

Kern- und Teilchenphysik

Johannes Blümer

SS2012

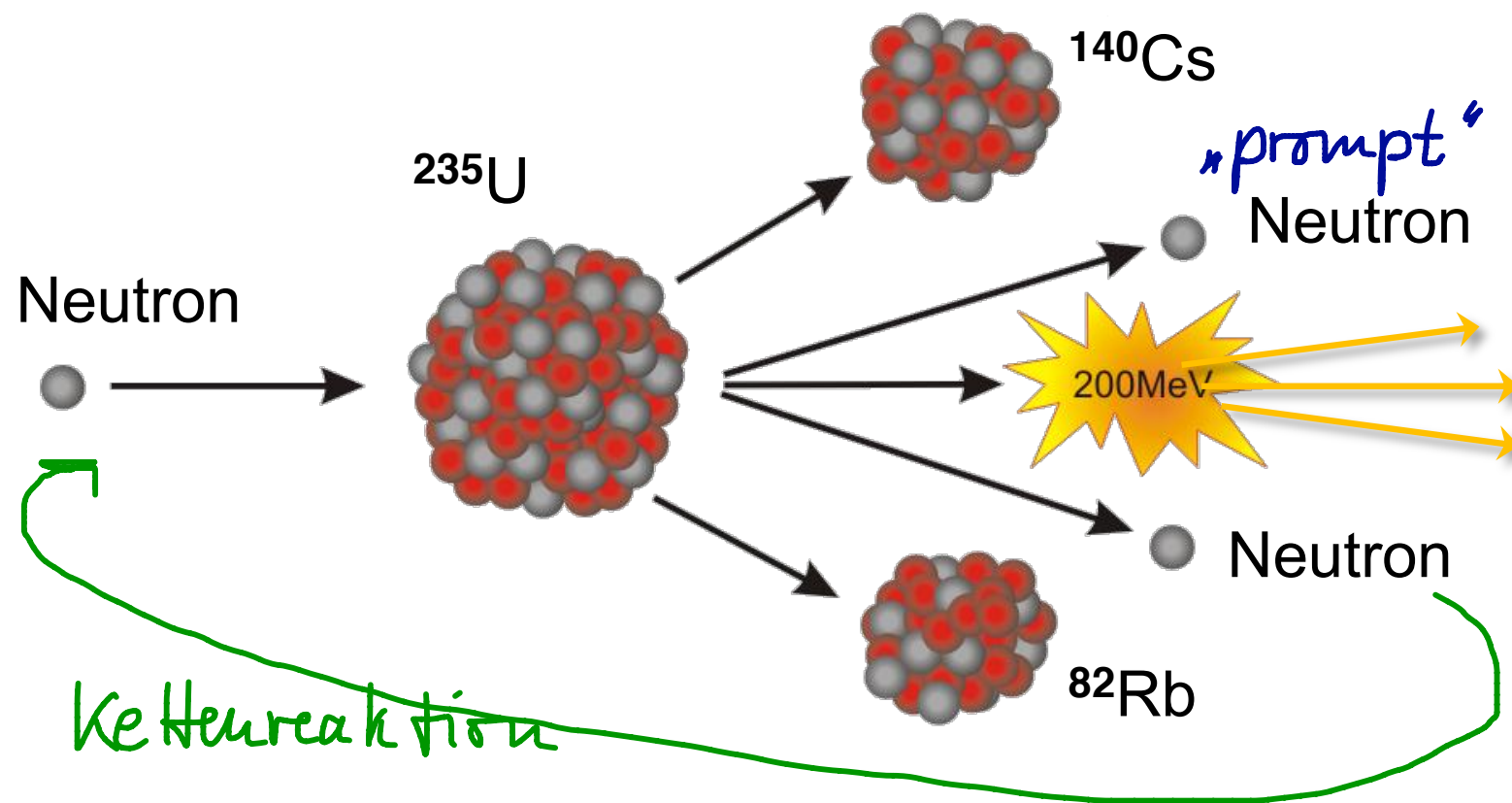
Vorlesung-Website

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



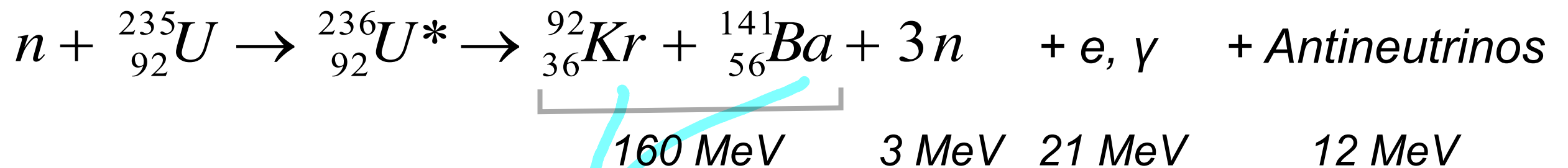
■ Kernphysik im Labor und im Universum

- Kernspaltung cont'd
- Elementsynthese: Urknall, Kernfusion, Supernovae



Isotop	Energie [MeV]
^{235}U	201.7 ± 0.6
^{238}U	205.0 ± 0.9
^{239}Pu	210.0 ± 0.9
^{241}Pu	212.4 ± 1.0

Energieaufteilung:



+ verzögerte Neutronen aus β -Zerfall,
0.0065 pro Spaltung

Neutroneneinfang

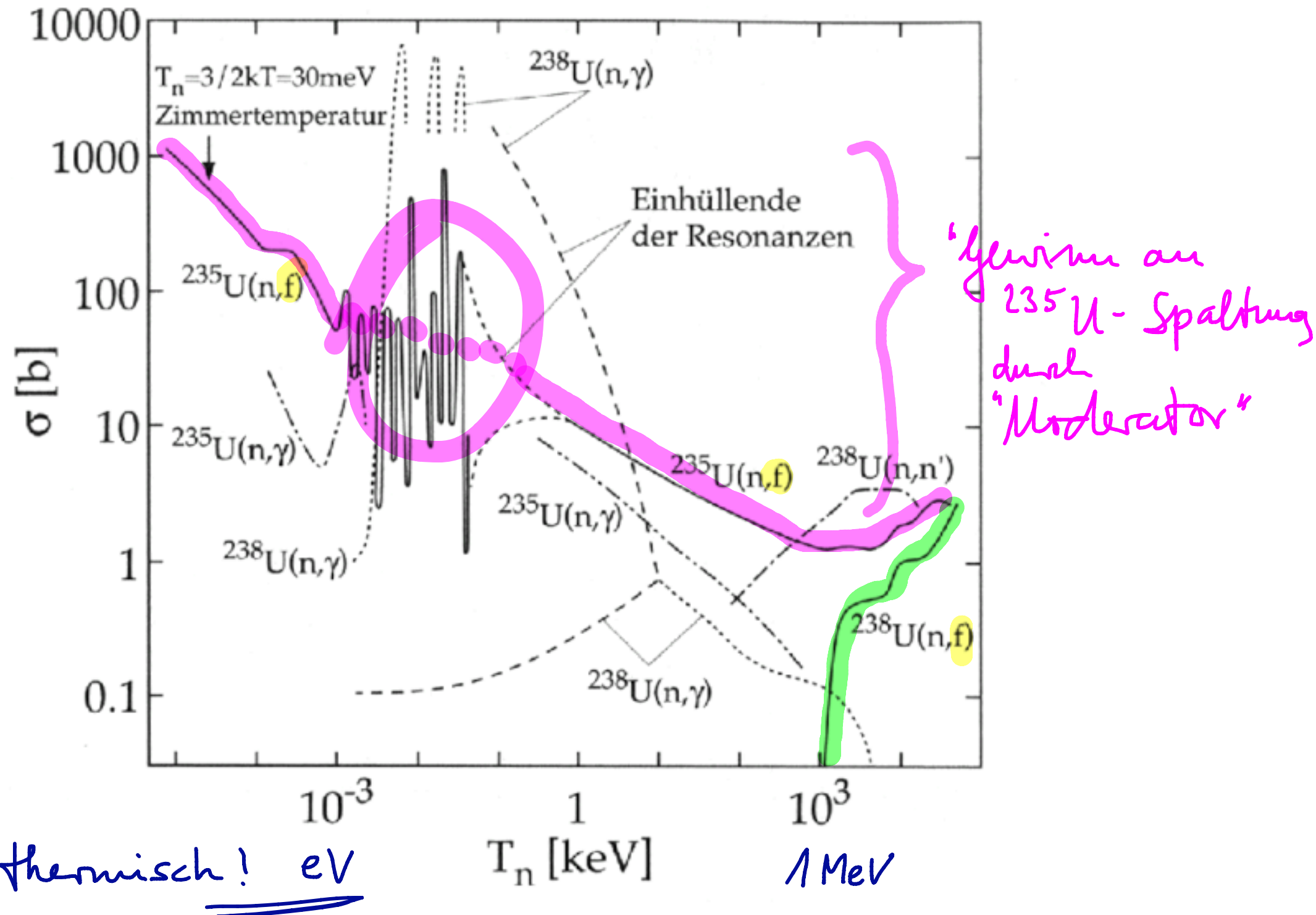


Abbildung 43: Wirkungsquerschnitte für Reaktionen von Neutronen am Uran. Dicht liegende Resonanzen können nicht gezeichnet werden, daher wird die Einhüllende der Resonanzmaxima und -minima gezeigt. (n, γ): Neutronenabsorption und Zerfall durch γ -Emission; **f: Spaltung**; n': Streuung (nach [22]).

Kettenreaktion

- ^{238}U erfordert $> 1 \text{ MeV}$, keine Kettenreaktion möglich, sondern Einfang und Abregung durch γ -Strahlung
- ^{235}U
 - hat große WQ für thermische Neutronen! n “moderieren”
 - Anteil 0.7% im natürlichen Uran
- Multiplikationsfaktor:
 $k = (N_n \text{ in Generation } i) / (N_n \text{ in Generation } i - 1)$
 - Reaktion bricht ab für $k < 1$ und divergiert für $k > 1$
 - $k = f(^{235}\text{U}\text{-Gehalt, Moderator, Geometrie})$
 - “kritische Masse” für $k = 1$ bei 50 kg Kugel ^{235}U ($\varnothing 8.4 \text{ cm}$) erreicht; kann durch Tricks drastisch reduziert werden...
- Brutreaktor:
$$\begin{aligned} n + {}^{238}_{92}\text{U} &\rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} + \gamma, \\ {}^{239}_{92}\text{U} &\rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\tau = 34 \text{ min}) \\ {}^{239}_{93}\text{Np} &\rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\tau = 81 \text{ d}). \end{aligned}$$

$\tau \approx 35\,000 \text{ Jahre}$, spaltbar wie ^{235}U

Reaktorregelung

Neutronenzahl N wächst exponentiell:

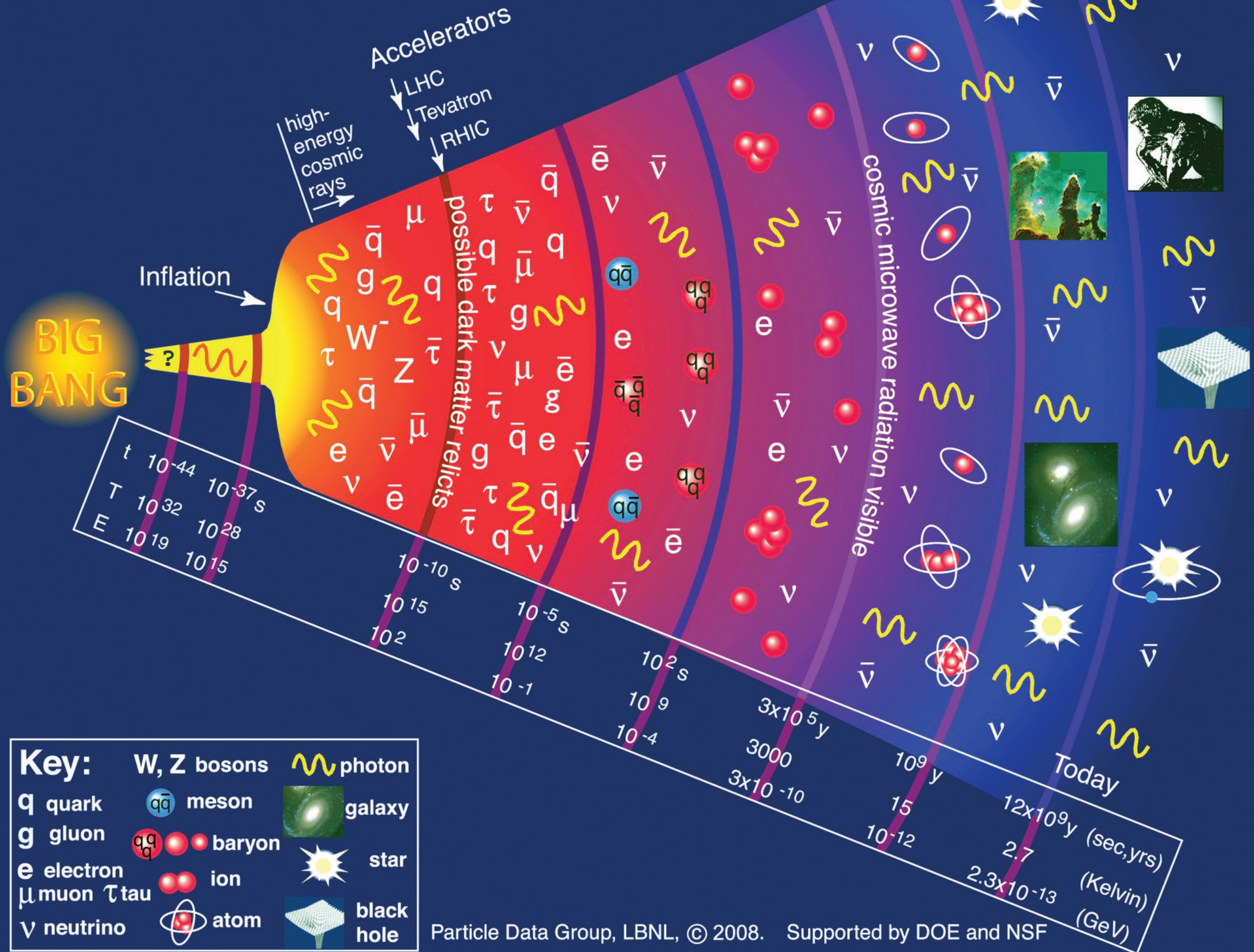
$$dN = \left(\underbrace{\frac{k-1}{\tau_{prompt}}}_{1 \text{ ms}} + \underbrace{\frac{\alpha}{\tau_{verz.}}}_{100 \text{ ms}} \right) N dt \quad \Rightarrow \quad N = N_0 e^{\left(\frac{k-1}{\tau_{prompt}} + \frac{\alpha}{\tau_{verz.}} \right) t}$$

Wähle k etwas kleiner als 1: “prompt unkritischer” Betrieb

Mit $\alpha = 0.0065$ und $\tau_{verz.}$ ist die Regelzeit dann $T = \tau_{verz.}/\alpha \approx 15 \text{ s}$,

mechanische Regelung der moderierten Neutronen mit Cd-Stäben möglich

History of the Universe

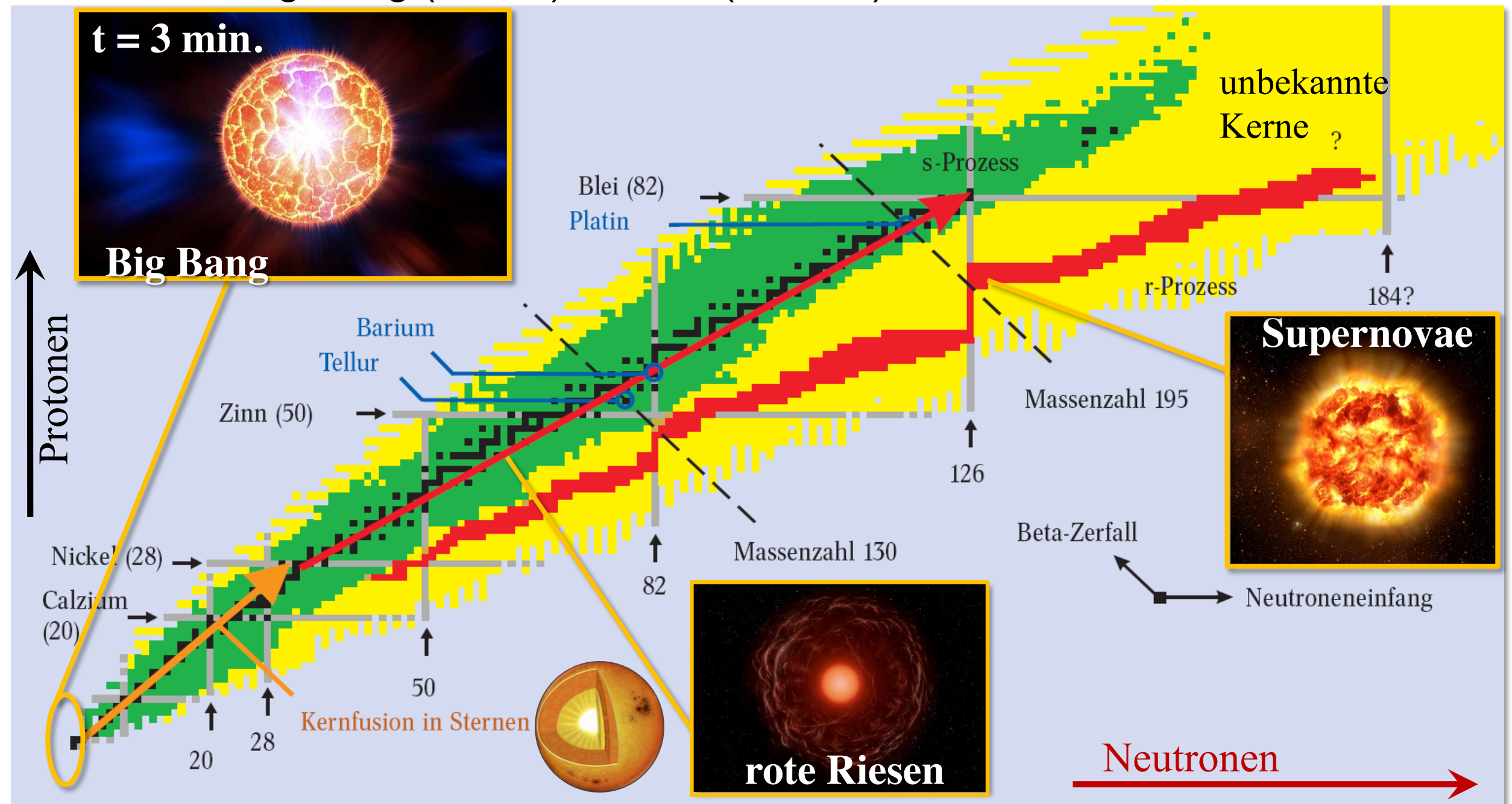




[Neue Fenster zum Kosmos, Beihefter zu
Spektrum der Wissenschaft, 2012;
Hrsg. KAT+HAP]

Elementsynthese

Kernfusion: Big Bang (bis ${}^7\text{Li}$), Sterne (bis ${}^{56}\text{Ni}$), r- und s-Prozess: Riesen, SNae

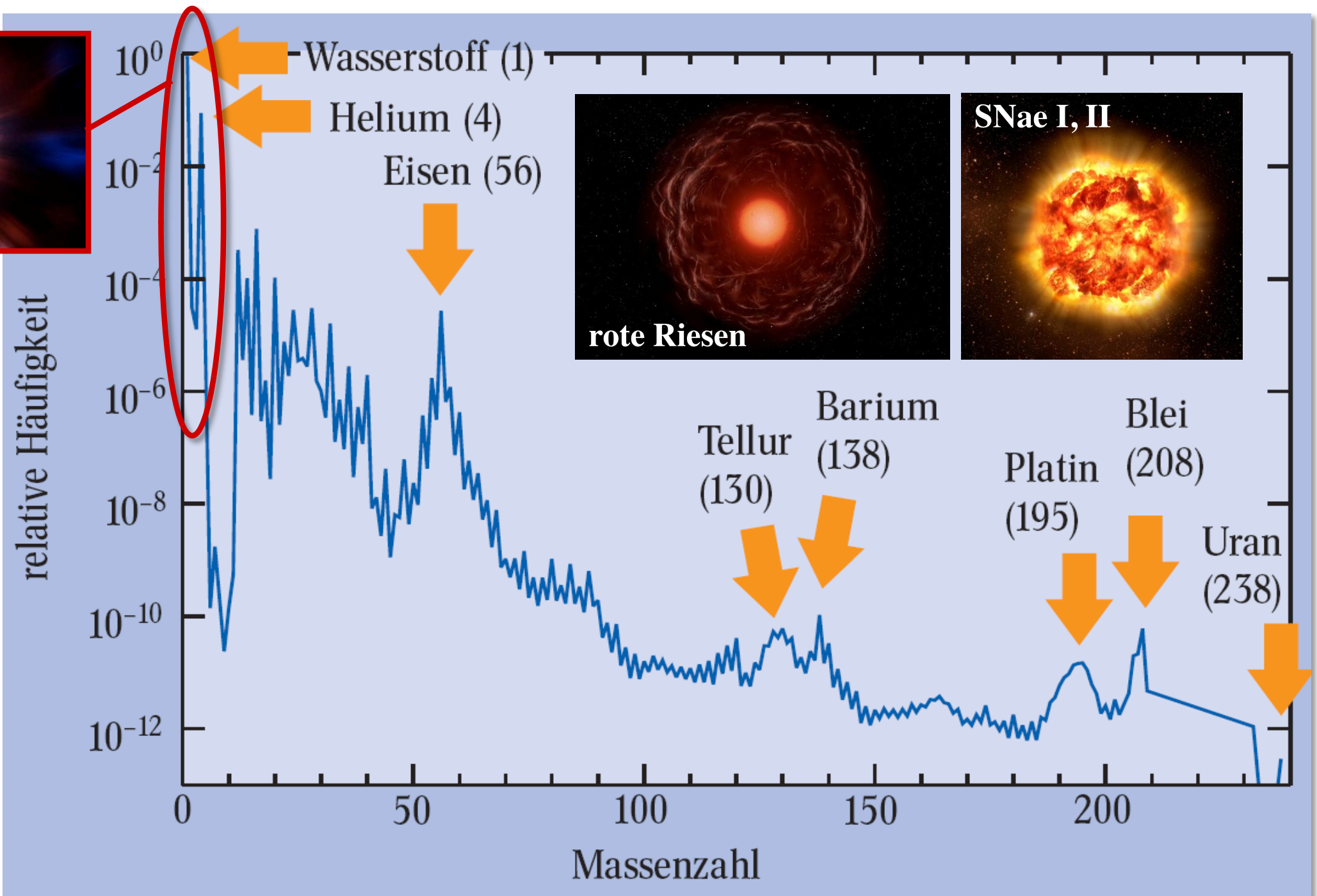


[Drexlin]

Elementhäufigkeit



~2% Metalle
durch:
- Kernfusion
- r-Prozess
- s-Prozess



[Drexlin]

[Drexlin]

Galaxien

3 Mrd. Jahre

Quasare

1 Mrd. Jahre

erste Sterne

100 Mio. Jahre

Entkopplung CMBR

300000 Jahre

Materie dominiert

10000 Jahre

Nukleosynthese

3 min.

e^+e^- Zerstrahlung

1 s

Baryonenerzeugung

Große Vereinheitlichung

Planck Epoche

Radius Universum

Historie und Überblick

$\alpha \beta \gamma$

- 1940:** Gamov und Alpher – alle Elemente entstehen im frühen Universum durch Neutroneneinfang & β -Zerfall
- 1957:** Fowler et al. – schwere Elemente nur in Sternen
- 1964:** Hoyle et al. – He-4 Produktion ist primordial
- 1965:** J. Peebles – erste moderne BBN Berechnung
- 1970:** H. Reeves – Deuterium zur Messung der Baryondichte
- 1977:** Schramm et al. – BBN beschränkt die Anzahl der ν -Generationen (Link: Teilchenphysik-Kosmologie)
- 1992:** COBE Satellit misst erstmals Temperatur-Fluktuationen bei der 3 K Hintergrundstrahlung (heißer Urknall)
- 2003:** WMAP misst präzise den Baryonenanteil Ω_b aus der Analyse von Schallwellen in der CMB
Resultate in guter Übereinstimmung mit BBN

[Drexlin]

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

*The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948*

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the

Elementsynthese Überblick

Leichte Elemente H...Li

entstanden im Urknall
„BBN“ im Zeitintervall
 $10\text{ s} \lesssim t \lesssim 10^3\text{ s}$

← „zu heiss“ „zu kalt“ →

n-p Massendifferenz
n-Lebensdauer
 N_ν & Abkühlrate
 N_ν & ${}^4\text{He}$ -Produktion

bis $A \lesssim 56$

Kernfusion in Sternen
M-L-T-Relationen
HRD-Diagramm
Sternmasse - Schalen-
brennen

B/A-Verlauf!

Schwere Elemente

extrem n-reiche Umgebun-
gen: Supernova-Explos.

SN I: thermonukl. Explos.
eines Weissen Zwerger

SN II: Kernkollaps eines
Schweren Sterns
 $M \gtrsim 8..10 M_\odot$

Tabelle 5.1. Zeitliche Entwicklung des Universums [H. Gerner, Kosmologie]

Urknall				
z	t [s]	(Mythenära)	T [K]	E [GeV]
10^{32}	10^{-43}	Quantenphänomene	10^{32}	10^{19}
10^{26}	10^{-35} 10^{-34} 10^{-32}	Plasma relativistischer Teilchen (Quarks, Leptonen, Eichbosonen, Higgsteilchen) Inflationäre Phase GUT– Phasenübergang (Symmetriebrechung von $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ zu $SU(2) \times U(1)$)	$5 \cdot 10^{26}$	10^{14} bis 10^{16}
		Hadronenära (Märchenära)		
10^{13}	$2 \cdot 10^{-12}$	elektroschwacher Phasenübergang (Symmetriebrechung von $SU(2) \times U(1)$ zu $U(1)_{EM}$)	10^{15}	150
	$2 \cdot 10^{-6}$	Quark–Hadron–Übergang (Quark confinement) $kT > m_\pi c^2$	10^{13} $1,5 \cdot 10^{12}$	0.15
	10^{-2}	schwach–wechselwirkende Teilchen: $\mu^\pm, e^\pm, \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau, \gamma$ und kleiner Nukleonenanteil (p, n) im thermischen Gleichgewicht (Paarbildung, –vernichtung, Comptonstreuung) Kernbindungsenergie	10^{11}	[MeV] 10

10 ¹⁰	10 ⁻²	Gleichgewicht (Paarbildung, –vernichtung, Comptonstreuung) Kernbindungsenergie	10 ¹¹	10
	10 ⁻¹	Neutrinos koppeln ab $T_\nu/T_\gamma \simeq 1,4$. $e^\pm$, γ und wenige Nukleonen im thermischen Gleichgewicht	10 ¹⁰	1
		Leptonenära		
10 ⁹	10	$n_p - n_n$ wächst zugunsten von mehr Protonen $e^\pm$ -Paarerzeugung zu Ende $kT \simeq m_e c^2$	$5 \cdot 10^9$	0,5

z	t [s]		T [K]	E [MeV]
10 ⁹	10	$kT \simeq m_e c^2$	$5 \cdot 10^9$	
10 ⁴ – 5 · 10 ³	180 10³	$\gamma, \nu_e, \bar{\nu}_e, n, p$ mit $n_p/n_n \sim 5$ Photonen und Nukleonen im thermischen Gleichgewicht	$3 \cdot 10^9$	0.3
		Urknall–Nukleosynthese $H^+, {}^3\text{He}^{++}, D^+, {}^4\text{He}^{++}, {}^7\text{Li}^{+++}$	10^9	0.1
		Photonenära		
		$n_p/n_n \sim 7$	$5 \cdot 10^8$	
		Energiedichte der Strahlung fällt unter die Energiedichte der Materie Strahlungsdominiert $\uparrow$	10^4	

$10^4 - 5 \cdot 10^3$	180	<i>Urknall-Nukleosynthese</i> $H^+, {}^3He^{++}, D^+, {}^4He^{++}, {}^7Li^{+++}$ Photonenära	10^9	0.1
	10^3	$n_p/n_n \sim 7$ <i>Energiedichte der Strahlung fällt unter die Energiedichte der Materie</i> Strahlungsdominiert ↑	$5 \cdot 10^8$	
			10^4	
	[Jahre]	Materiedominiert ↓ atomare Bindungsenergie		[eV]
$1.2 \cdot 10^3$	10^5	<i>Abkopplung der Photonen</i> (Rekombination des Wasserstoffs) $H, D, {}^3He, {}^4He, {}^7Li$ Baryonenära	$3.6 \cdot 10^3$	5–10 0.31
10–30	$(1-2) \cdot 10^9$	Galaxienbildung	10^2	10^{-2}
5	$3 \cdot 10^9$	Sternbildung		
	$1,54 \cdot 10^{10}$	Planeten, Gestein	$T_\gamma = 2,75$ $T_\nu = 1,96$ $T_B \simeq 0$	10^{-4}
	$2 \cdot 10^{10}$	heute		

BBN..

Allg. für strahlungsdominiertes Universum: $kT = 1.3 \text{ MeV} / \sqrt{t/\text{sec}}$
ok für $t \lesssim 10^4 \text{ s}$

Anzahldichten für Bosonen (γ) und Fermionen $n, p, e^\pm, \bar{\nu}_e, \dots$ ← Statistik & Boltzmann-Verteilung

$$g^* = \sum g_{\text{Bos.}} + \frac{7}{8} \sum g_{\text{Fermi}}$$

enthält N_ν

$t < 1 \text{ sec}, kT > 1 \text{ MeV}$ ① $\bar{\nu}_e p \leftrightarrow e^+ n$ ② $\nu_e n \leftrightarrow e^- p$ ③ $n \leftrightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

$$n_n/n_p = \exp(-Q/kT) \simeq 1, \quad Q = m_n - m_p = 1.3 \text{ MeV}$$

① ② fallen aus Gleichgewicht, wenn $kT < 0.8 \text{ MeV} \Rightarrow n_n/n_p \rightarrow 1/5, t \approx 1 \text{ sec}$
Neutronenzerfall! $n_n/n_p \rightarrow 1/6 \rightarrow 1/7 \rightarrow \text{"He Masseanteil 25\% ok"}$ ✓

Deuterium: $n + p \leftrightarrow {}^2\text{H} + \gamma + B$, $B = 2.2 \text{ MeV}$ Photodissoziation, solange kT nicht auf $0.05 - 0.1 \text{ MeV}$ gesunken

Helium: ${}^2\text{H} + n \rightarrow {}^3\text{H} + \gamma$
 $+ p \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$

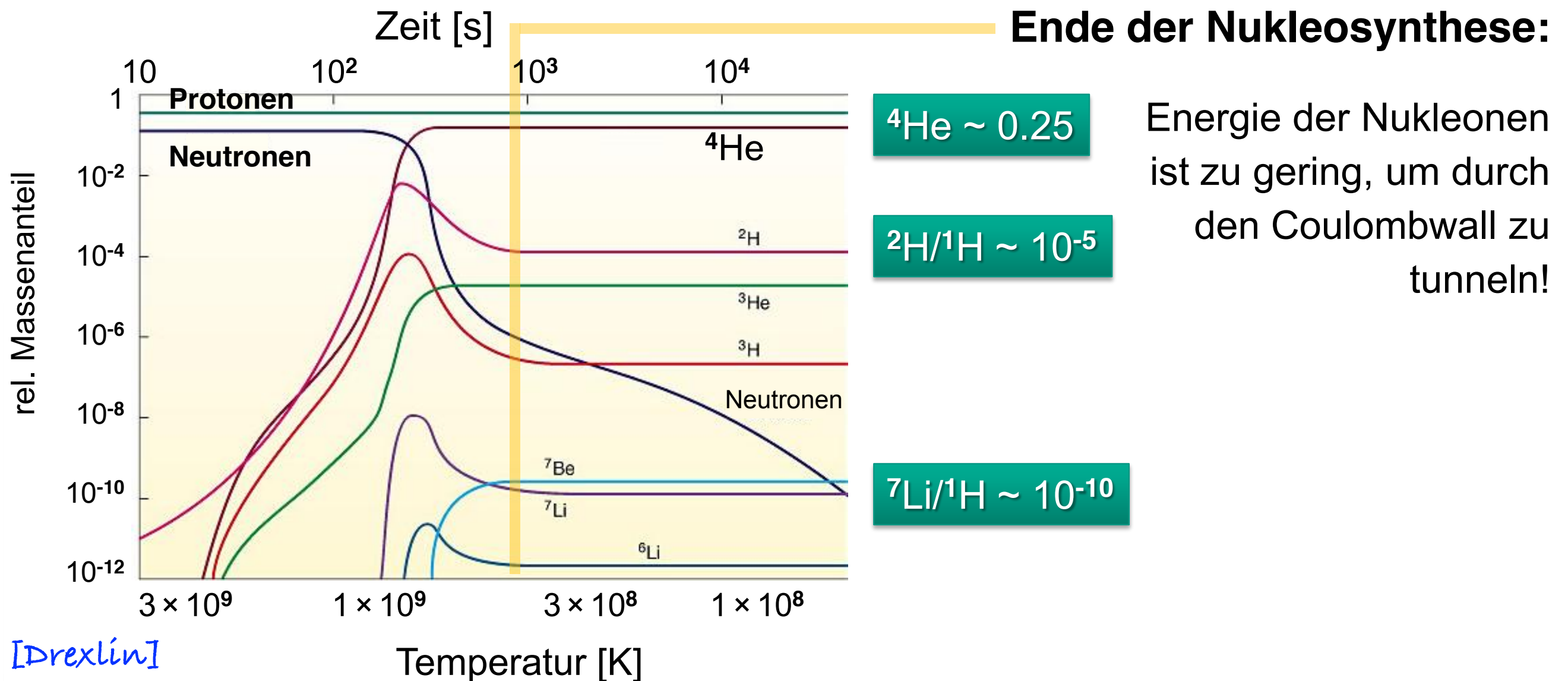
$$\eta = N_{\text{Bar.}}/n_\gamma = 10^{-10}$$

heutiger Wert aus CMB
 $411 \gamma/\text{cm}^3$

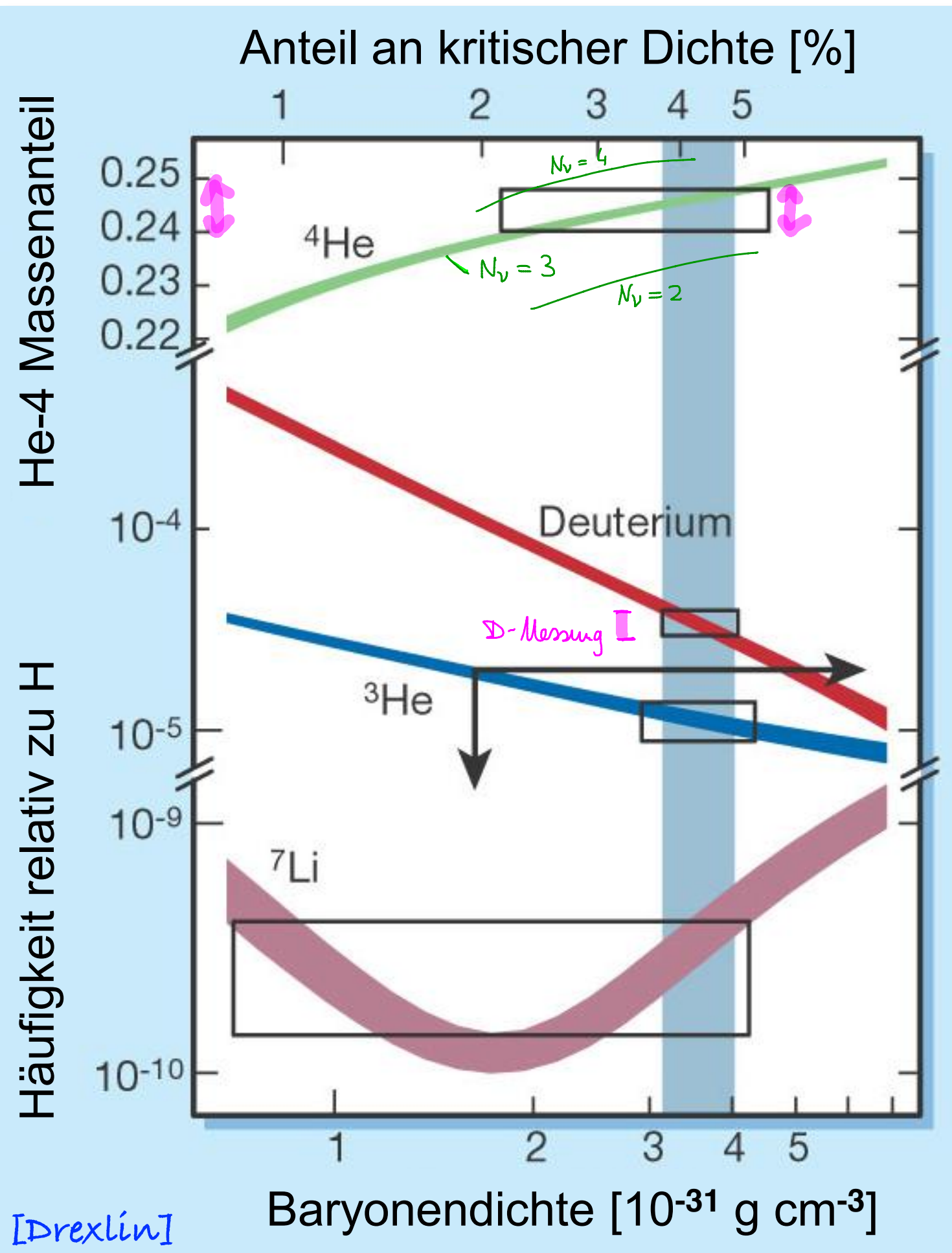
~~A = 5, 8~~, sehr wenig ${}^7\text{Li} \dots$

BBN-Modellrechnungen

BBN wird in **detaillierten Modellrechnungen** untersucht, dabei Variation von Dichte Ω_b der Baryonen, Neutronlebensdauer τ_n , Anzahl N_ν der ν -Generationen dann: Vergleich der Rechnungen mit Beobachtungen

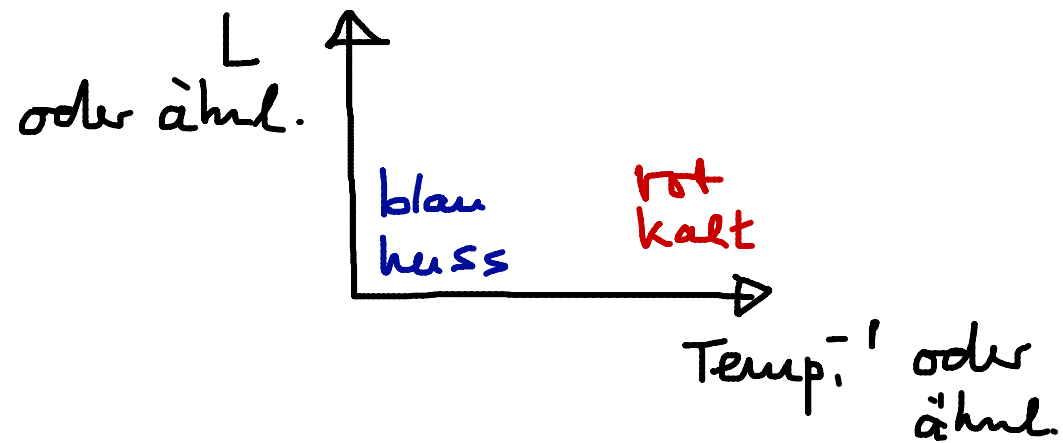


BBN-Resultate



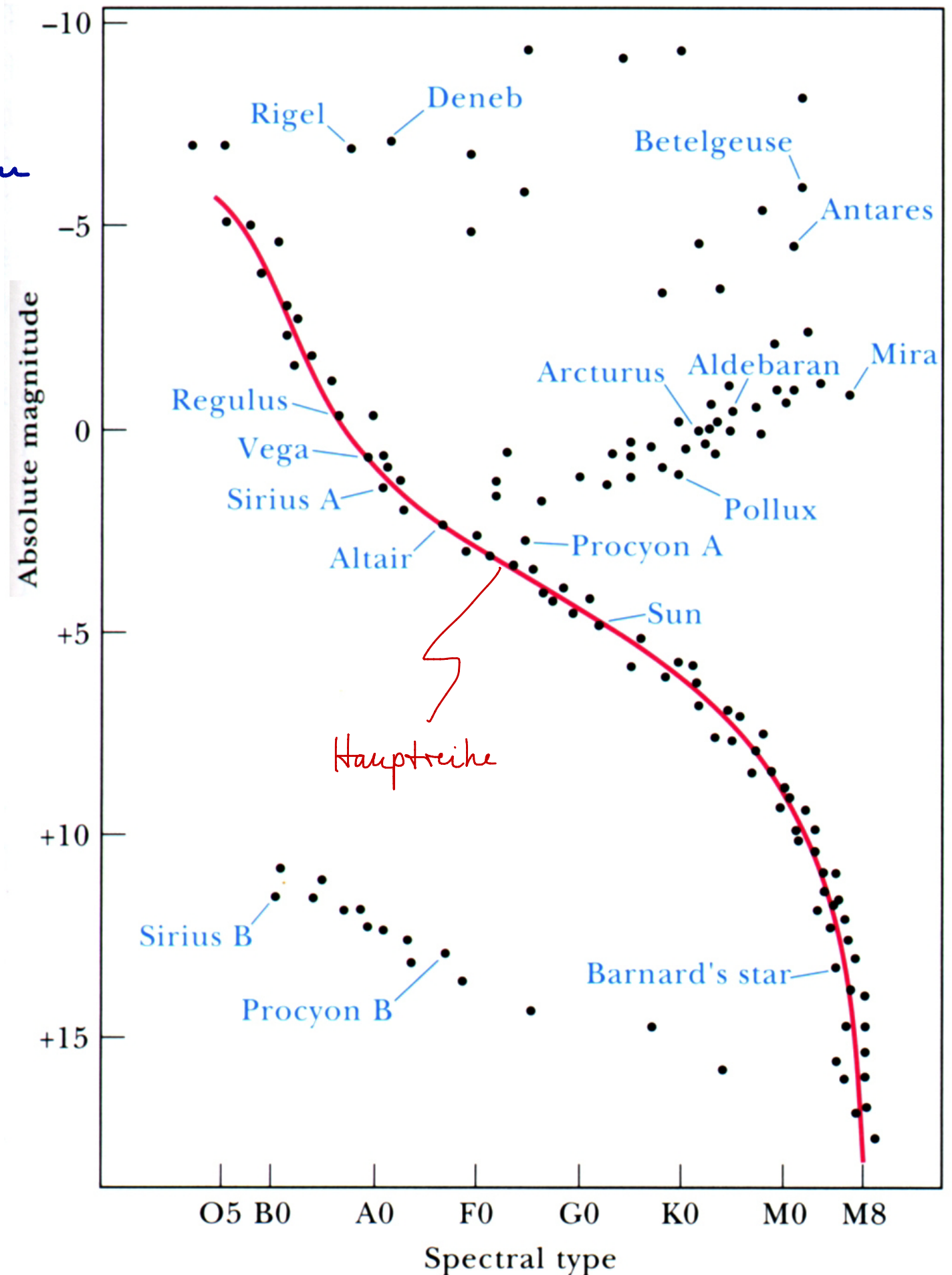
Sternentwicklung

Hertzsprung-Russell-Diagramm



Position eines Sterns
 $= f(M, t, \text{Zus.setzung} \dots)$

Sternhaufen: t gleich für alle Mitglieder, unterschiedl. Masse



Masse – Leuchtkraft – Lebensdauer

Leuchtkraft $\sim M^{3.8}$
(Sonne = 1)

Lebensdauer $\sim M/L$
(Jahre)

