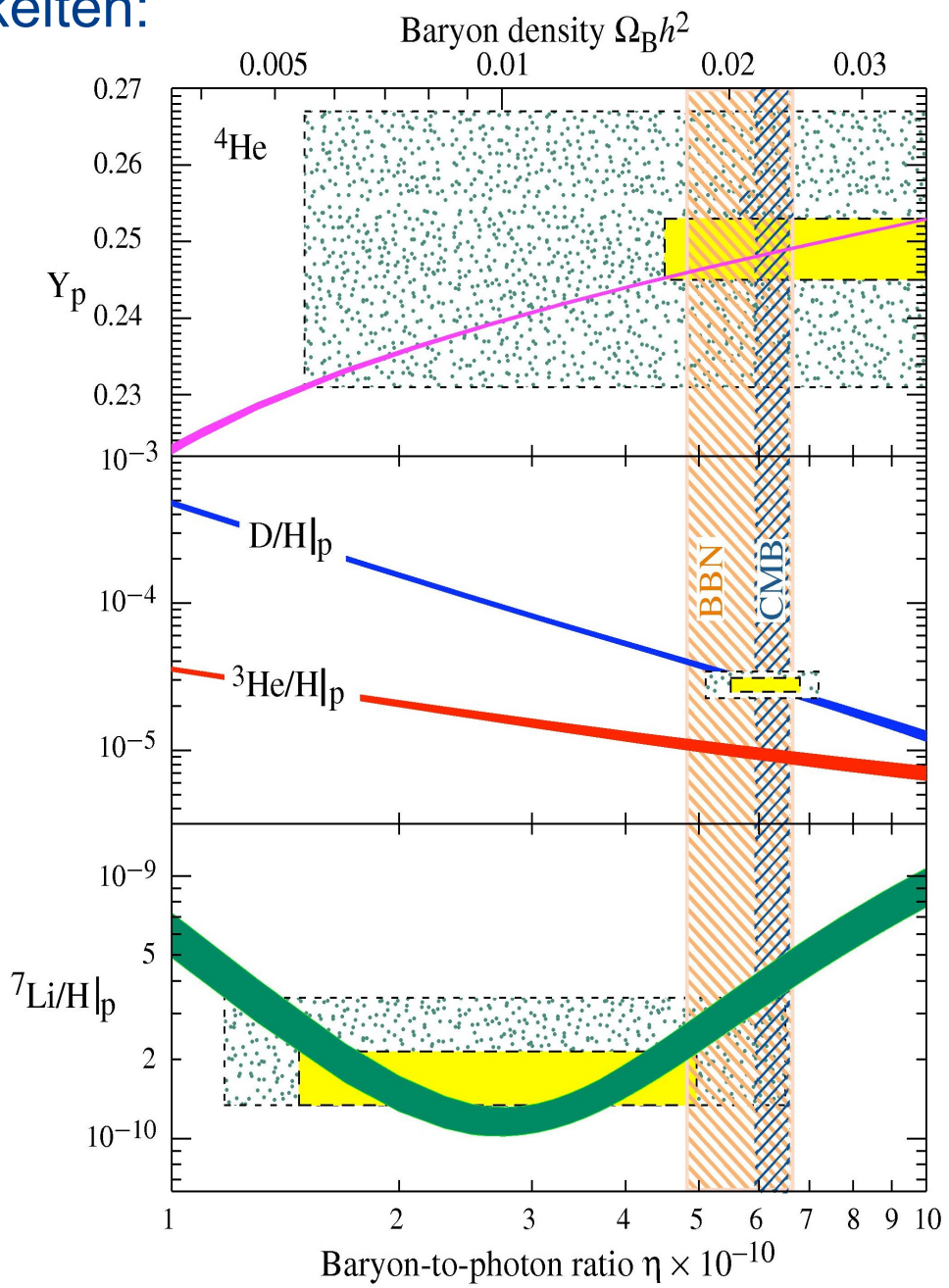
- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit A>7
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null



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

Vorhersage und Beobachtung stimmen einigermaßen überein für diese drei Nuklide!





Zusammenfassung

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