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

4. Vorlesung, 09.05.2011

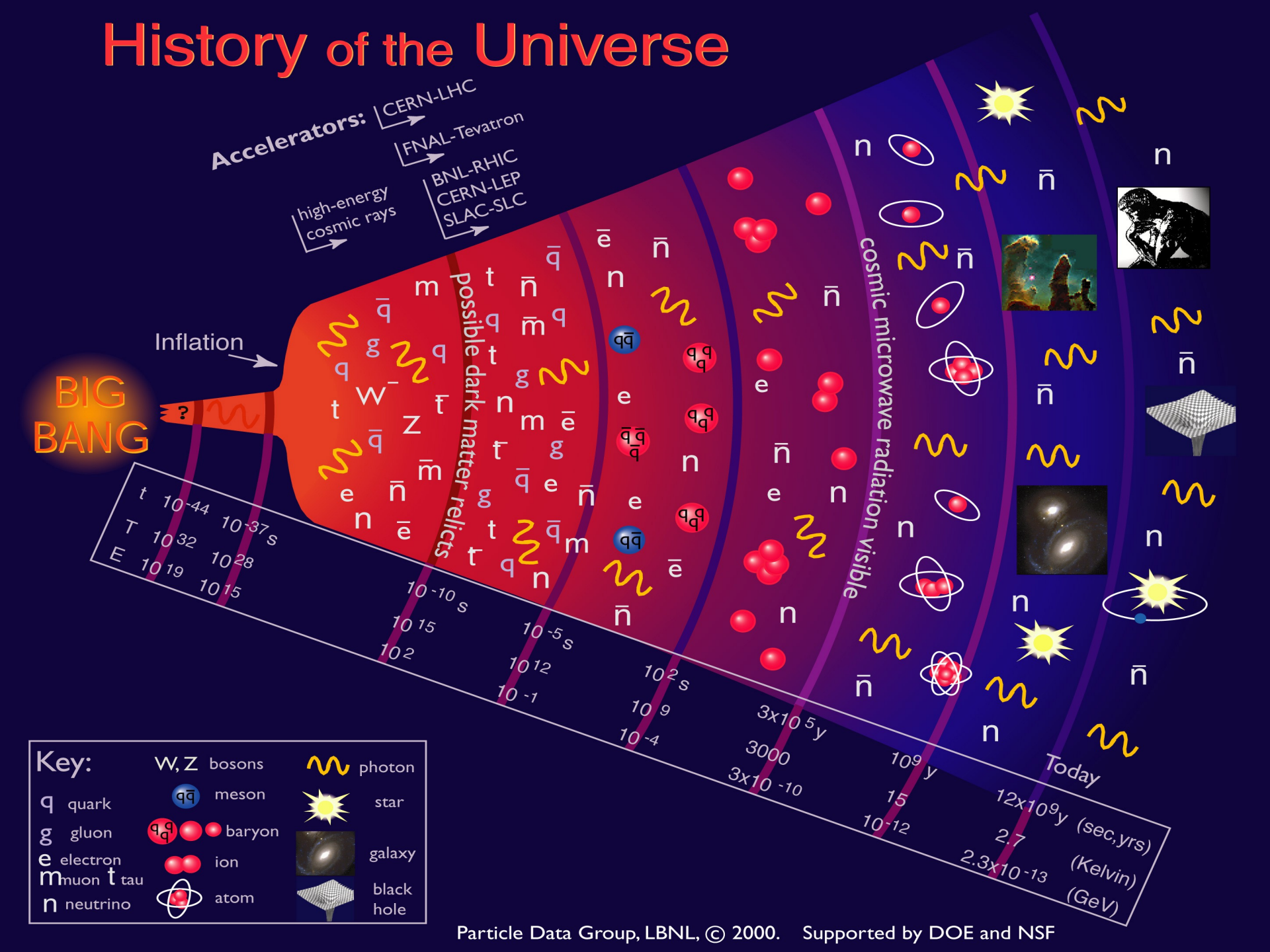
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Partner von DRESDEN concept exzellenz-dresden.de

HZDR

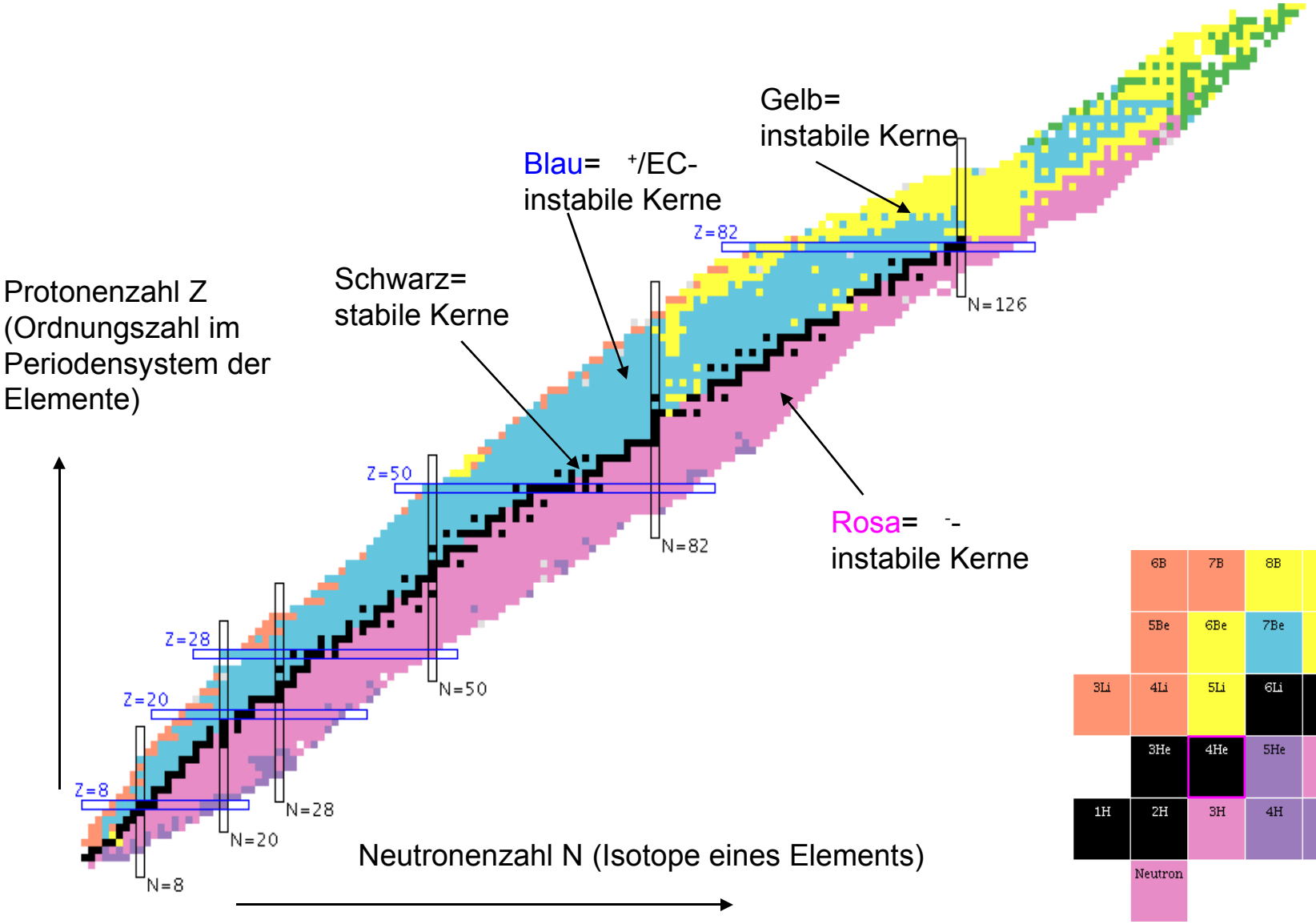
HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

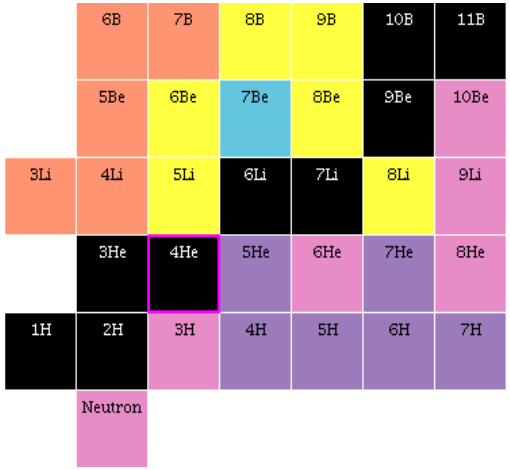
History of the Universe



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

Nuklidkarte, analog zum Periodensystem der Elemente





Bindungsenergie und Entstehung der chemischen Elemente

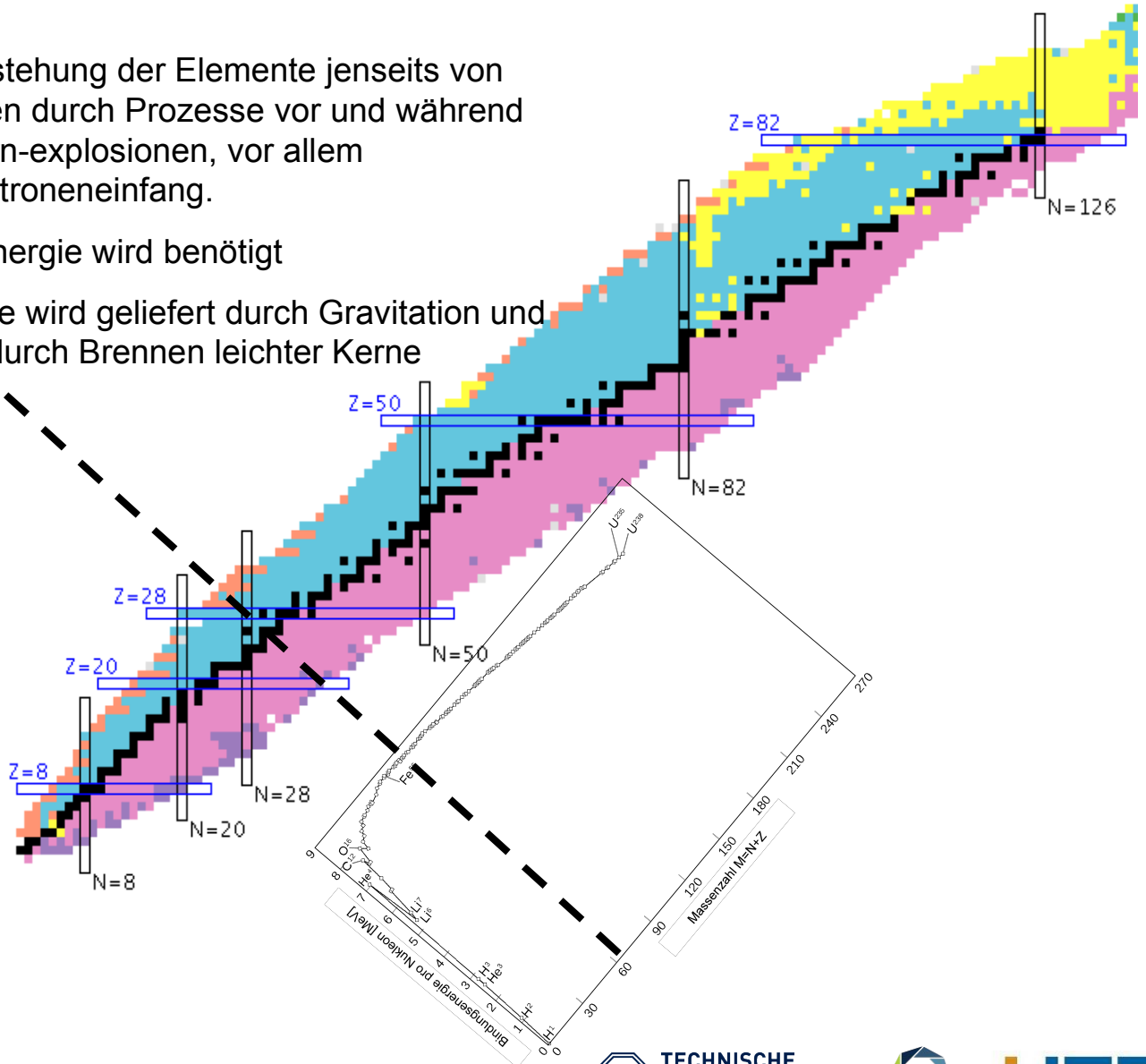
Entstehung der Elemente jenseits von Eisen durch Prozesse vor und während Stern-explosionen, vor allem Neutroneneinfang.

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



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

DRESDEN concept

HZDR

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*) :

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

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

Übungsaufgaben, für nächste Woche (19.05.2011)

1. Wie ist der Q-Wert der Reaktionen
   - $^{3}He(\alpha,\gamma)^{7}Be$,
   - $^{1}H(p,e^{+})^{2}H$,
   - $^{2}H(t,n)^{4}He$,
   - $^{3}He(^{3}He,2p)^{4}He$?

   Verwende für die Rechnung die Werte für den Massenüberschuss (mass excess) aus der aktuellen Massenevaluation

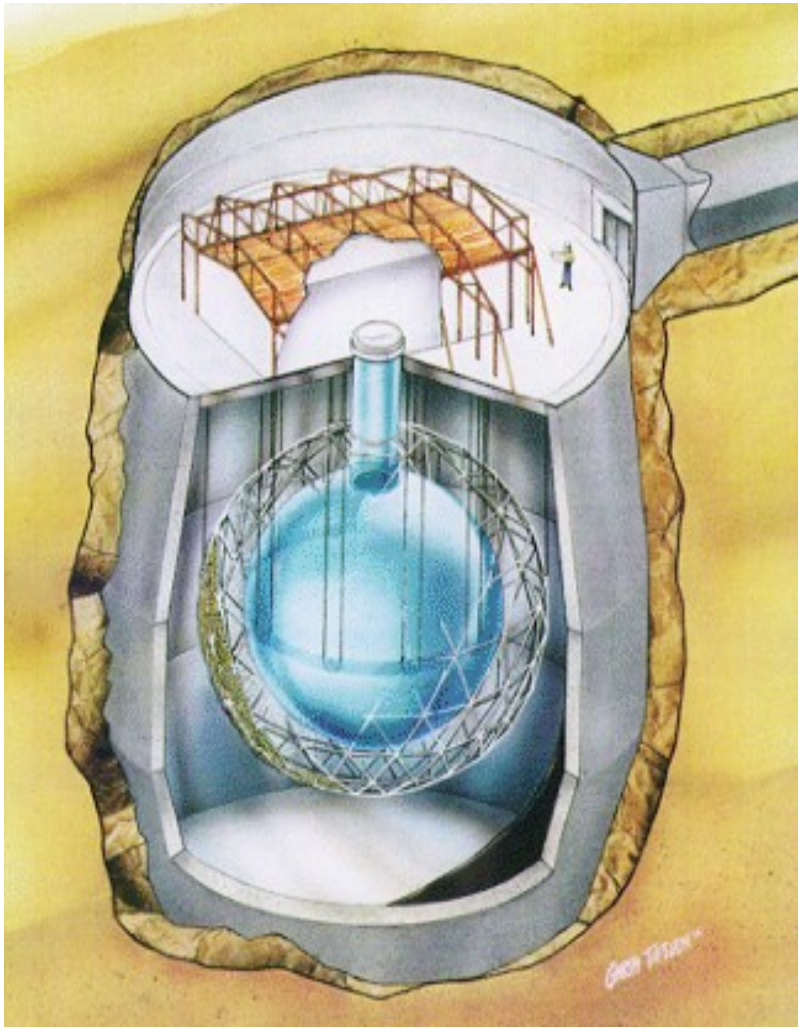
   (Suche nach AME2003 ... oder alternativ direkt)

   http://www.nndc.bnl.gov/amdc/masstables/Ame2003/mass.mas03

- Betrachte den radioaktiven Zerfall 1 → 2 → 3, wobei 1 der radioaktive Mutterkern ist, 2 der ebenfalls radioaktive Tochterkern und 3 der stabile Endkern. Zu Anfang sei $N_1(t=0) = N_1^0$ und $N_2(t=0) = N_3(t=0) = 0$.
  - Leite die Differentialgleichung für die Änderung der Häufigkeit $dN_2(t) / dt$ her und gib die Funktion für $N_2(t)$ an.
  - Gib den Verlauf von $N_3(t)$ an.
  - Betrachte den Verlauf von N_1, N_2 und N_3 für kleine Werte von t. Nähere die Exponentialfunktion in 1. Ordnung linear und diskutiere die Ergebnisse.

- Übung Donnerstag (gerade Wochen), 4. DS, SE2/122, nächste Übung: 19.05.2011

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 $> 10^{29}$ a

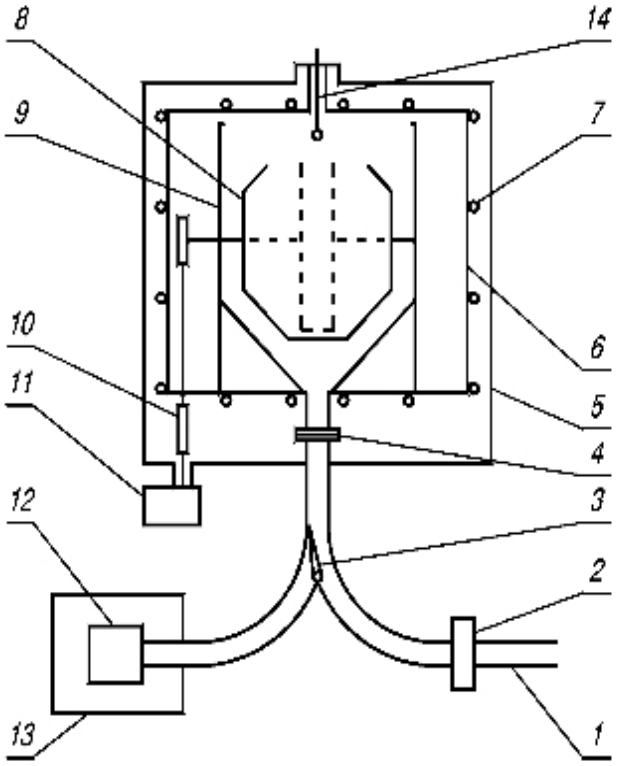
http://www.sno.phy.queensu.ca/

Lebensdauer des freien Neutrons: Experiment

$$n \quad p + e^- + \bar{n}$$

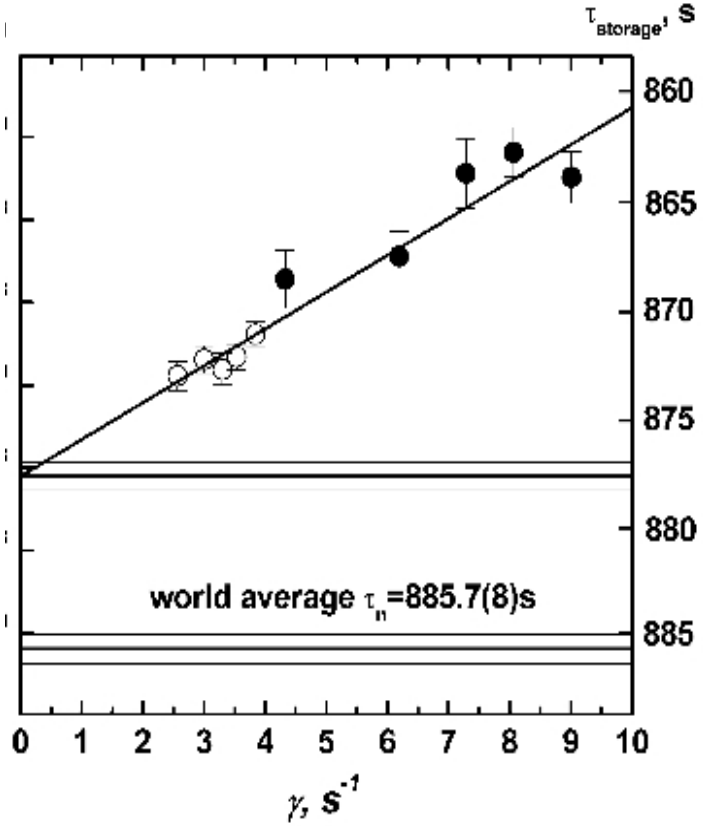
m_n = 939.6 MeV/c² > 938.3 MeV/c² +0.5 MeV/c² = m_p+m_e

Also Neutronen-Zerfall energetisch möglich!



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

$$\frac{1}{t_{storage}} = \frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_{loss}}$$



Experiment mit Neutronenfalle (geschlossen durch Gravitation)

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

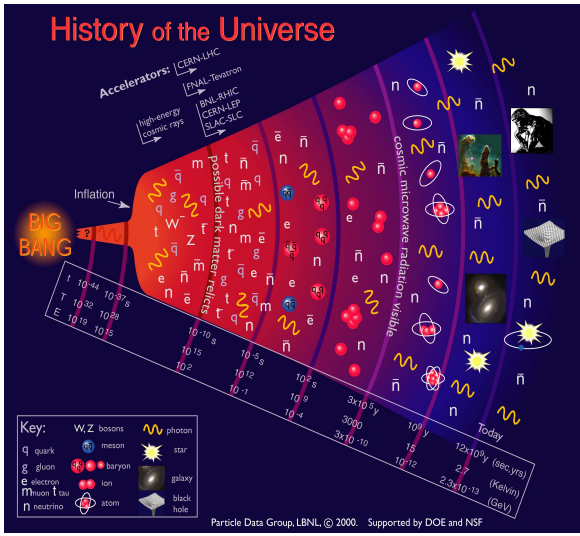
Verhältnis von Neutronen- zu Protonenzahl zu Beginn der Nukleosynthese

- 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

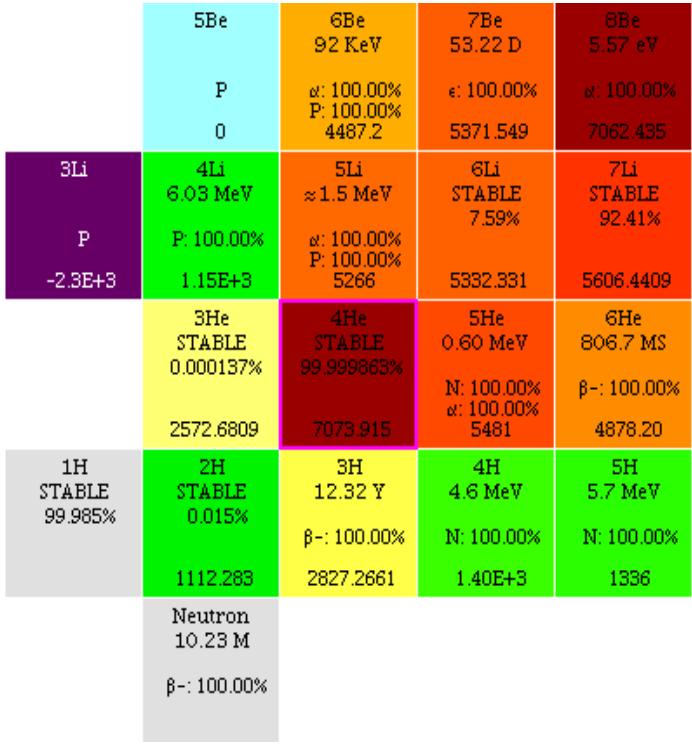


Entstehung von ^{4}He

- 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:

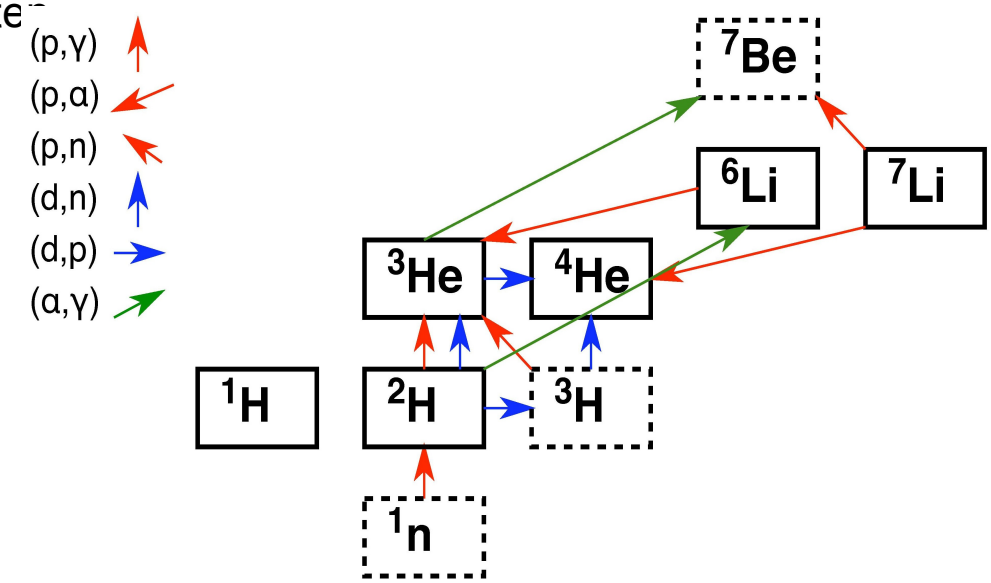
$$\frac{m(^4\mathrm{He})}{m_{\mathrm{tot}}} = \frac{2n}{p+n} = \frac{2n/p}{1+n/p} = \frac{2/7}{8/7} = 0.25$$

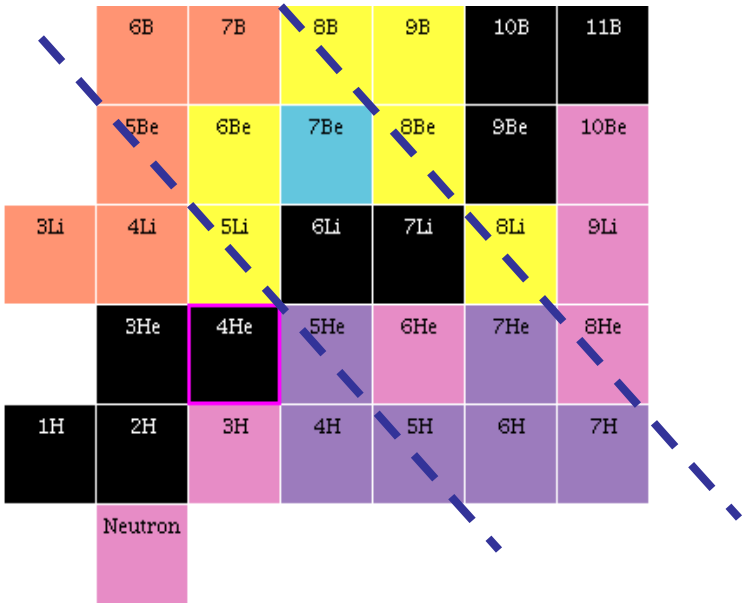
- Der Rest der Masse bleibt im Element Wasserstoff, bis auf kleine Verunreinigungen



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

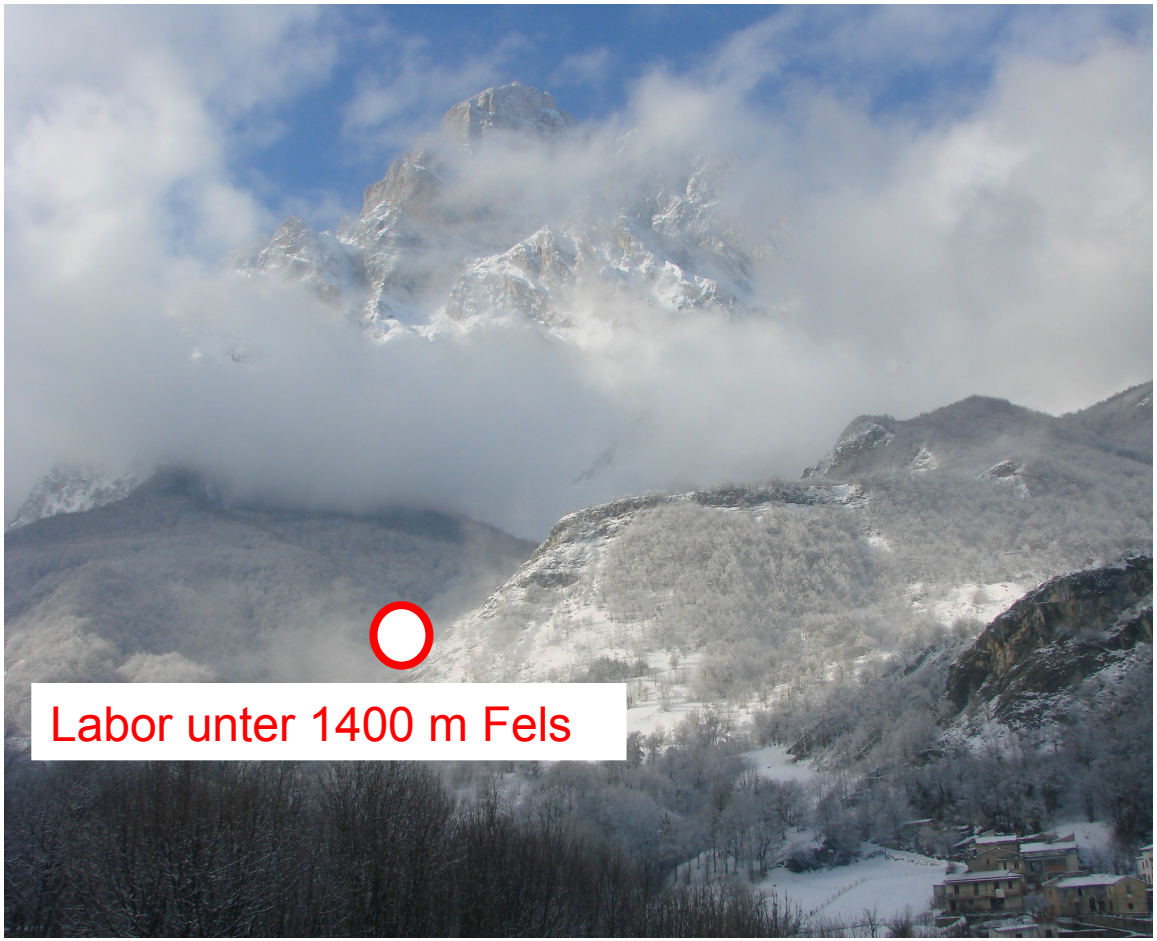
- Reaktionsnetzwerk bestimmt Häufigkeiten
- Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung von Eingabewerten aus Experiment und Theorie (Mikrokosmos)
- ^{7}Be (Halbwertszeit 53 d) wird zu ^{7}Li
- Keine Entstehung von Kernen mit A > 7





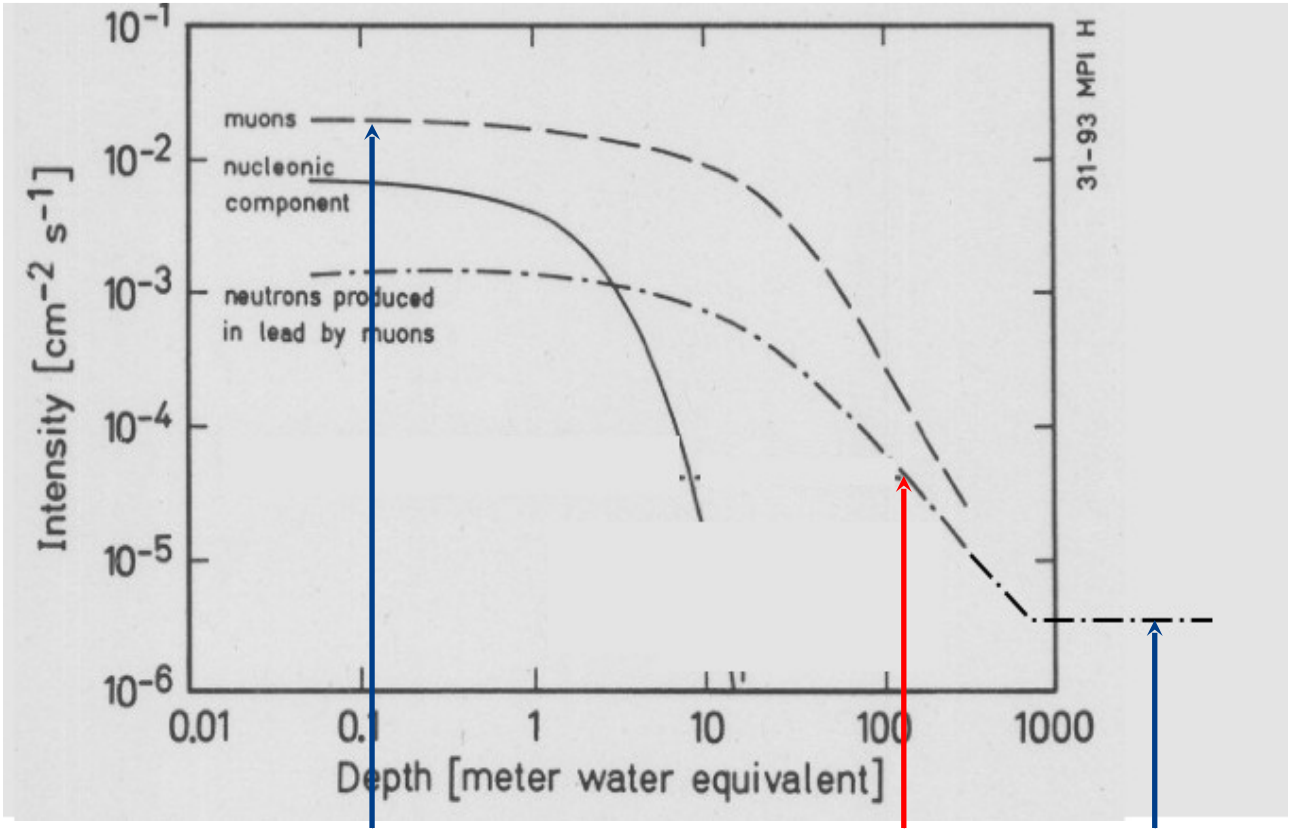
- Barrieren bei Masse 5 und 8 behindern den Aufbau zu höheren Massen durch Protoneneinfang
- Neutroneneinfang unbedeutend, da quasi alle Neutronen bereits in ^{4}He gebunden
- Coulombschwelle ~Z_1Z_2 behindert den Einfang von ^{4}He
- Ende der Urknall-Nukleosynthese bei ^{7}Li

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



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.

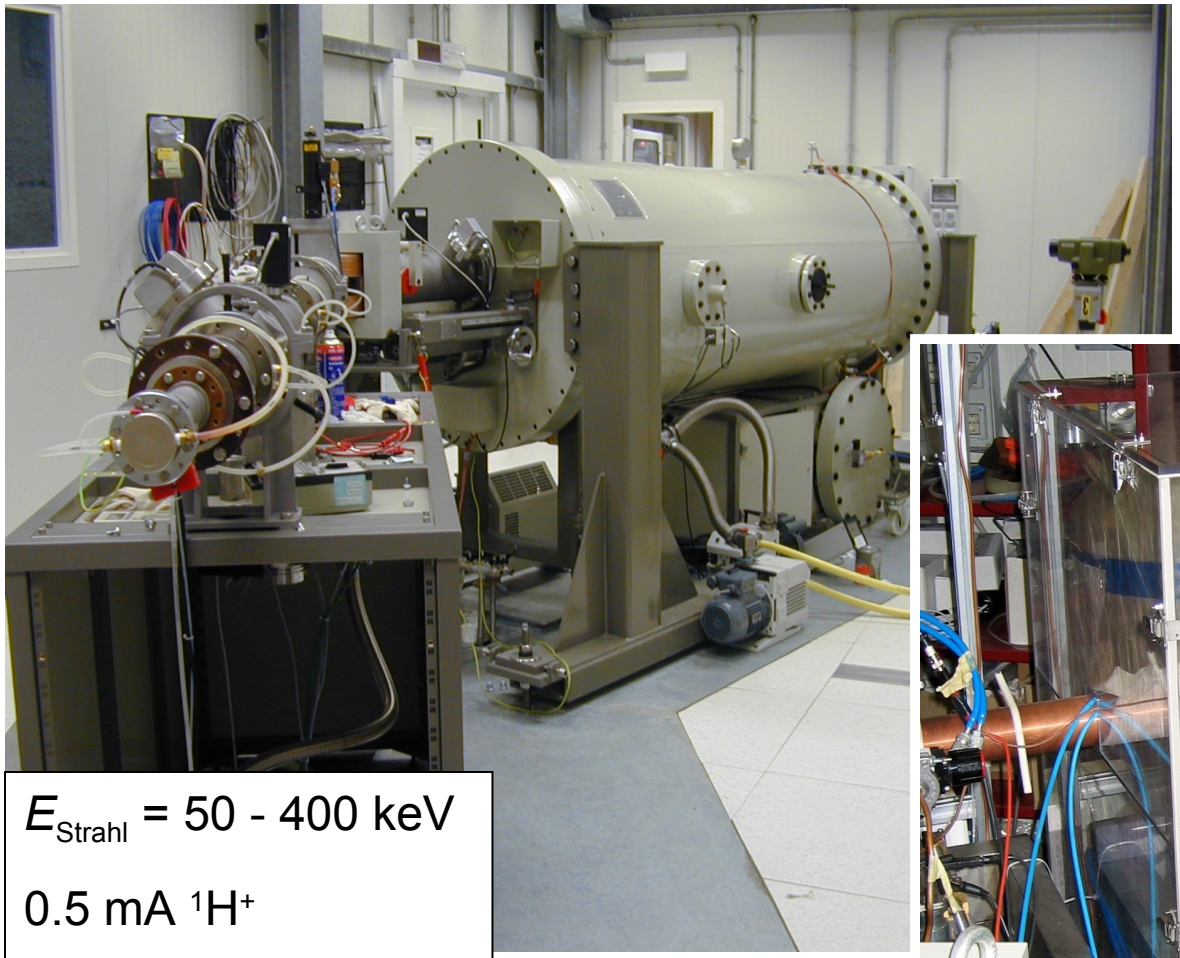


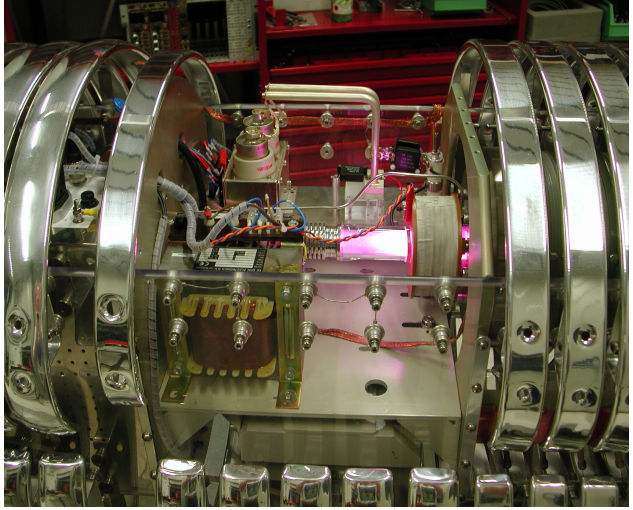
Erdoberfläche

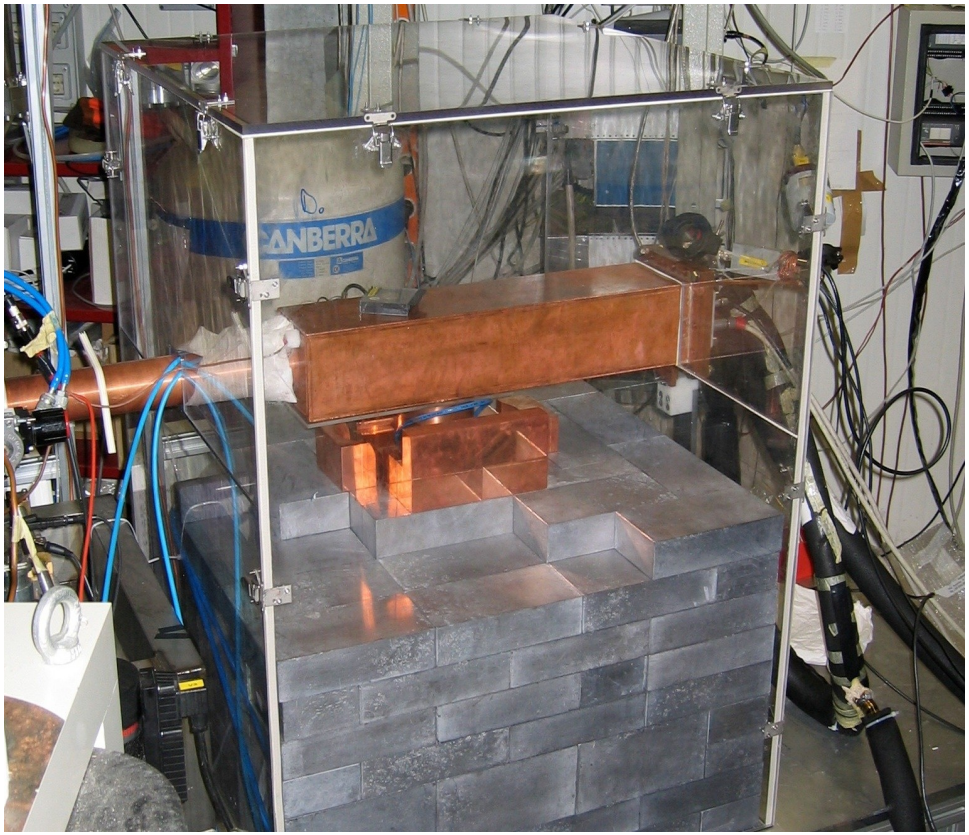
Felsenkeller Dresden

Gran Sasso

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





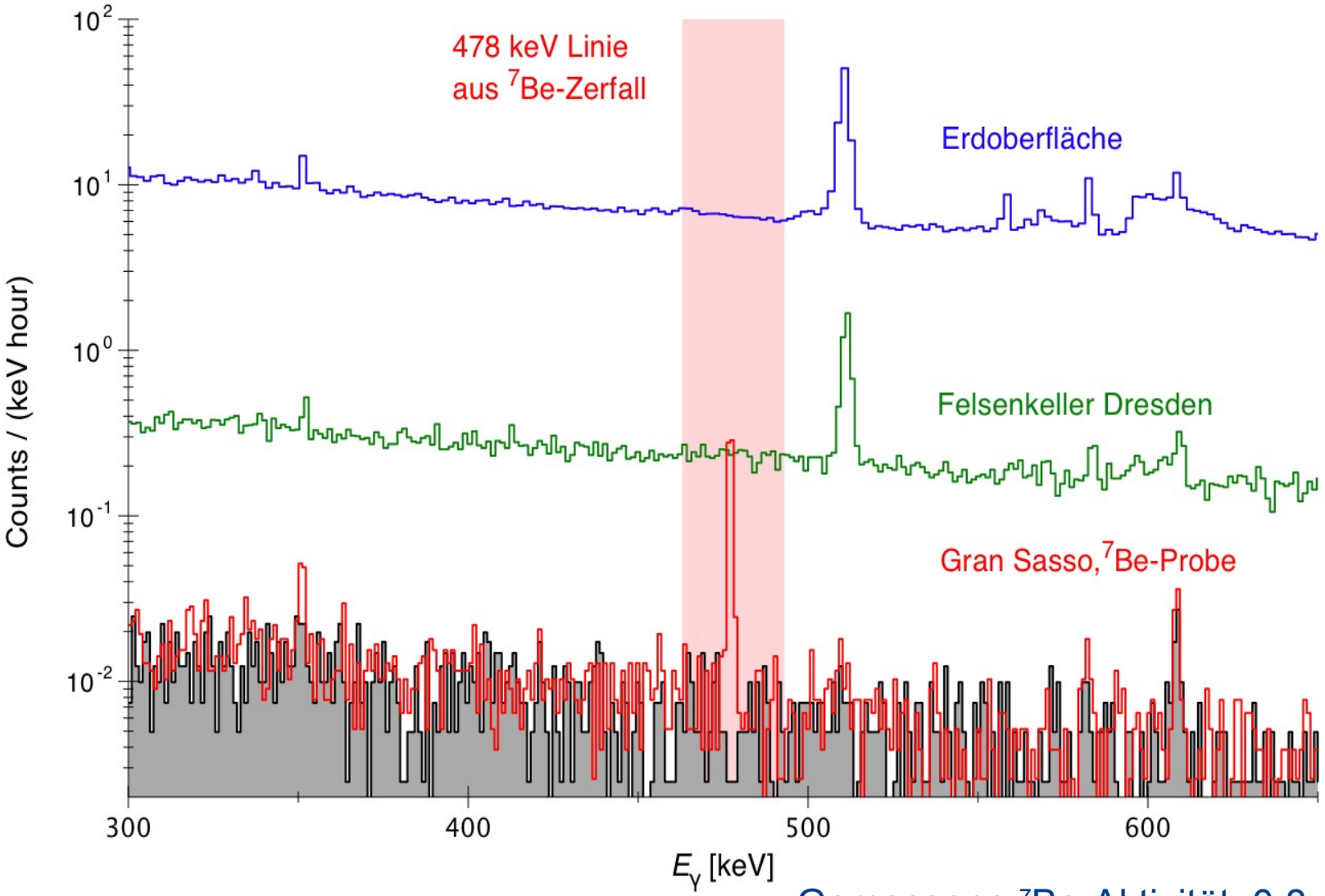


E_{Strahl} = 50 - 400 keV

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

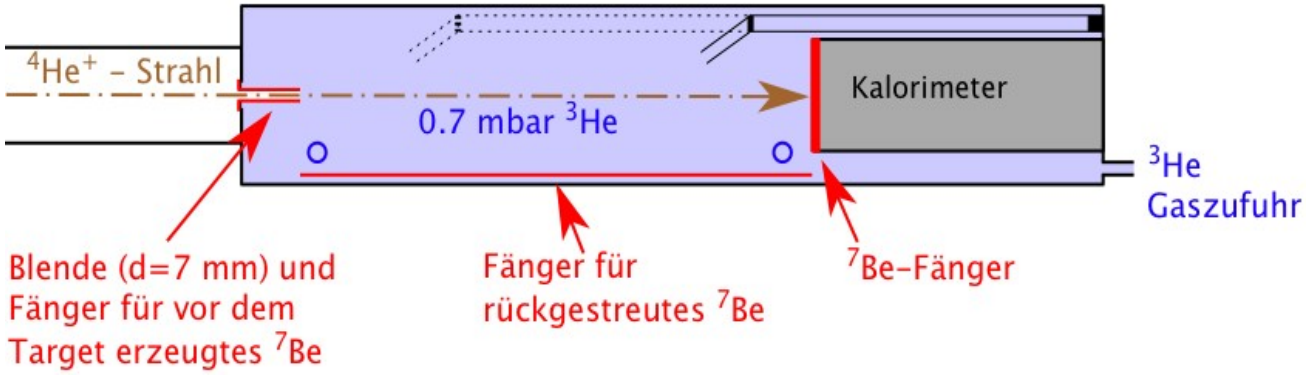
0.3 mA $^{4}He^{+}$

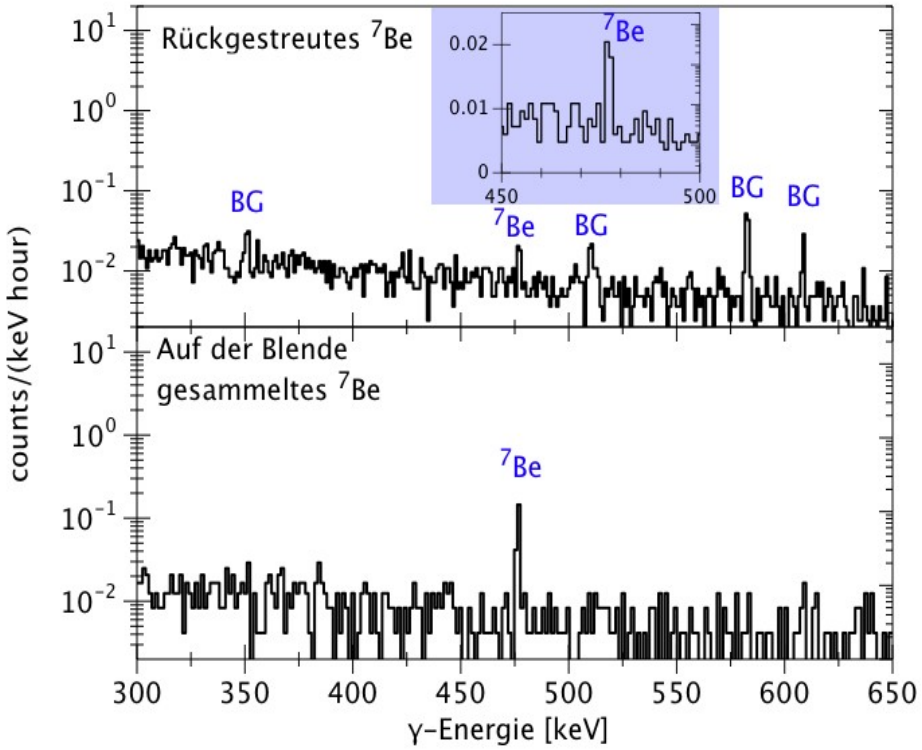
Messung zur Urknall-Nukleosynthese: $^{3}He(\ ,\ )^{7}Be$ an LUNA, ^{7}Be-Spektren



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

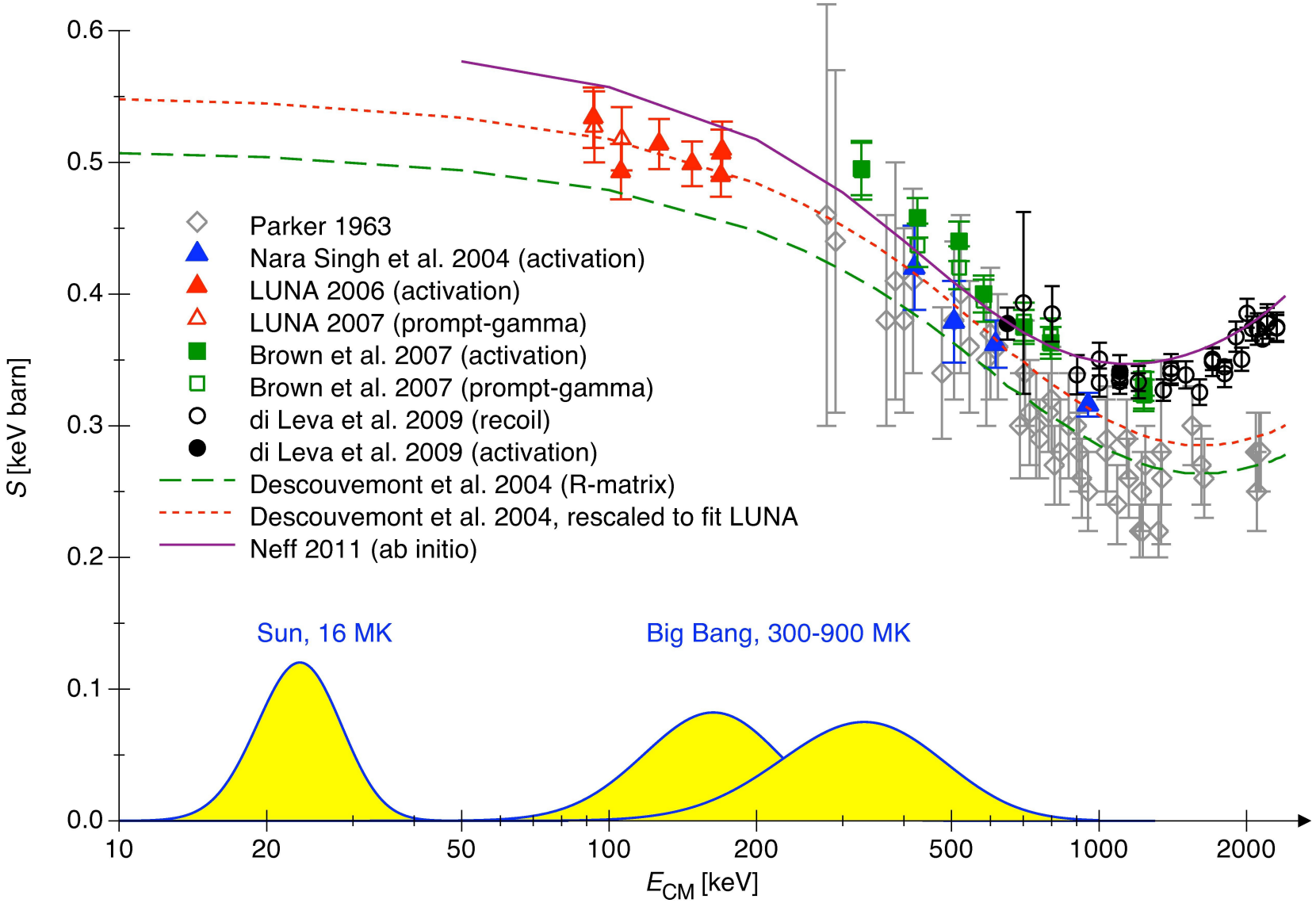
$^{3}He(\ ,\ )^{7}Be$-Aktivierungsmessung an LUNA





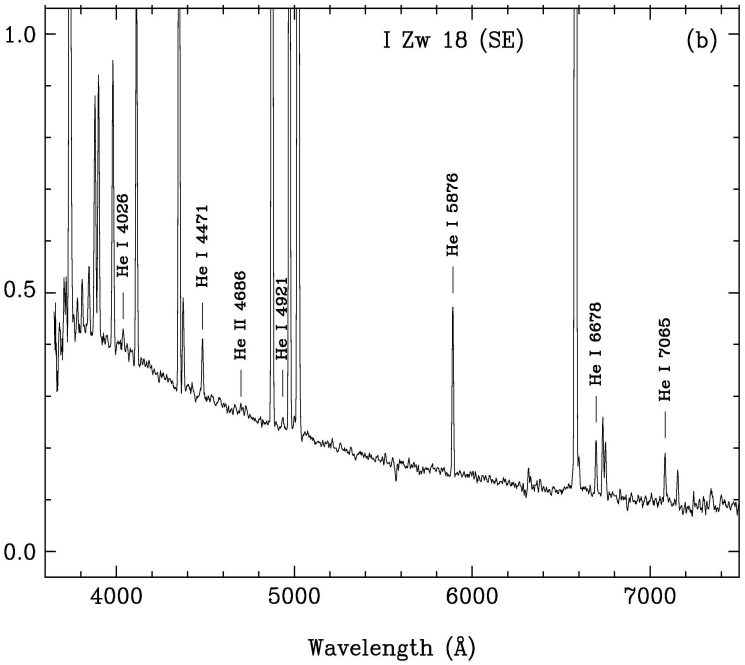
-Nachweiswahrscheinlichkeit	1.8%
Strahlintensität	1.5%
Gasdichte	1.5%
^{7}Be-Verluste	0.7%
Systematische Unsicherheit	**3.0%**

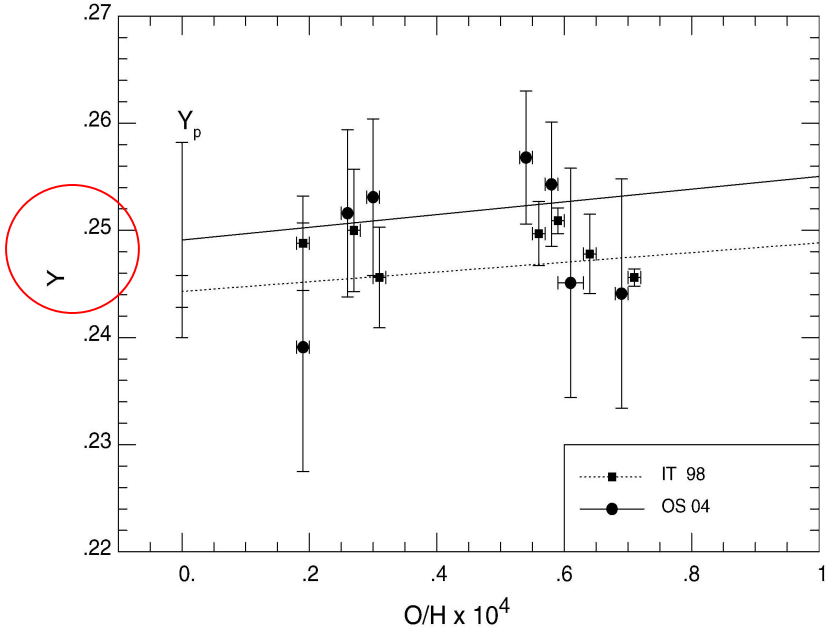
$^3He(\alpha,\gamma)^7Be$-Aktivierungsmessung an LUNA, Ergebnisse

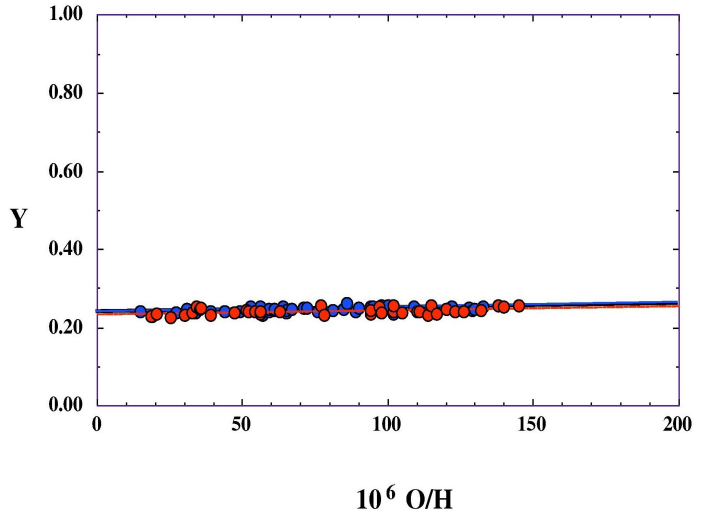


Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: ^{4}He

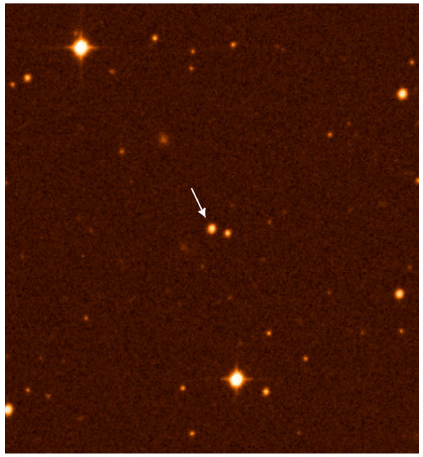
- Beobachtung von ^{4}He-Linien in Gaswolken
- Häufigkeit als Funktion des Alters, ausgedrückt als Anreicherung der Gaswolke in Sauerstoff O/H
- Fit und Extrapolation zu Null

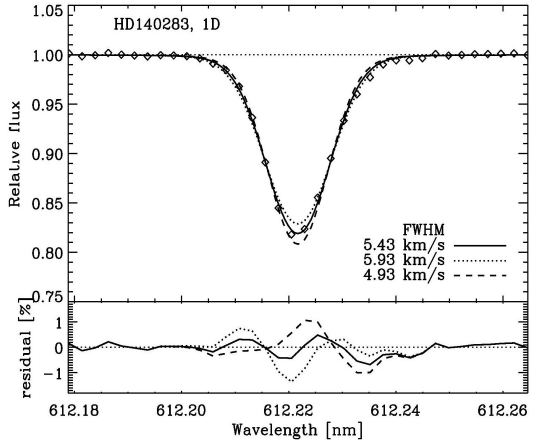




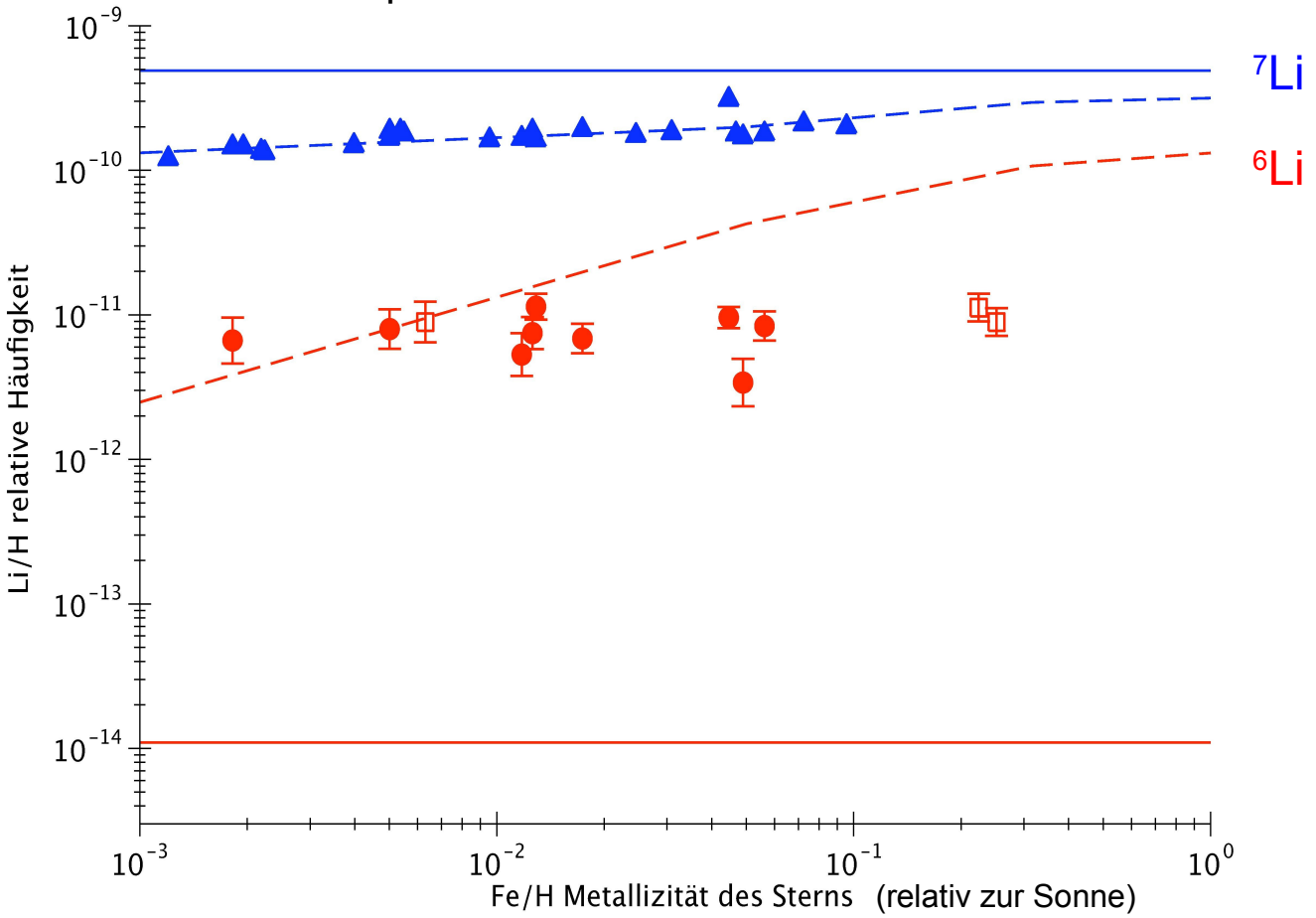


Beobachtung von Nuklidhäufigkeiten: Das Lithium-”Plateau”





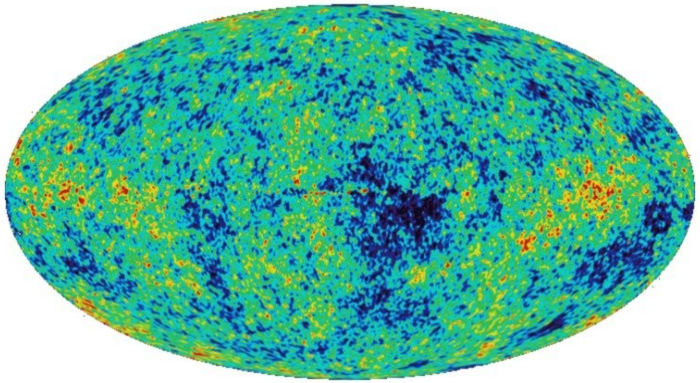
- Beobachtung von Absorptionslinien in sehr alten Sternen
- Darstellung als Funktion der Anreicherung in Kernen mit A>7
- Fitten und Extrapolation zu Alter Null

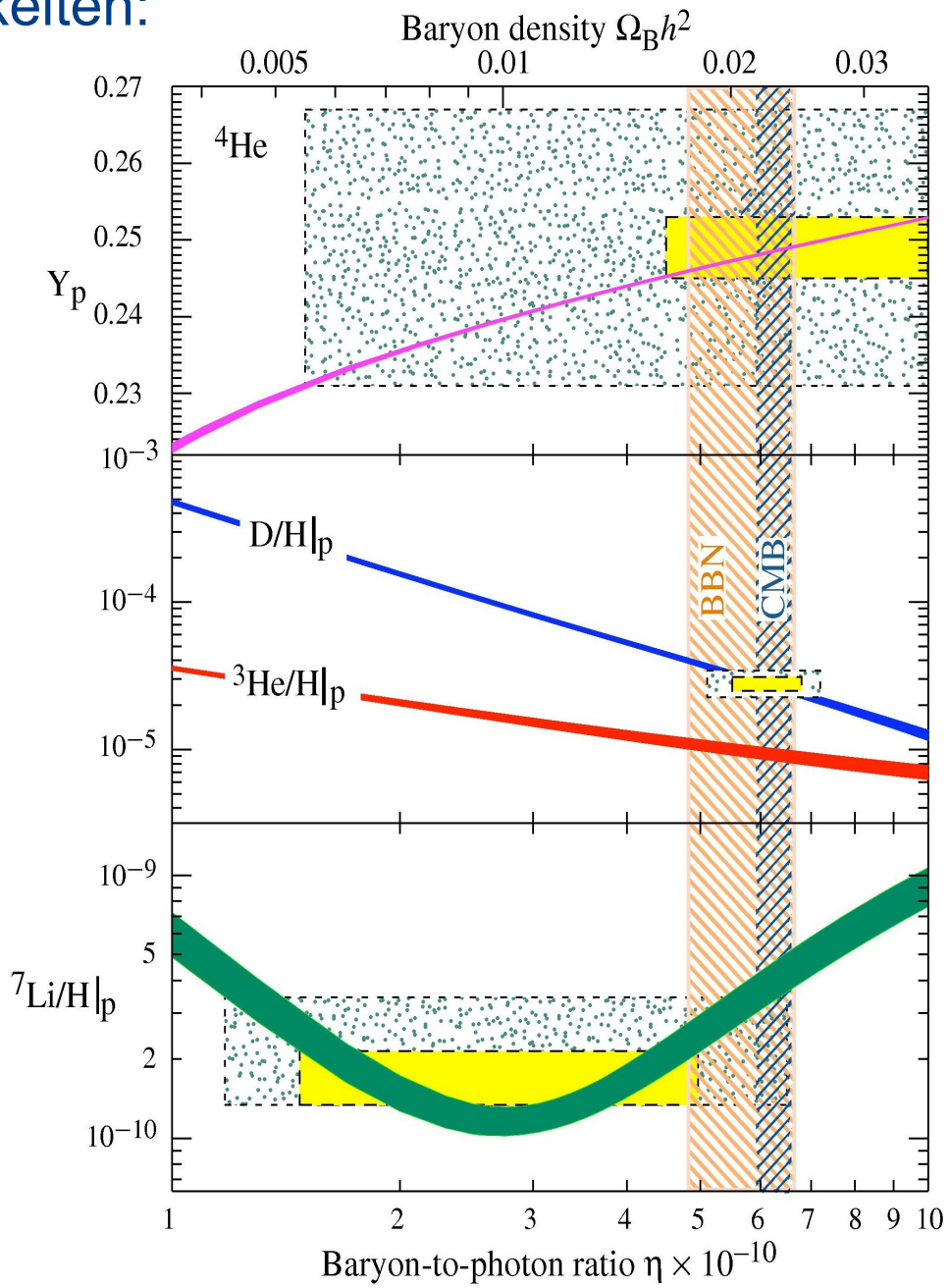


TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
DRESDEN concept
HZDR

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.