

Die Entstehung der Elemente

Jörn Bleck-Neuhaus

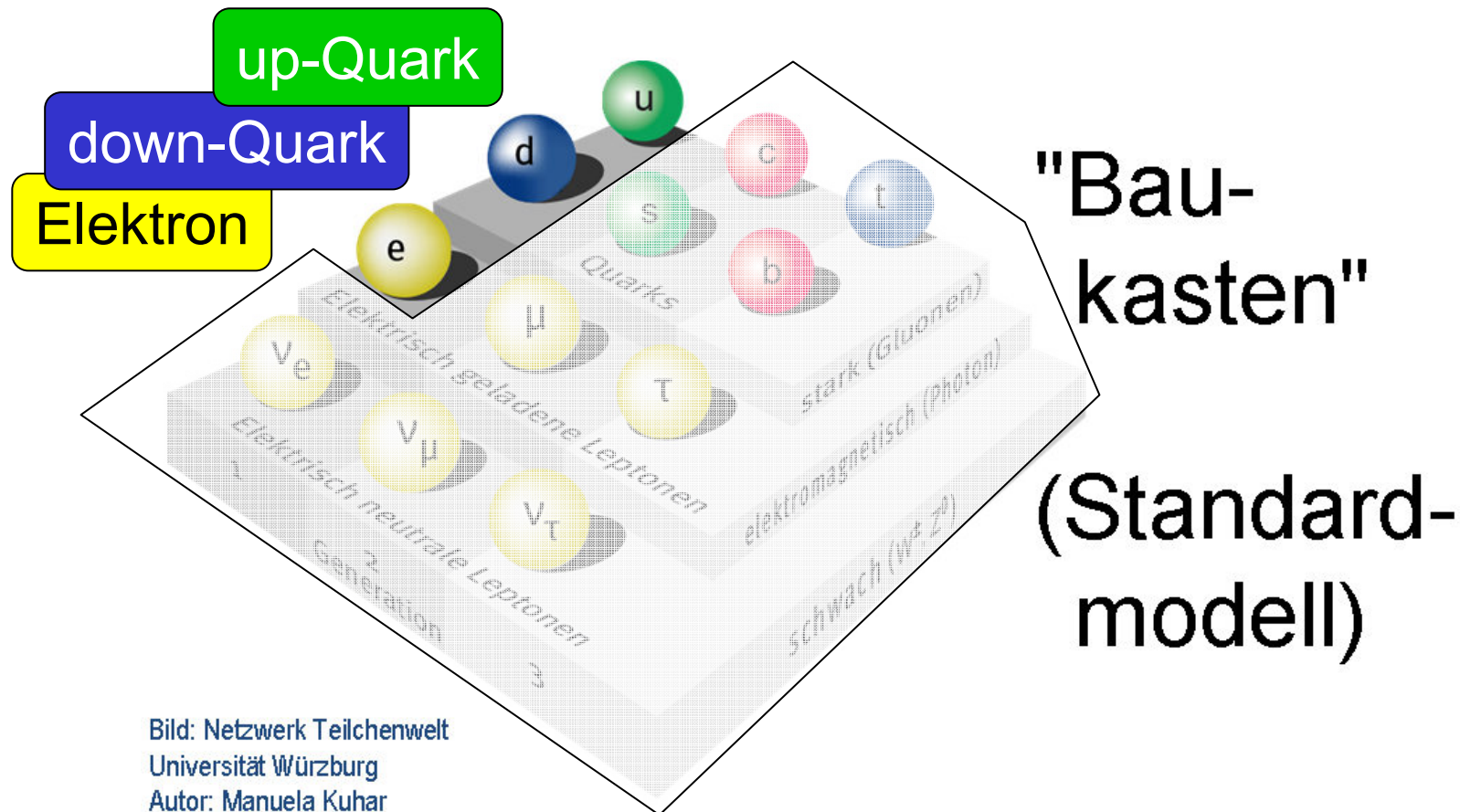
Okt 2014

(Wikipedia)

2

Die Entstehung der Elemente

2. das Material: die fundamentalen Teilchen



Die Entstehung der Elemente

3. der Prozess (von hinten aufgerollt)

= Die Entstehung der **Atome**

Stabile Atome aus Kern und **Elektronen**-Hülle:

- *ab 400.000 Jahre nach dem Urknall (n.d.U.)*

► davor: Die Entstehung der **Atomkerne**

= Nukleosynthese aus Protonen und Neutronen:

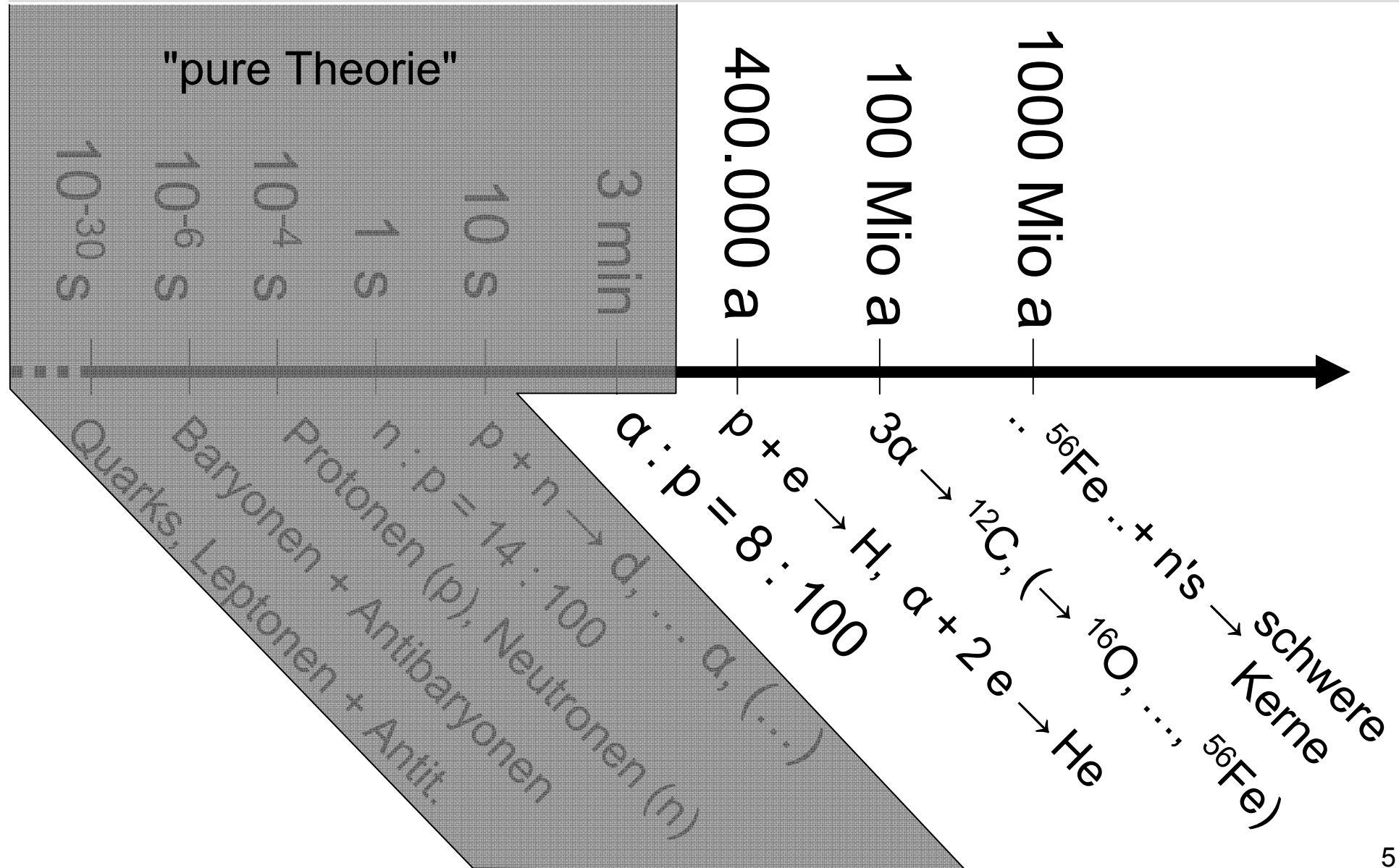
- *ab 10 sec n.d.U.: leichte Kerne (He, Li, Be, B)*
- *ab ca 100 Mio Jahre n.d.U.: schwerere Kerne*

► davor: Entstehung von **Proton und Neutron**

- Baryogenese aus **u- und d-Quarks**, *ab 10^{-4} sec n.d.U.*

Der Prozess im Überblick:

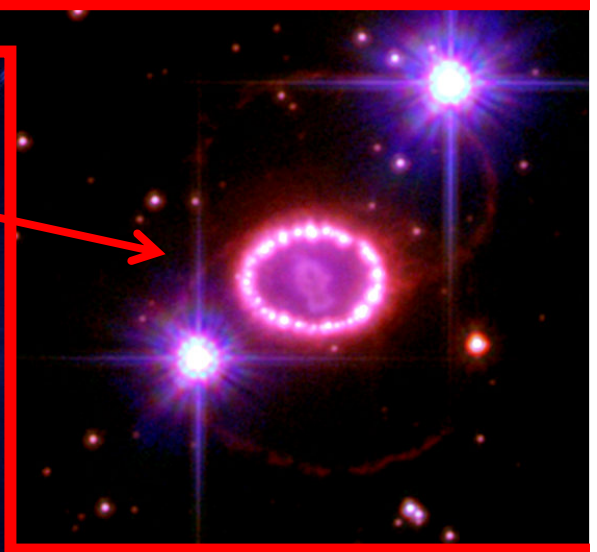
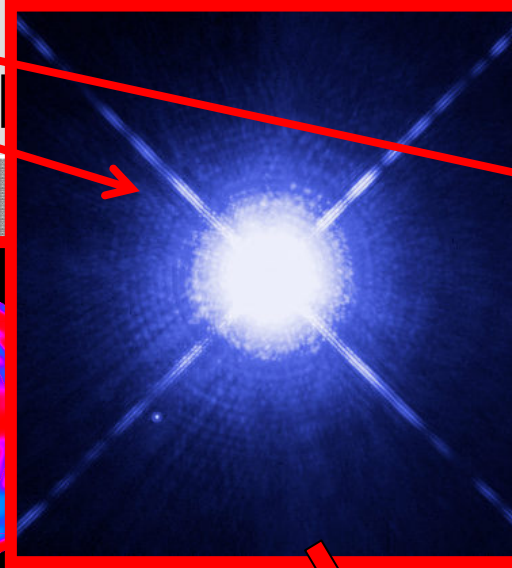
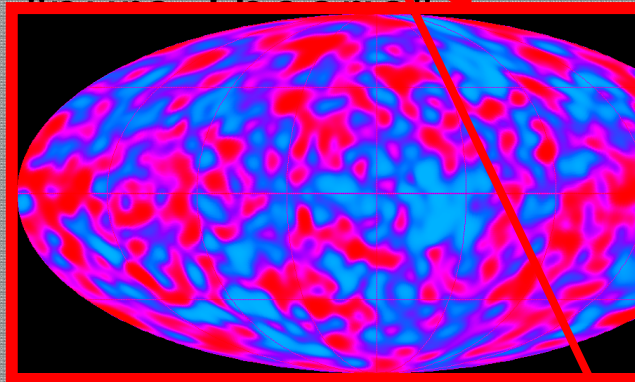
von den Elementarteilchen zu den schwersten Atomen



Beobachtungen

Urknall

10^{-30} s



$\alpha : p = 8 : 100$

$p + e \rightarrow H$, $\alpha + 2e \rightarrow He$
 $3\alpha \rightarrow {}^{12}C$, $\dots {}^{56}Fe \dots + n's \rightarrow \text{Schwere Kerne}$
 $\dots {}^{56}Fe \dots \rightarrow {}^{16}O, \dots, {}^{56}Fe$

Quarks, Leptonen + Antileptonen
 Baryonen + Antibaryonen
 $n : p = 14 : 100$
 $p + n \rightarrow d, \dots \alpha, (\dots)$

Die Entstehung der Elemente

Gliederung

1. Überblick
2. Exkurs: Der *Begriff* Element
3. Isotope und deren Häufigkeit
4. Baryogenese : p , n
5. Primordiale Nukleosynthese: H, He
6. Stellare Nukleosynthese: C, .. Fe, .. U, ..
7. Transurane: Pu, ... Uuo
8. Die leichten Elemente Li, Be, B

Exkurs:

Der *Begriff* "Element" –

ein historisches Missverständnis

?

Exkurs:

Der *Begriff* "Element" –

Können denn

Elemente

entstehen

?

Exkurs:

Der *Begriff* "Element" –

- ist seit dem Altertum in Gebrauch,
- um in einer unüberschaubaren Vielfalt von Phänomenen nach Strukturen zu suchen,
- hier konkret: Suche nach Strukturen in der
 - Vielfalt der uns umgebenden Stoffe und
 - ihrer Arten von Umwandlungen und Reaktionen

Robert Boyle (1621-1691)

(The Sceptical Chymist, 1661, frei übersetzt)



"Unter Elementen verstehen wir

- vollkommen ungemischte Stoffe,
- die nicht aus anderen Stoffen bestehen,
- die die Zutaten bilden, aus denen alle realen, gemischten Stoffe zusammengesetzt sind,
- und zu denen diese letztlich wieder aufgelöst werden können."

klingt modern, aber: gemeint ist hier der Elementbegriff der Alchemie: *Hitze, Wässerigkeit, Luftigkeit, Festigkeit, (...)*

(weiter Boyle:) "Ob es diese Elemente aber als Stoffe gibt, die zuverlässig in allen wirklichen Stoffen vorkommen, das möchte ich bezweifeln."

Robert Boyle (1621-1691)

(The Sceptical Chymist, 1661, frei übersetzt)



Alternative Idee:
***Materie besteht aus
gleichen Teilchen***

Zitat: "Die Verschiedenheit der Stoffe
kann von der bloßen
Verschiedenheit der Struktur
herrühren,
wie die **kleinen Teilchen**
sich voneinander lösen
oder aufeinander wirken
oder nach dieser oder jener Art
miteinander verbunden werden."

Klingt (und ist)
modern!

Die Zeitgenossen:
"Spekulation !"
"Metaphysik !"

Antoine de Lavoisier (1743-1794)

"Traité élémentaire de chimie" (1789, frei

Marie-
Anne

*Grundsatz: "Keine Metaphysik!
Nur die Beobachtungen zählen!"*

"Als Elemente sollen wir die letzten Bestandteile bezeichnen, zu denen unsere Analyse hinführt."

"d.h. Elemente sind die einfachsten Substanzen, in die wir einen Stoff zerlegen können
- unter Einsatz aller (z.Zt!) bekannten Mittel."

Eine strikt operationelle Definition

und noch schärfer: "Diese Substanzen könnten selbst noch zusammengesetzt sein. Aber solange wir nicht die Mittel entdeckt haben, sie weiter zu zerlegen, treten sie als Elemente auf."



John Dalton (1766 – 1844)

"New System of Chemical Philosophy" 1803/08



begründet die heutigen und wohl bleibenden Definitionen von "Atom" und (chem.) "Element"

"Alle Änderungen¹⁾ der Stoffe bestehen in der Trennung von Atomen, die vorher verbunden, und in der Vereinigung solcher, die vorher getrennt waren"

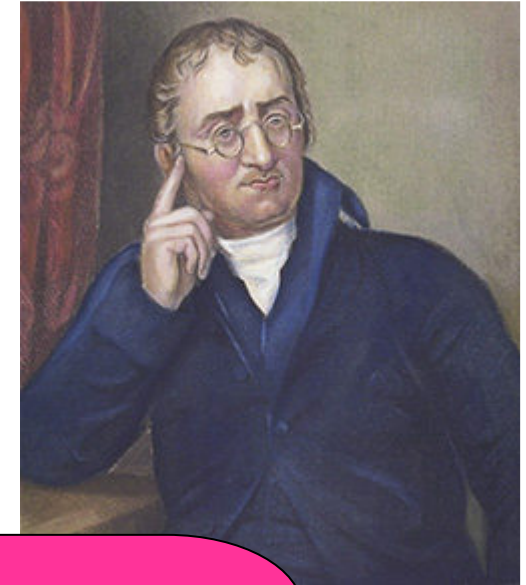
¹⁾ sofern herbeigeführt im Rahmen der damaligen Möglichkeiten

"Die Atome eines Elements: unveränderlich,
völlig gleich in Gewicht, Gestalt..."

(frei übersetzt)

John Dalton (1766 – 1844)

"New System of Chemical Philosophy" 1803/08



begründet die heutigen und wohl bleibenden Definitionen von "Atom" und (chem.) "Element"

"Alle Änderungen¹⁾ der Trennung von Atomen und in der Vereinigung

getrennt waren"

können also auch nicht „entstehen“

¹⁾ sofern herbeigeführt im Rahmen der damaligen Möglichkeiten

"Die Atome eines Elements: unveränderlich, völlig gleich in Gewicht, Gestalt..."

(frei übersetzt)

John Dalton (1766 – 1844)

"New System of Chemical Philosophy" 1803/08



begründet die heutigen und wohl bleibenden Definitionen von "Atom" und (chem.) "Element"

"Alle Änderungen¹⁾ der Stoffe bestehen in der Trennung von Atomen und in der Vereinigung von Atomen, und in der Veränderung der Gewichte der Atome."

¹⁾ sofern herbeigeführt im Rahmen der damaligen Möglichkeiten

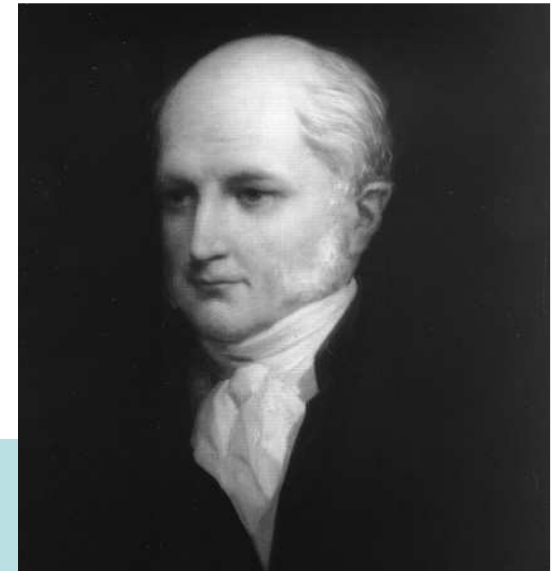
fruchtbarer
neuer Begriff:
Atomgewicht

"Die Atome eines Elements: unveränderlich,
völlig gleich in Gewicht, Gestalt..."

(frei übersetzt)

William Prout (1785 – 1850)

"On the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms." (1815)



Hypothese:

Alle Atome bestehen aus Wasserstoffatomen

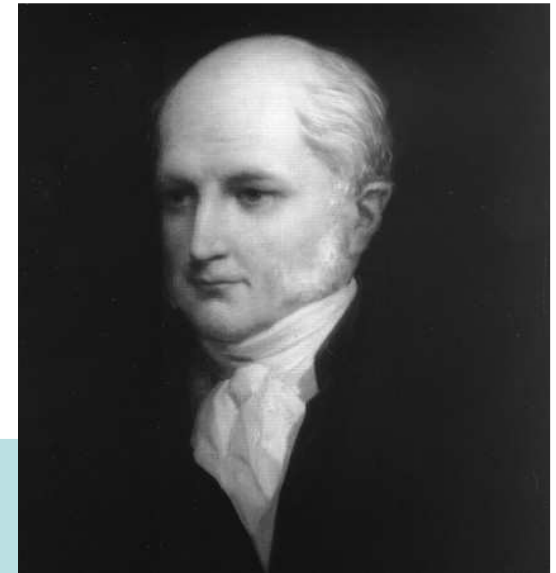
Begründung:

Alle Atomgewichte sind ganze Zahlen

► erste Idee zur Entstehung der Elemente

William Prout (1785 – 1850)

"On the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms." (1815)



Hypothese:

Alle Atome bestehen aus Wasserstoffatomen

Begründung:

Alle Atomgewichte sind ~~ganze~~ Zahlen

► erste Idee zur Entstehung der Elemente

Falsch.

Doch gab es jahrzehntelange Bemühungen, die (ungenauen) Messergebnisse so zu deuten.

Erfolg: Die Chemischen Elemente

Das Periodensystem heute:

Periode	1	1																18																																																																																																																																																																																																																																																																															
	1	1 H Wasserstoff 1,0079 1																2 He Helium 4,0026 2																																																																																																																																																																																																																																																																															
	2	3 Li Lithium 6,941 2,1																4 Be Beryllium 9,0122 2/2																5 B Bor 10,811 2/3																6 C Kohlenstoff 12,011 2/4																7 N Stickstoff 14,007 2/5																8 O Sauerstoff 15,999 2/6																9 F Fluor 18,988 2/7																10 Ne Neon 20,180 2/8																																																																																																																																																																															
	3	11 Na Natrium 22,990 2/8/1																12 Mg Magnesium 24,305 2/8/2																13 Al Aluminium 26,982 2/8/3																14 Si Silizium 28,086 2/8/4																15 P Phosphor 30,974 2/8/5																16 S Schwefel 32,065 2/8/6																17 Cl Chlor 35,453 2/8/7																18 Ar Argon 39,648 2/8/8																																																																																																																																																																															
	4	19 K Kalium 39,098 2/8/8/1																20 Ca Calcium 40,078 2/8/8/2																21 Sc Scandium 44,956 2/8/8/2																22 Ti Titan 47,867 2/8/10/2																23 V Vanadium 50,942 2/8/11/2																24 Cr Chrom 51,996 2/8/13/1																25 Mn Mangan 54,938 2/8/13/2																26 Fe Eisen 55,845 2/8/14/2																27 Co Cobalt 58,933 2/8/15/2																28 Ni Nickel 58,693 2/8/16/2																29 Cu Kupfer 63,546 2/8/18/1																30 Zn Zink 65,38 2/8/18/2																31 Ga Gallium 69,723 2/8/18/3																32 Ge Germanium 72,64 2/8/18/4																33 As Arsen 74,922 2/8/18/5																34 Se Selen 78,96 2/8/18/6																35 Br Brom 79,904 2/8/18/7																36 Kr Krypton 83,798 2/8/18/8															
	5	37 Rb Rubidium 85,468 2/8/18/8/1																38 Sr Strontium 87,62 2/8/18/8/2																39 Y Yttrium 88,906 2/8/18/9/2																40 Zr Zirkonium 91,224 2/8/18/10/2																41 Nb Niob 92,906 2/8/18/12/1																42 Mo Molybdän 95,96 2/8/18/13/1																43 Tc Technetium 98,91 2/8/18/13/2																44 Ru Ruthenium 101,07 2/8/18/15/1																45 Rh Rhodium 102,91 2/8/18/16/1																46 Pd Palladium 106,42 2/8/18/18																47 Ag Silber 107,87 2/8/18/18/1																48 Cd Cadmium 112,41 2/8/18/18/2																49 In Indium 114,82 2/8/18/18/3																50 Sn Zinn 118,71 2/8/18/18/4																51 Sb Antimon 121,76 2/8/18/18/5																52 Te Tellur 127,60 2/8/18/18/6																53 I Jod 126,90 2/8/18/18/7																54 Xe Xenon 131,29 2/8/18/18/8															
	6	55 Cs Cäsium 132,91 2/8/18/18/8/1																56 Ba Barium 137,33 2/8/18/18/8/2																57-71 siehe unten																72 Hf Hafnium 178,49 2/8/18/32/10/2																73 Ta Tantal 180,95 2/8/18/32/11/2																74 W Wolfram 183,84 2/8/18/32/12/2																75 Re Rhenium 186,21 2/8/18/32/13/2																76 Os Osmium 190,23 2/8/18/32/14/2																77 Ir Iridium 192,22 2/8/18/32/15/2																78 Pt Platin 195,08 2/8/18/32/17/1																79 Au Gold 196,97 2/8/18/32/18/1																80 Hg Quecksilber 200,59 2/8/18/32/18/2																81 Tl Thallium 204,38 2/8/18/32/18/3																82 Pb Blei 207,2 2/8/18/32/18/4																83 Bi Bismut 208,98 2/8/18/32/18/5																84 Po Polonium 209,98 2/8/18/32/18/6																85 At Astat (210) 2/8/18/32/18/7																86 Rn Radon (222) 2/8/18/32/18/8															
	7	87 Fr Francium (223) 2/8/18/32/18/8/1																88 Ra Radium 226,03 2/8/18/32/18/8/2																89-103 siehe unten																104 Rf Rutherfordium (261) 2/8/18/32/32/10/2																105 Db Dubnium (262) 2/8/18/32/32/11/2																106 Sg Seaborgium (263) 2/8/18/32/32/12/2																107 Bh Bohrium (264) 2/8/18/32/32/13/2																108 Hs Hassium (265) 2/8/18/32/32/14/2																109 Mt Meitnerium (266) 2/8/18/32/32/15/2																110 Ds Darmstadtium (269) 2/8/18/32/32/17/1																111 Rg Roentgenium (272) 2/8/18/32/32/18/1																112 Cn Copernicium (277) 2/8/18/32/32/18/2																113 Uut Ununtrium (287) 2/8/18/32/32/18/3																114 Fl Flerovium (289) 2/8/18/32/32/18/4																115 Uup Ununpentium (288) 2/8/18/32/32/18/5																116 Lv Livermorium (293) 2/8/18/32/32/18/6																117 Uus Ununseptium (293) 2/8/18/32/32/18/7																118 Uuo Ununoctium (294) 2/8/18/32/32/18/8															

[illegible]

Das erfolgreiche "Standardmodell" der Chemie (~1900)

Unzählig viele Stoffe und Vorgänge erklärt durch

92 elementare Arten von Materie

soll heißen:

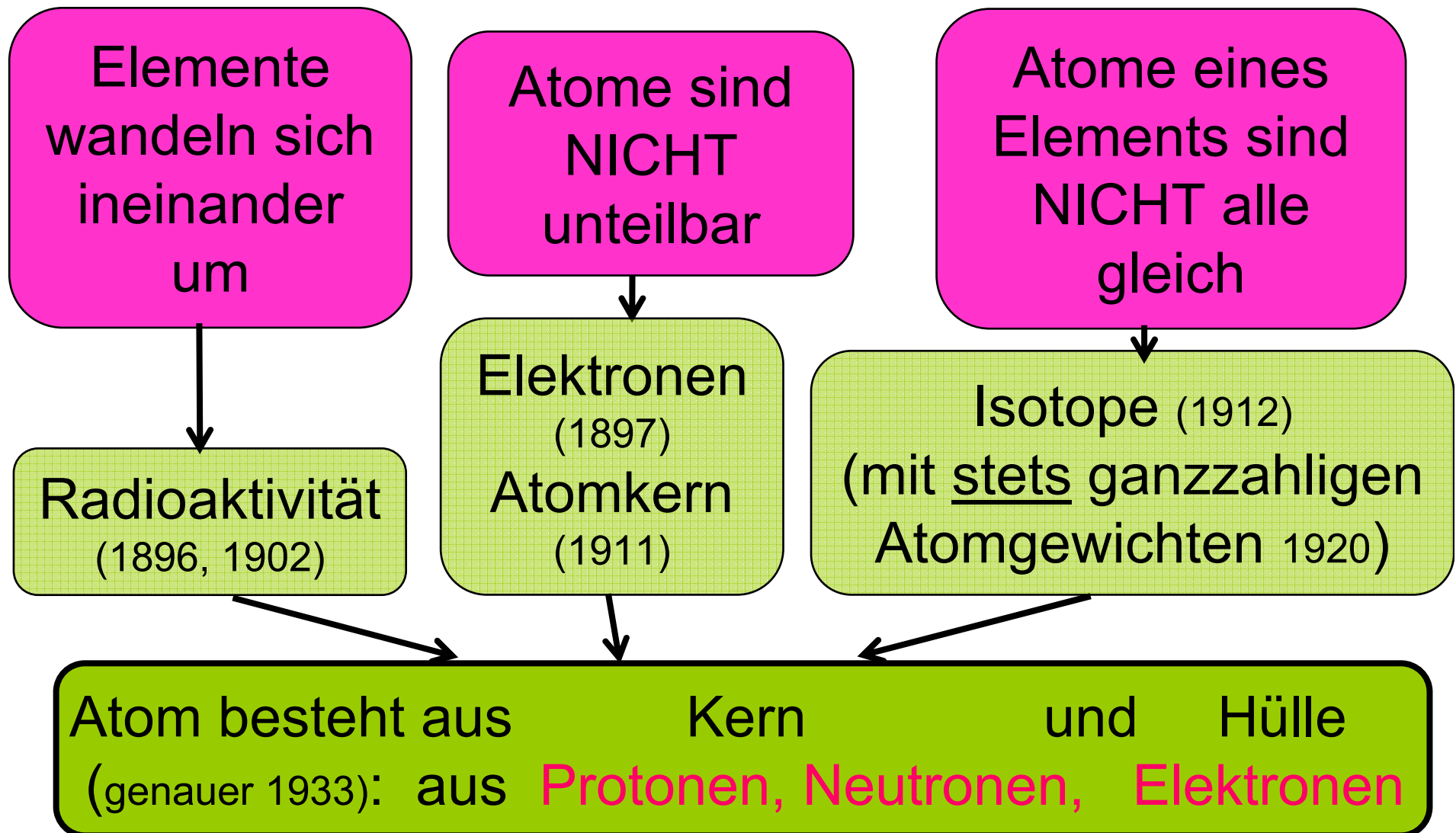
92 grundlegend verschiedene Materietypen
(auf keine Weise ineinander umzuwandeln)

Schönheitsfehler aus der Sicht von Physik
und Philosophie (seit altersher):

Der letzte Grundstoff aller Materie
sollte von einheitlicher Art sein

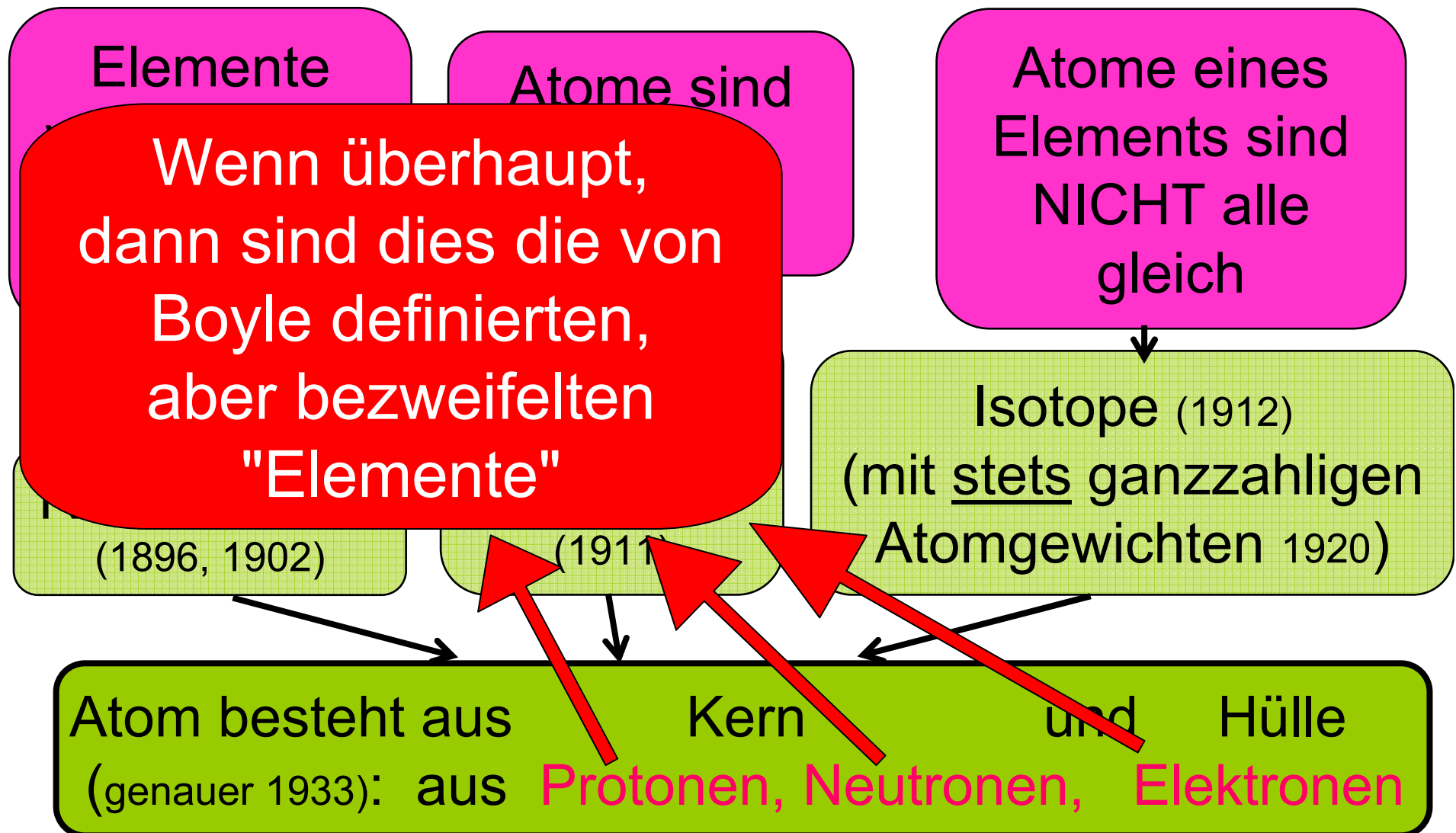
Konkrete Komplikationen

(aus der Physik, 100 Jahre nach Dalton)



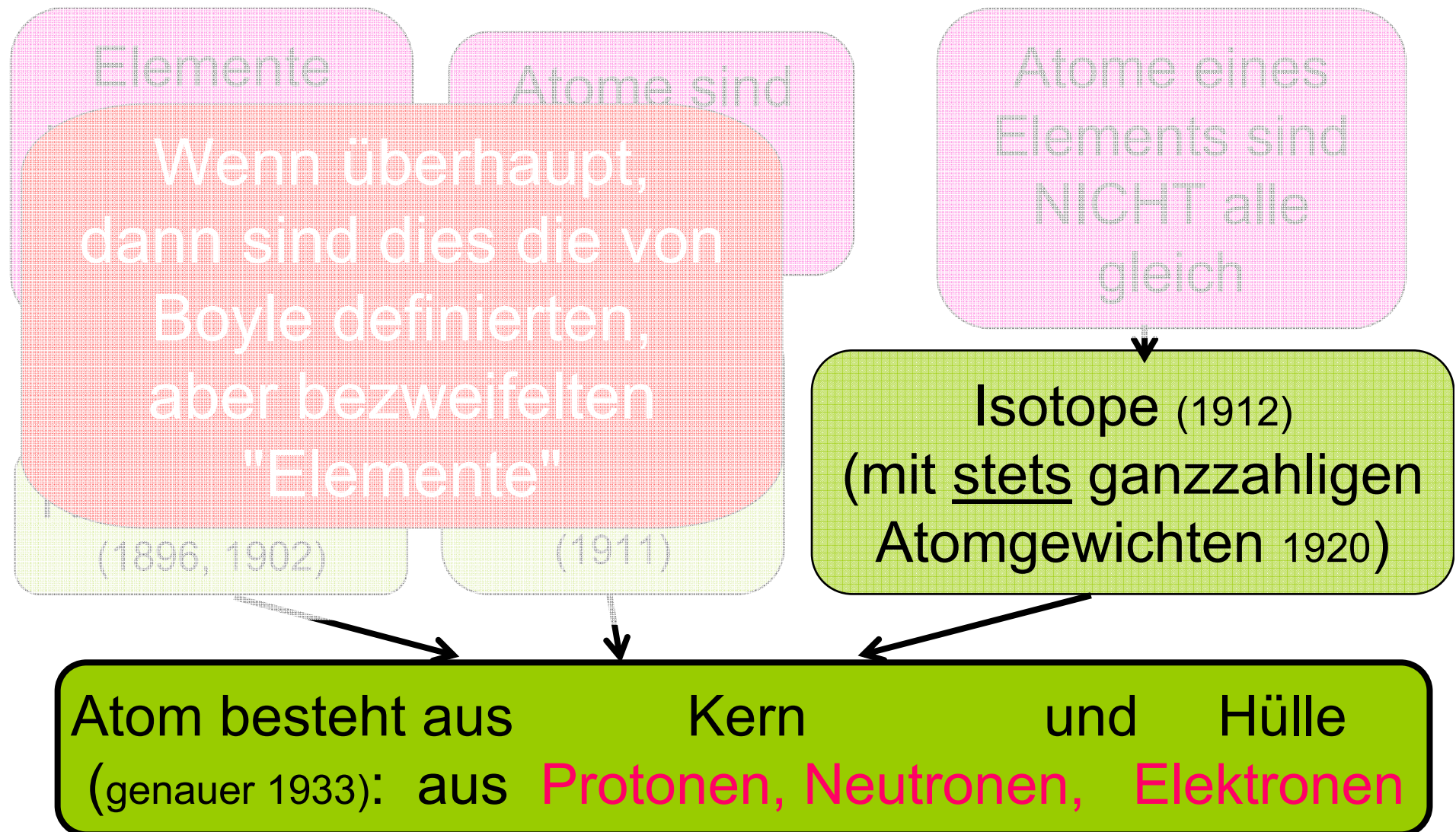
Konkrete Komplikationen

(aus der Physik, 100 Jahre nach Dalton)

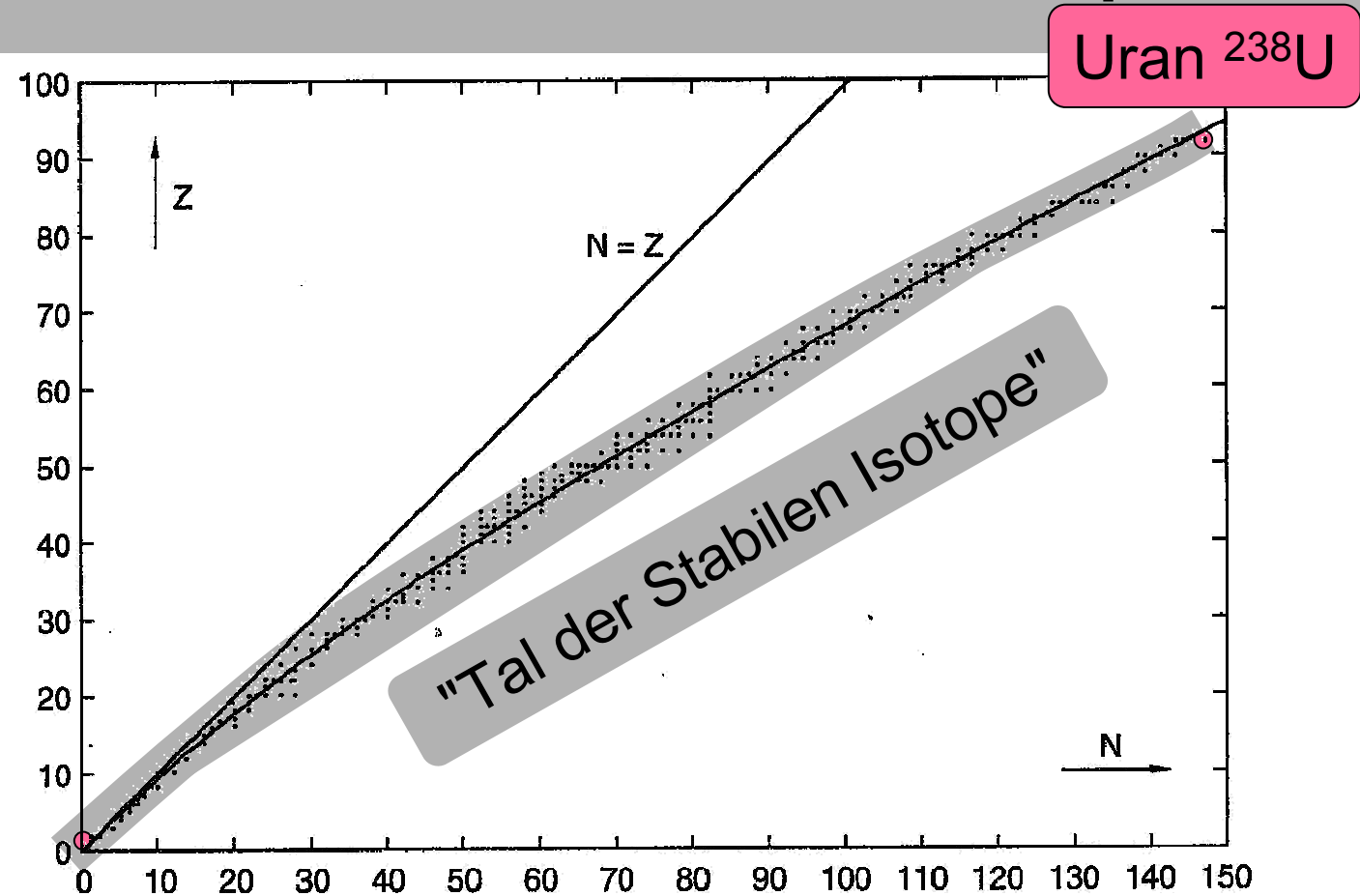


Konkrete Komplikationen

(aus der Physik, 100 Jahre nach Dalton)



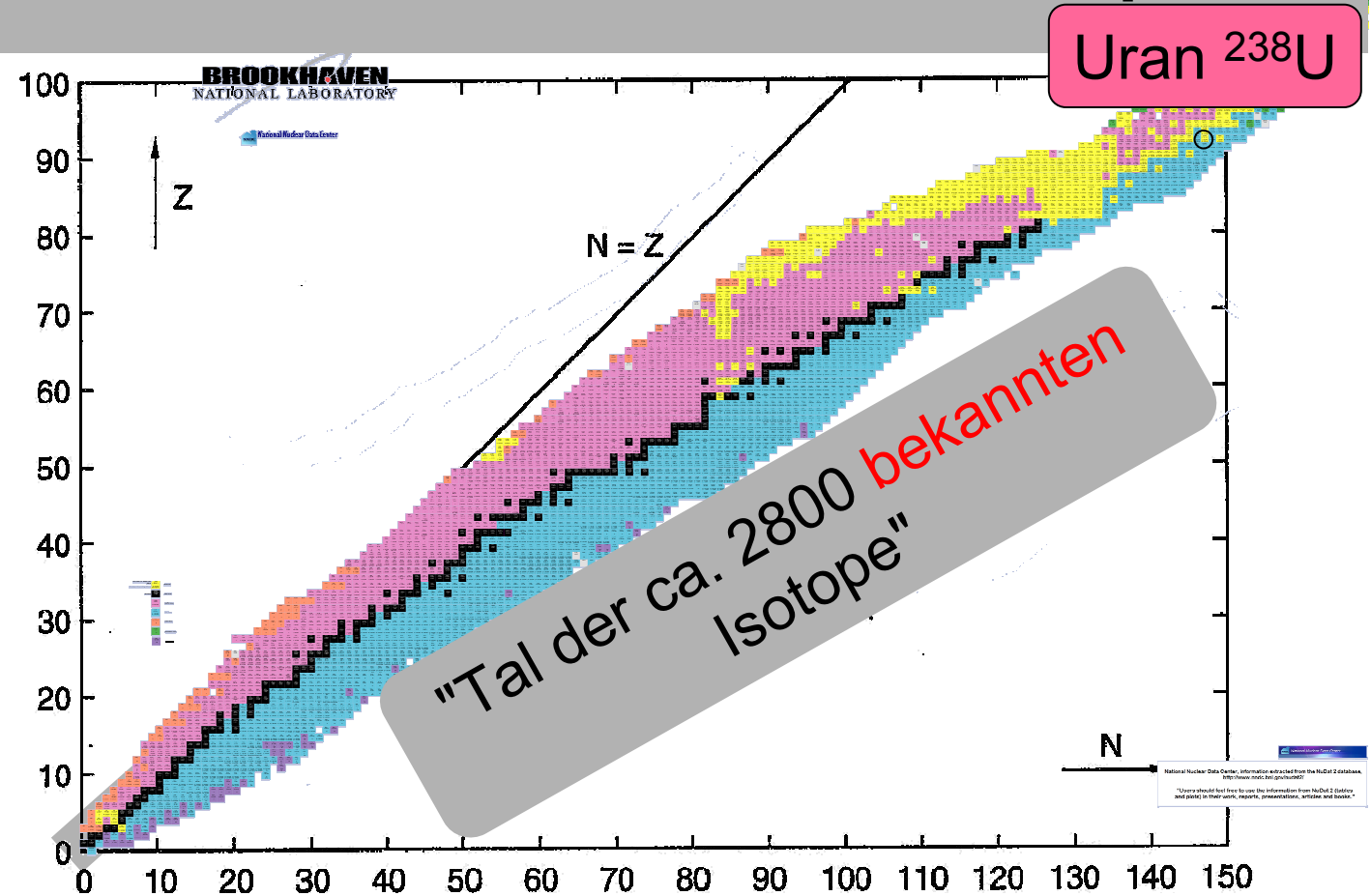
Die ca. 250 natürlichen Isotope



Wasserstoff ^1H

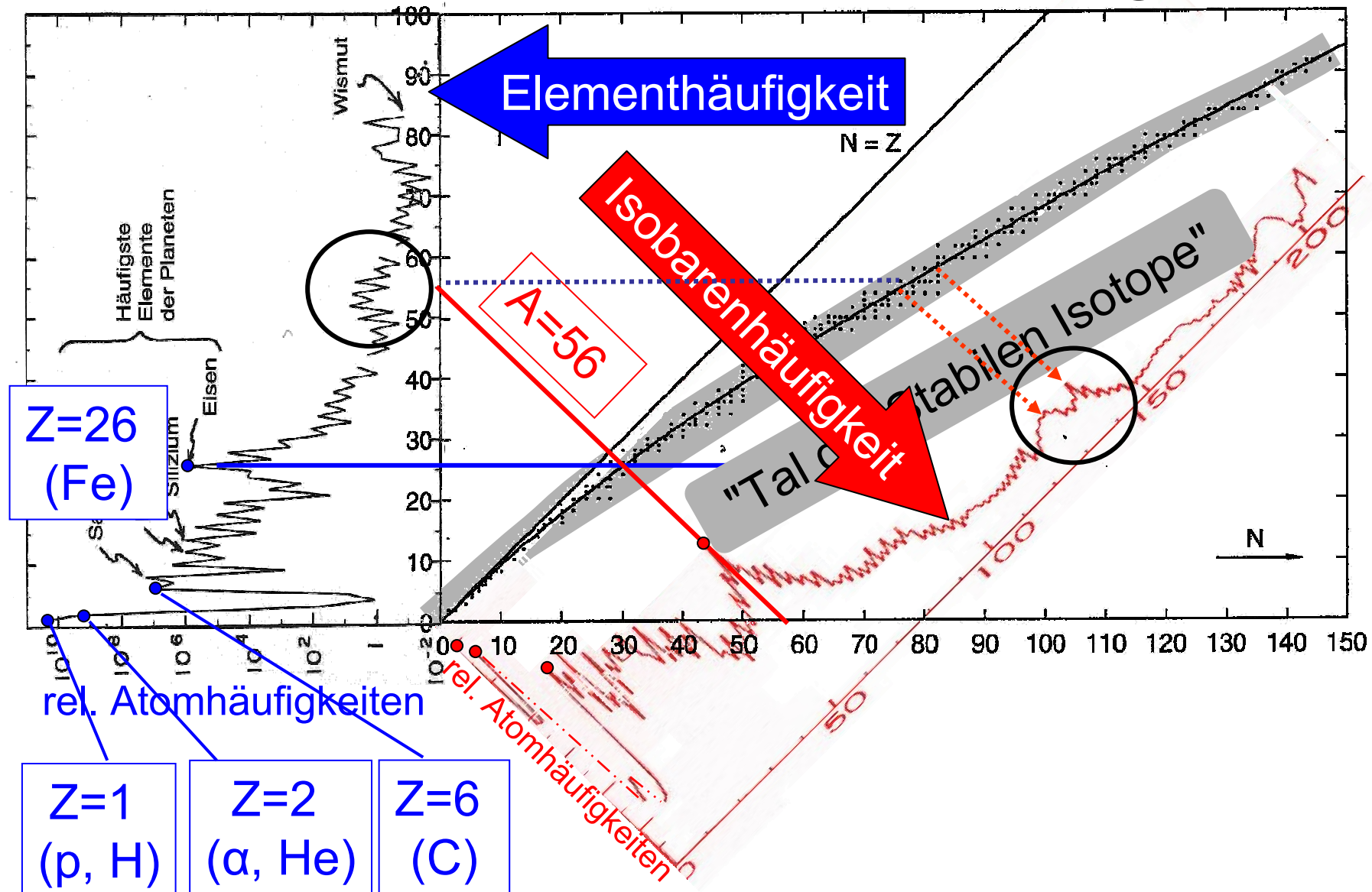
Uran ^{238}U

Die ca. 2800 bekannten Isotope

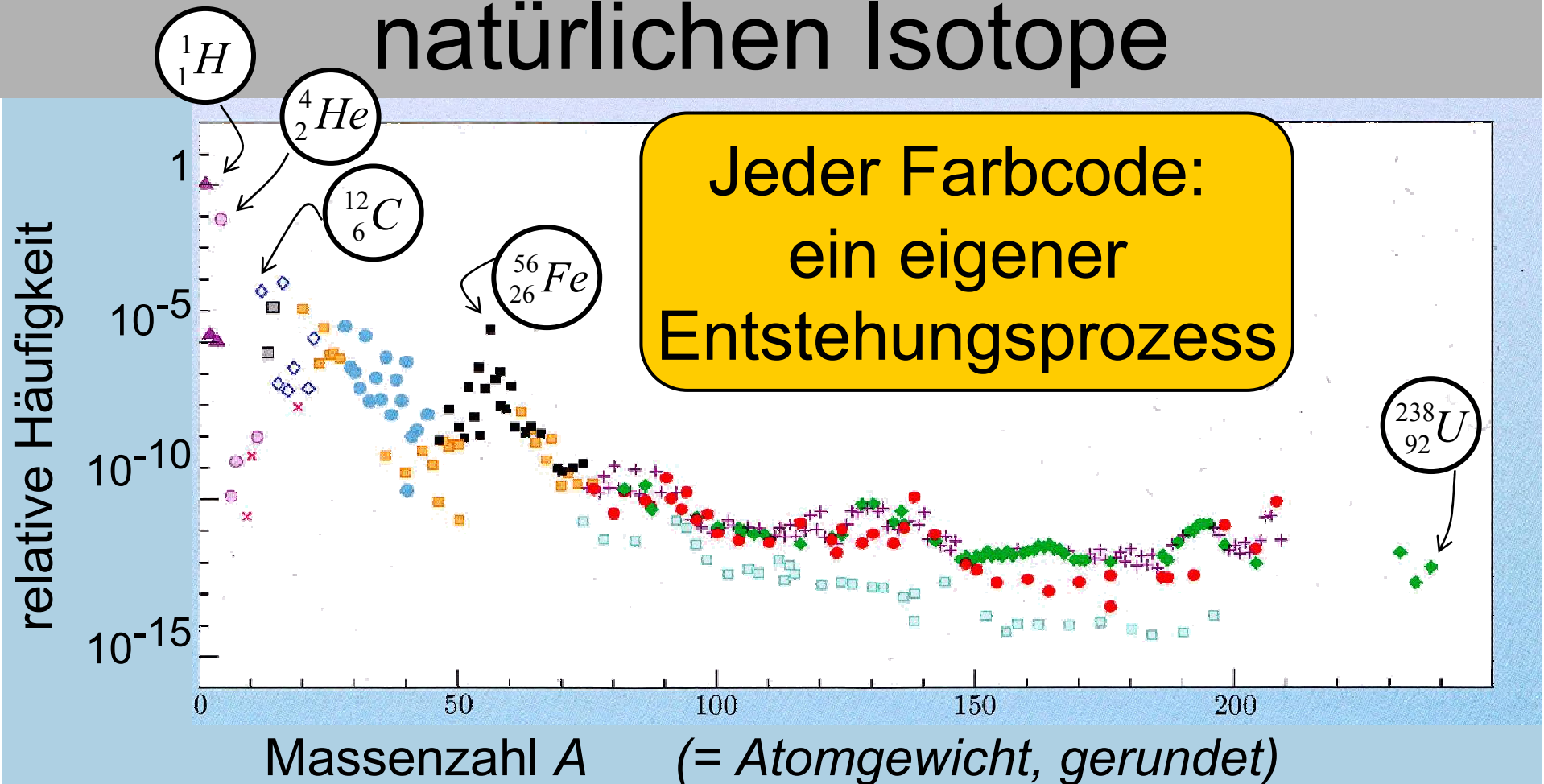


Wasserstoff ^1H

Schlüssel zum Entstehungsprozess: Element- und Isobarenhäufigkeiten



Genaueste Aufstellung: Die Häufigkeiten der ca. 250 natürlichen Isotope



4. Entstehung beginnt mit der Baryogenese (kurz)

Quark-Gluon-Plasma:

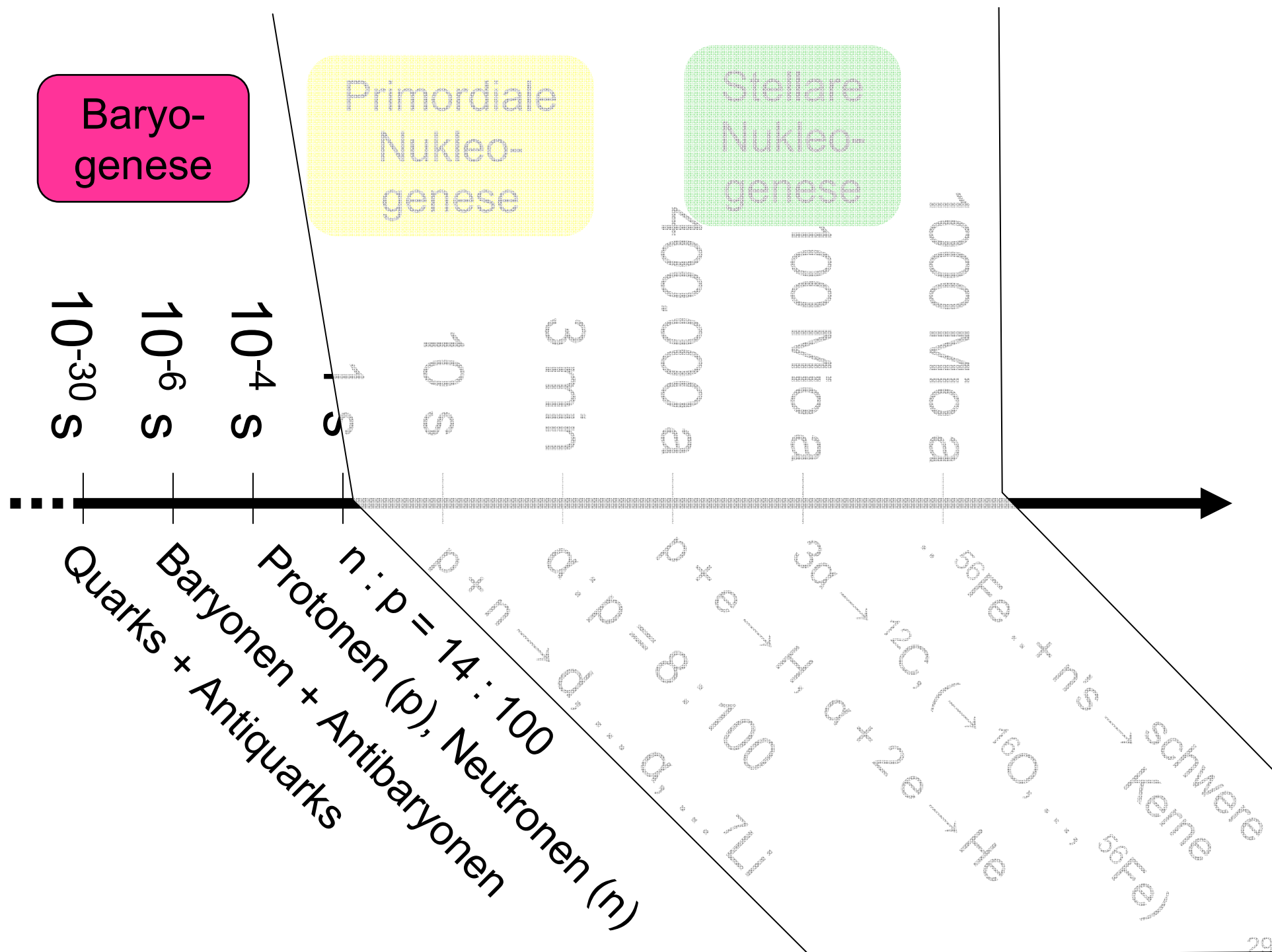
Quarks u, d, s, c, b, t (*up, down, ...*)

Gluonen g



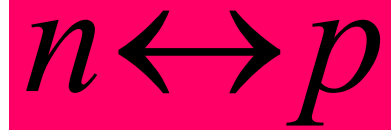
Starke Wechselwirkung

- Proton $p : 2 u + 1 d \rightarrow p$
- Neutron $n : 1 u + 2 d \rightarrow n$



Ende der Baryogenese 3 sec n.d.U.:

Protonen und Neutronen im thermodynamischen Gleichgewicht



Reaktionen:



Voraussetzung:

$$T \gtrsim 10^{10} \text{ K} \quad (kT > 1 \text{ MeV}, \quad \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-)$$

Konzentrationsverhältnis = Boltzmannfaktor:

$$n : p = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad \Delta E = 1,29 \text{ MeV}$$

Gleichgewicht friert ein mit dem Wert bei

$$T \approx 7,5 \cdot 10^9 \text{ K} \Rightarrow$$

$$n : p = 14 : 100$$

Baryo-
genese

Primordiale
Nukleo-
genese

Stellare
Nukleo-
genese

Ende der Vorherrschaft der
Starken Wechselwirkung

30 s

6 s

4 s

1 s

s

min

400.000 a

100 Mio a

1000 Mio a

Quarks + Antiquarks

Baryonen + Antibaryonen

Protonen (p), Neutronen (n)

$n : p = 14 : 100$

$p + n$

$\alpha : p = 8 : 100$

$p + e \rightarrow d, \dots \alpha, \dots {}^7\text{Li}$

3α

$\rightarrow \text{H}, \alpha + 2e \rightarrow \text{He}$

$\dots {}^{56}\text{Fe} \dots + n's \rightarrow \text{schwere Kerne}$

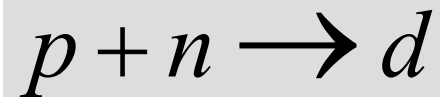
$\dots {}^{12}\text{C}, (\rightarrow {}^{16}\text{O}, \dots, {}^{56}\text{Fe})$

5. Primordiale Nukleogenese

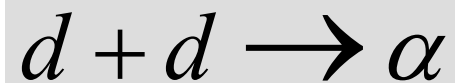
Ausgangspunkt:

$$n : p = 14 : 100$$

Reaktionen:
(Auswahl)



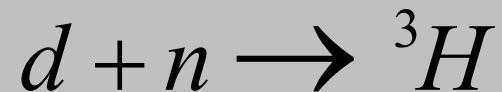
$$d : p = 14 : 86$$



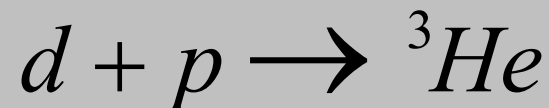
$$\alpha : p = 7 : 86 = 8 : 100$$

ferner:

(Auswahl)



$$\propto 10^{-4}$$



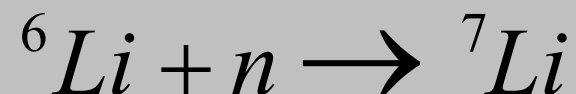
$$\propto 10^{-6}$$



$$\propto 10^{-10}$$



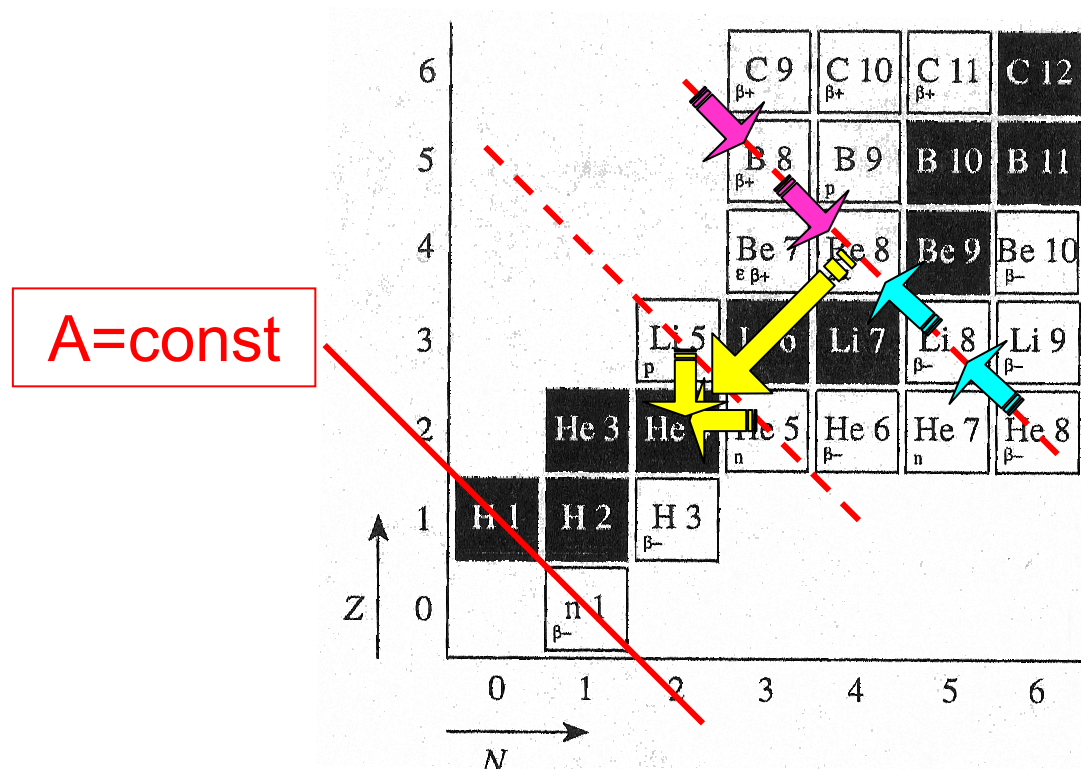
$$\propto 10^{-10}$$



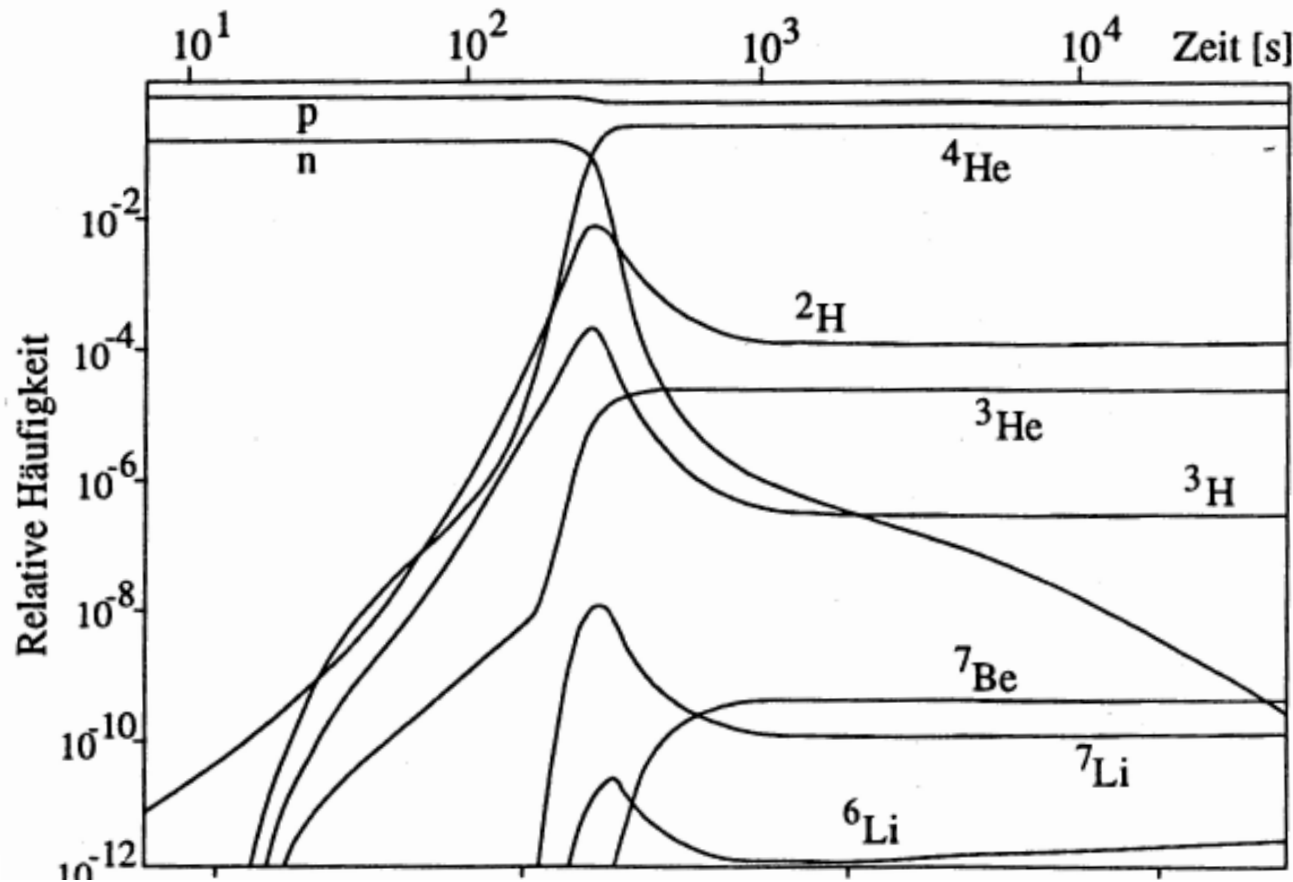
$$\propto 10^{-12}$$

Abbruch der primordialen Nukleosynthese durch Abspaltung von α -Teilchen

nochmal: die Isotopenkarte



für Details: Zeitverlauf der primordialen Nuklearsynthese



Temp: $3 \cdot 10^9 \text{K} \rightarrow 10^9 \text{K} \rightarrow 3 \cdot 10^8 \text{K} \rightarrow 10^8 \text{K}$

(E_{therm} : $300 \text{ keV} \rightarrow 100 \text{ keV} \rightarrow 30 \text{ keV} \rightarrow 10 \text{ keV}$)

(Dichte: $5 \text{ kg/ml} \rightarrow 5 \text{ g/ml} \rightarrow 5 \text{ mg/ml}$)

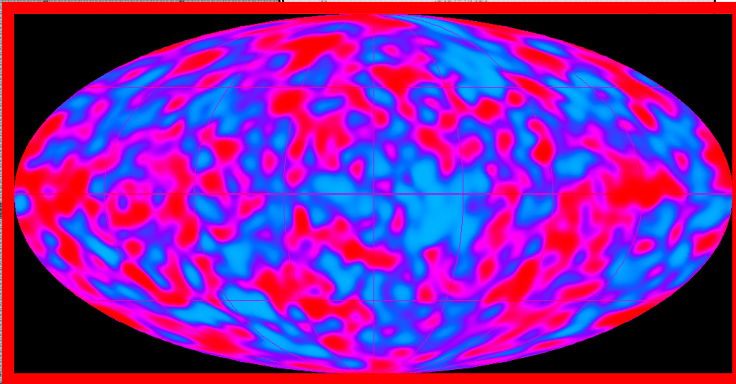
5a. Bildung von Atomen

„Rekombination“:

Dauerhafter Einfang von Elektronen
nach Abfall der Temperatur auf
ca. 3000 K
(Dichte ca. 10^{-21} g/ml)

"Rekombinationsepoche"

Ende der Vorherrschaft
der
Starken Wechselwirkung



400.000 a

Ende der Vorherrschaft der
elektromagnetischen Wechselwirkung:

- Das Universum wird durchsichtig
- Gravitation kommt zum Tragen

6. Stellare Nukleosynthese

Gravitation bewirkt

- Zusammenballung von Atomen ►
Hohe Dichte im Zentrum

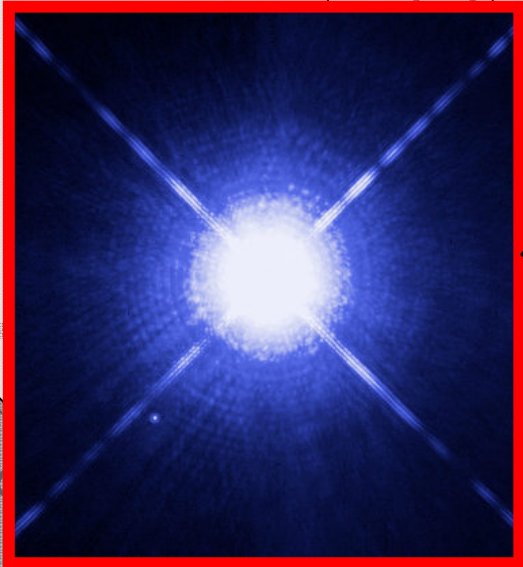
- Adiabatische Erhitzung ►
Hohe thermische Energie

→ Re-Ionisation, Plasma, Kernfusion

Stellare
Nukleo-
genese

ab 1000 Mio a

ab 100 Mio a



$3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}, (\rightarrow {}^{16}\text{O}, \dots, {}^{56}\text{Fe})$
 $\dots {}^{56}\text{Fe} \dots + n\text{'s} \rightarrow \text{Schwere Kerne}$

400

Primordiale
Nukleo-
genese

Baryo-
genese

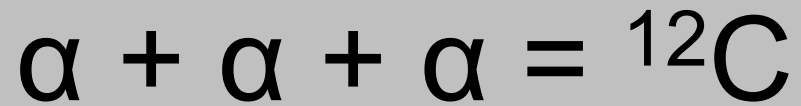
1 s

10^{-4} s

10^{-6} s

10^{-30} s

Quarks + Antiquarks
Baryonen + Antibaryonen
Protonen (p), Neutronen (n)
 $n : p \approx 1 : 4$
 $d, \dots, \alpha, (\dots)$



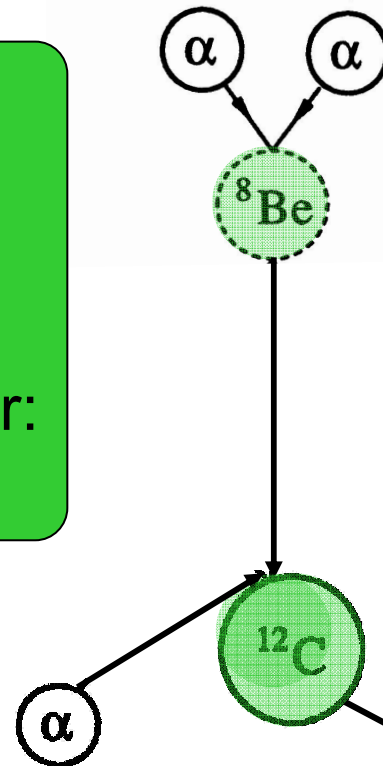
Heliumbrennen

(prominent ab

$$T \approx 2 \cdot 10^8 \text{ K}$$

$$\rho \approx 10^2 \text{ g/ml}$$

bei 90 keV:
Resonanz
 $\Delta E \approx 6 \text{ eV}$
Güte 10^5
Lebensdauer:
 10^{-16} s

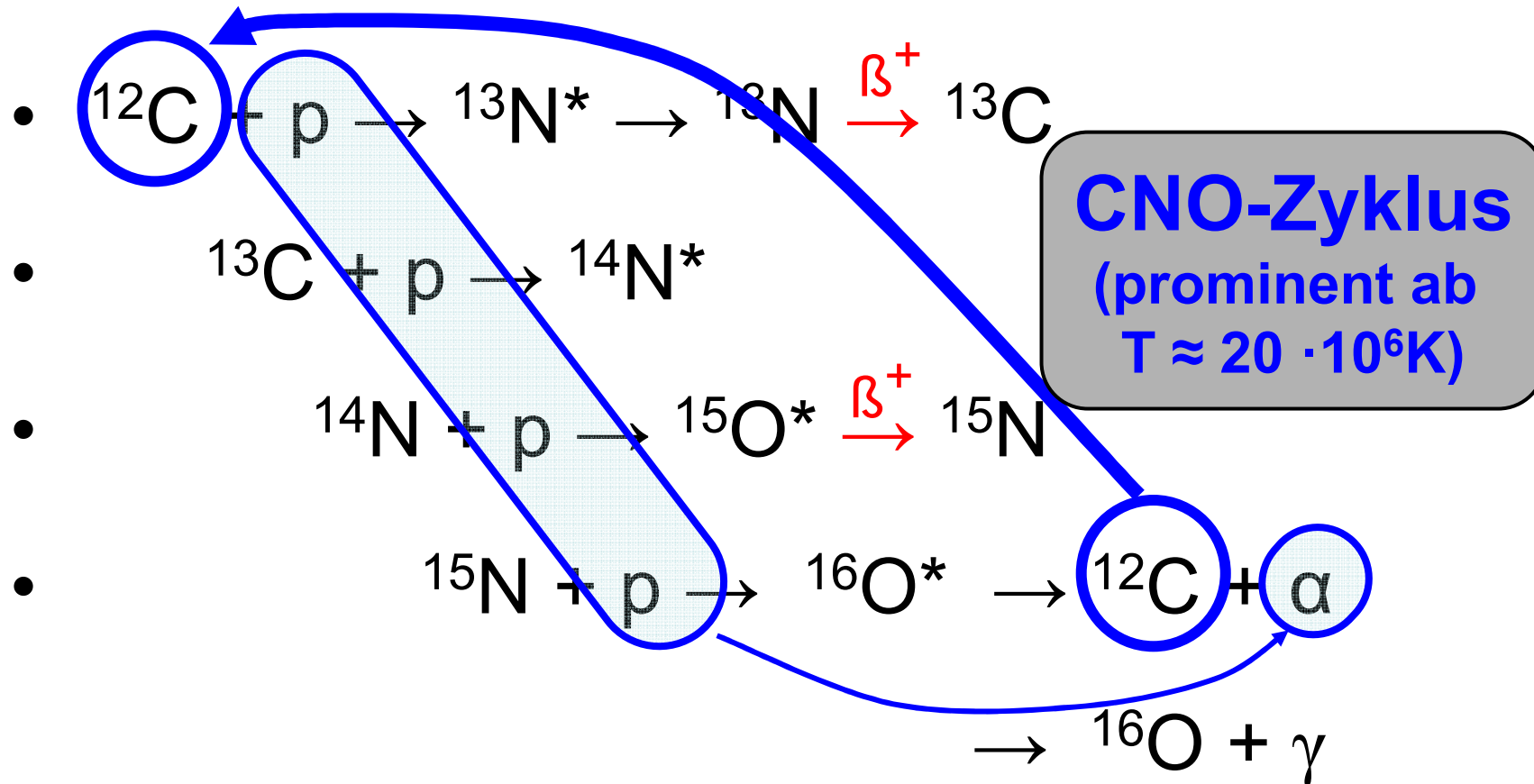


bei 288 keV:
Resonanz
Kernzustand ${}^{12}\text{C}^*$
 $\Delta E \approx 8 \text{ eV}$
Güte 10^5
Lebensdauer:
 10^{-16} s

$$E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} = 7,654 \text{ MeV}$$

stabiler Kern

Vom Kohlenstoff aufwärts: Wasserstoffbrennen



Vom Kohlenstoff aufwärts: Kohlenstoffbrennen

- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha$
- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Na} + p$
- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$

**Kohlenstoffbrennen
explosiv ab**

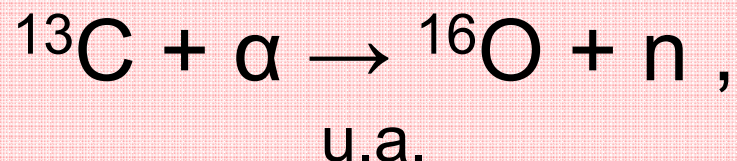
$T \approx 5 \cdot 10^8 \text{ K}$

$\rho \approx 10^6 \text{ g/ml}$

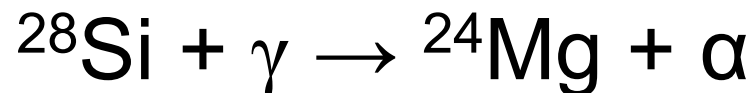
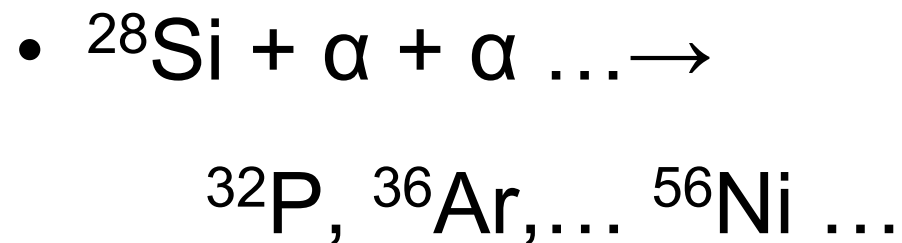
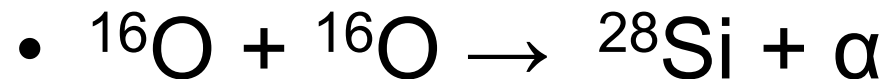
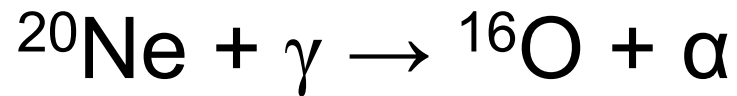
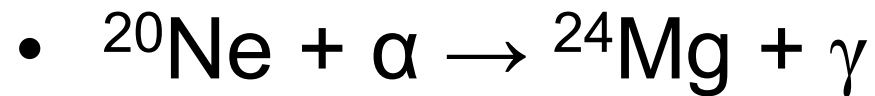
Dauer ≈ 500 Jahre

Freie Neutronen

weitere Neutronen aus



Vom Kohlenstoff zum Eisenpeak: "Nuklearer Eintopf"

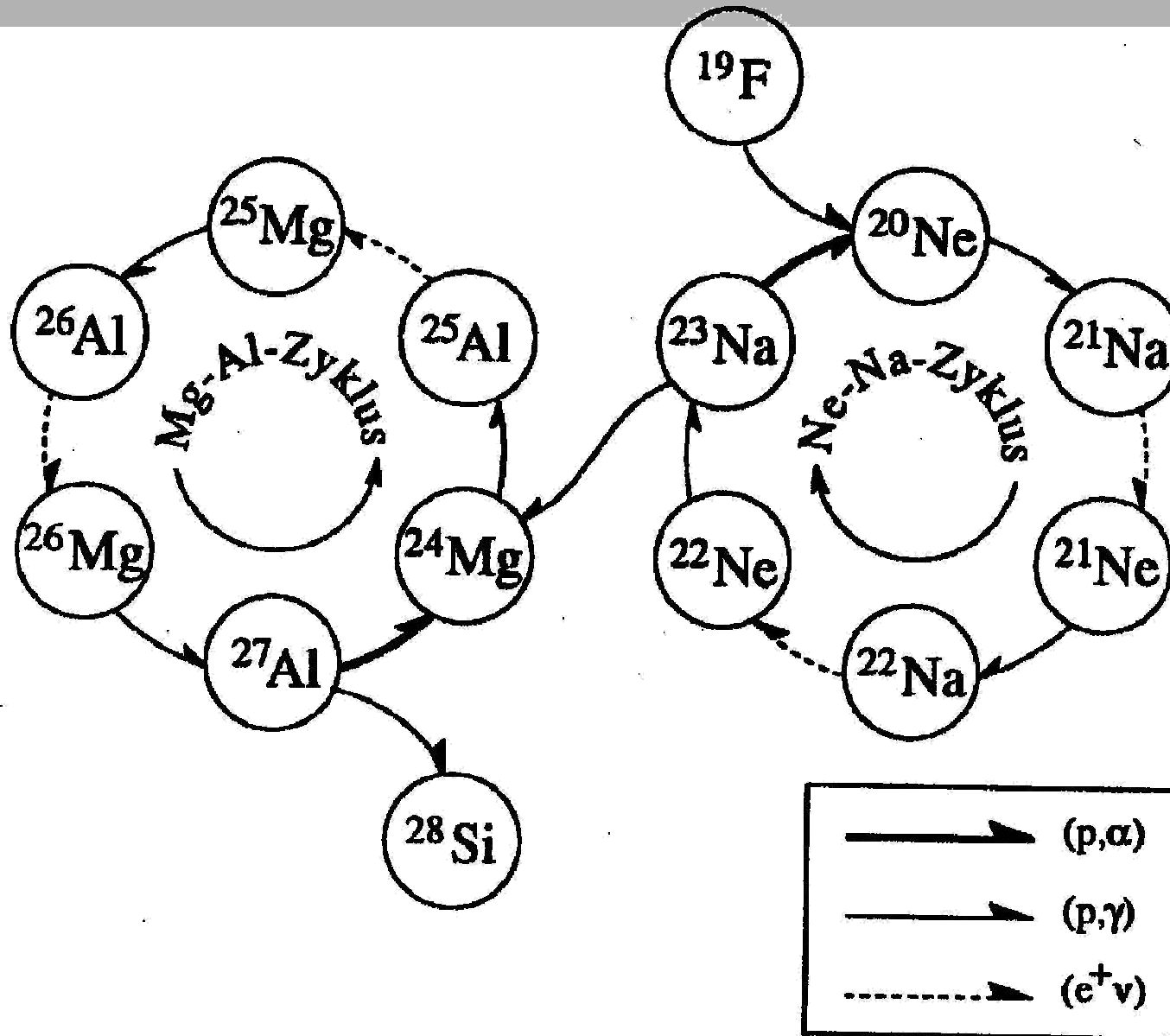


Neonbrennen
explosiv ab $T \approx 10^9 \text{ K}$
 $\rho \approx 10^6 \text{ g/ml}$
Dauer $\approx 1 \text{ Jahr}$

Sauerstoffbrennen
explosiv ab $T > 2 \cdot 10^9 \text{ K}$
 $\rho \approx 10^7 \text{ g/ml}$
Dauer $\approx \text{Monate}$

Siliziumbrennen
explosiv ab $T > 3 \cdot 10^9 \text{ K}$
 $\rho \approx 10^9 \text{ g/ml}$
Dauer $\approx \text{Tag}$

Nebenreaktionen (Beispiel)



Die Entstehung der Elemente

- Zwischenbilanz -

1 H Wasserstoff 1,00794 1/1	2 He Helium 4,002602 2/2											13 B Bor 10,811 2/3	14 C Kohlenstoff 12,011 2/4	15 N Stickstoff 14,007 2/5	16 O Sauerstoff 15,999 2/6	17 F Fluor 18,998 2/7	18 Ne Neon 20,180 2/8			
3 Li Lithium 6,941 2/1	4 Be Beryllium 9,0122 2/2											13 Al Aluminium 26,982 2/8/3	14 Si Silizium 28,086 2/8/4	15 P Phosphor 30,974 2/8/5	16 S Schwefel 32,06 2/8/6	17 Cl Chlor 35,453 2/8/7	18 Ar Argon 39,948 2/8/8			
11 Na Natrium 22,990 2/8/1	12 Mg Magnesium 24,305 2/8/2	19 K Kalium 39,098 2/8/8/1	20 Ca Calcium 40,078 2/8/8/2	21 Sc Scandium 44,956 2/8/9/2	22 Ti Titanium 47,88 2/8/10/2	23 V Vanadium 50,942 2/8/11/2	24 Cr Chrom 51,996 2/8/13/1	25 Mn Mangan 54,938 2/8/13/2	26 Fe Eisen 55,845 2/8/14/2	27 Co Cobalt 58,933 2/8/15/2	28 Ni Nickel 58,69 2/8/16/2	29 Cu Kupfer 63,546 2/8/18/1	30 Zn Zink 65,38 2/8/18/2	31 Ga Gallium 69,723 2/8/18/3	32 Ge Germanium 72,63 2/8/18/4	33 As Arsen 74,922 2/8/18/5	34 Se Selen 78,96 2/8/18/6	35 Br Brom 79,904 2/8/18/7	36 Kr Krypton 83,798 2/8/18/8	
37 Rb Rubidium 85,468 2/8/18/8/1	38 Sr Strontium 87,62 2/8/18/8/2	39 Y Yttrium 88,906 2/8/18/9/2	40 Zr Zirkonium 91,224 2/8/18/10/2	41 Nb Niob 92,906 2/8/18/12/1	Eisenpeak – warum?										49 In Indium 114,82 2/8/18/18/3	50 Sn Zinn 118,71 2/8/18/18/4	51 Sb Antimon 121,76 2/8/18/18/5	52 Te Tellur 127,60 2/8/18/18/6	53 I Jod 126,90 2/8/18/18/7	54 Xe Xenon 131,29 2/8/18/18/8
55 Cs Cäsium 132,91 2/8/18/18/8/1	56 Ba Barium 137,33 2/8/18/18/8/2	57-71 Lanthanoide siehe unten	72 Hf Hafnium 178,49 2/8/18/32/10/2	73 Ta Tantal 180,95 2/8/18/32/11/2											49 Tc Technetium (98) 2/8/18/13/2	50 Ru Ruthenium 101,07 2/8/18/13/2	51 Rh Rhodium 102,91 2/8/18/13/2	52 Pd Palladium 106,42 2/8/18/13/2	53 Ag Silber 107,87 2/8/18/13/2	54 Cd Kadmium 112,41 2/8/18/18/2
87 Fr Francium (223) 2/8/18/32/18/8/1	88 Ra Radium 226,03 2/8/18/32/18/8/2	89-103 Actinoide siehe unten	104 Rf Rutherfordium (261) 2/8/18/32/11/2	105 Db Dubnium (262) 2/8/18/32/11/2	(263) 2/8/18/32/12/2	(262) 2/8/18/32/12/2	(265) 2/8/18/32/12/4/2	(266) 2/8/18/32/12/15/2	(269) 2/8/18/32/12/17/1	(272) 2/8/18/32/12/18/1	(277) 2/8/18/32/12/18/2	113 Nh Nihonium (270) 2/8/18/32/11/2	114 Fl Flerovium (271) 2/8/18/32/11/2	115 Uup Ununpentium (272) 2/8/18/32/11/2	116 Lv Livermorium (273) 2/8/18/32/11/2	117 Uus Ununseptium (274) 2/8/18/32/11/2	118 Uuo Ununoctium (275) 2/8/18/32/11/2			

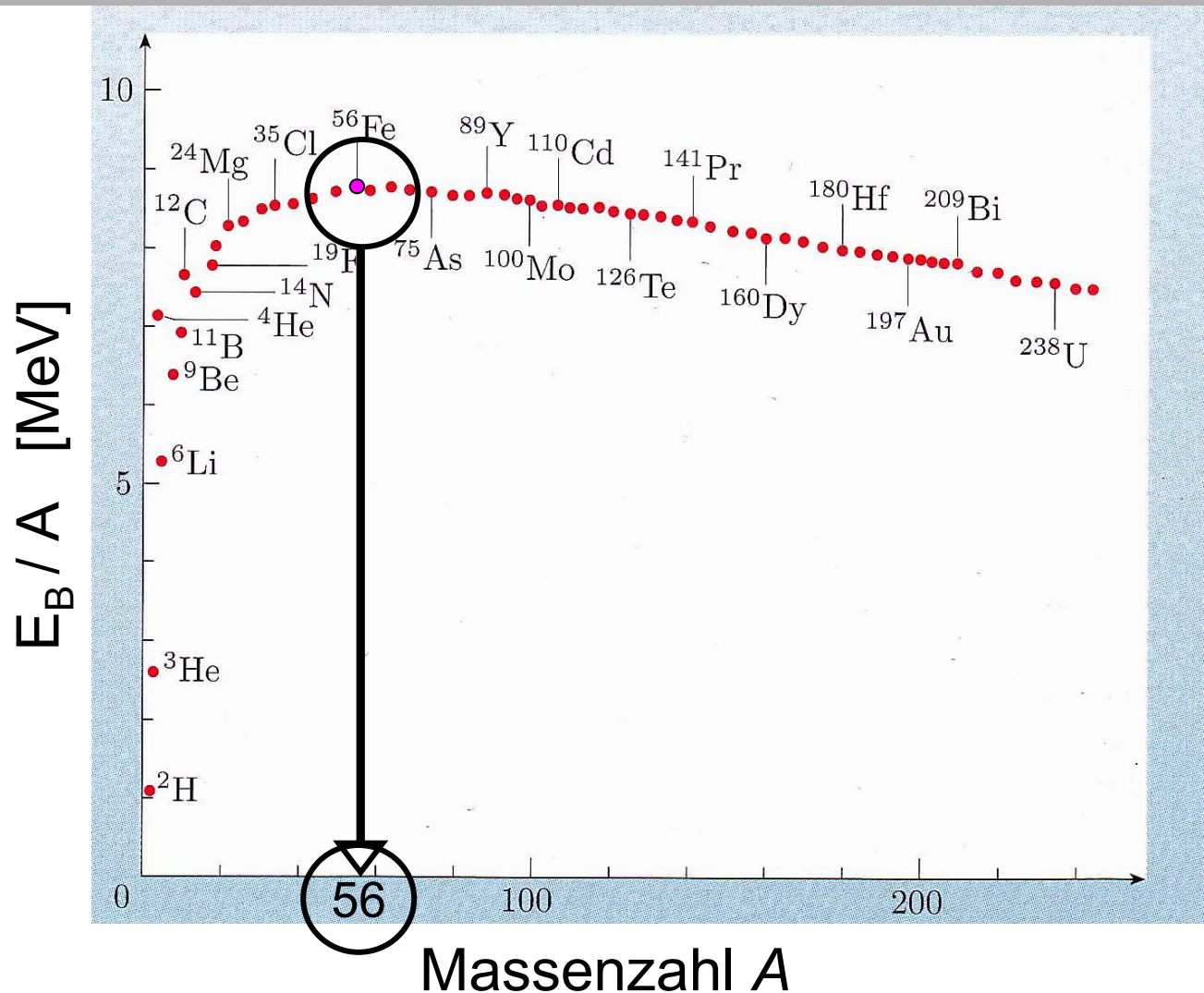
Eisenpeak –
warum?

Lanthanoide

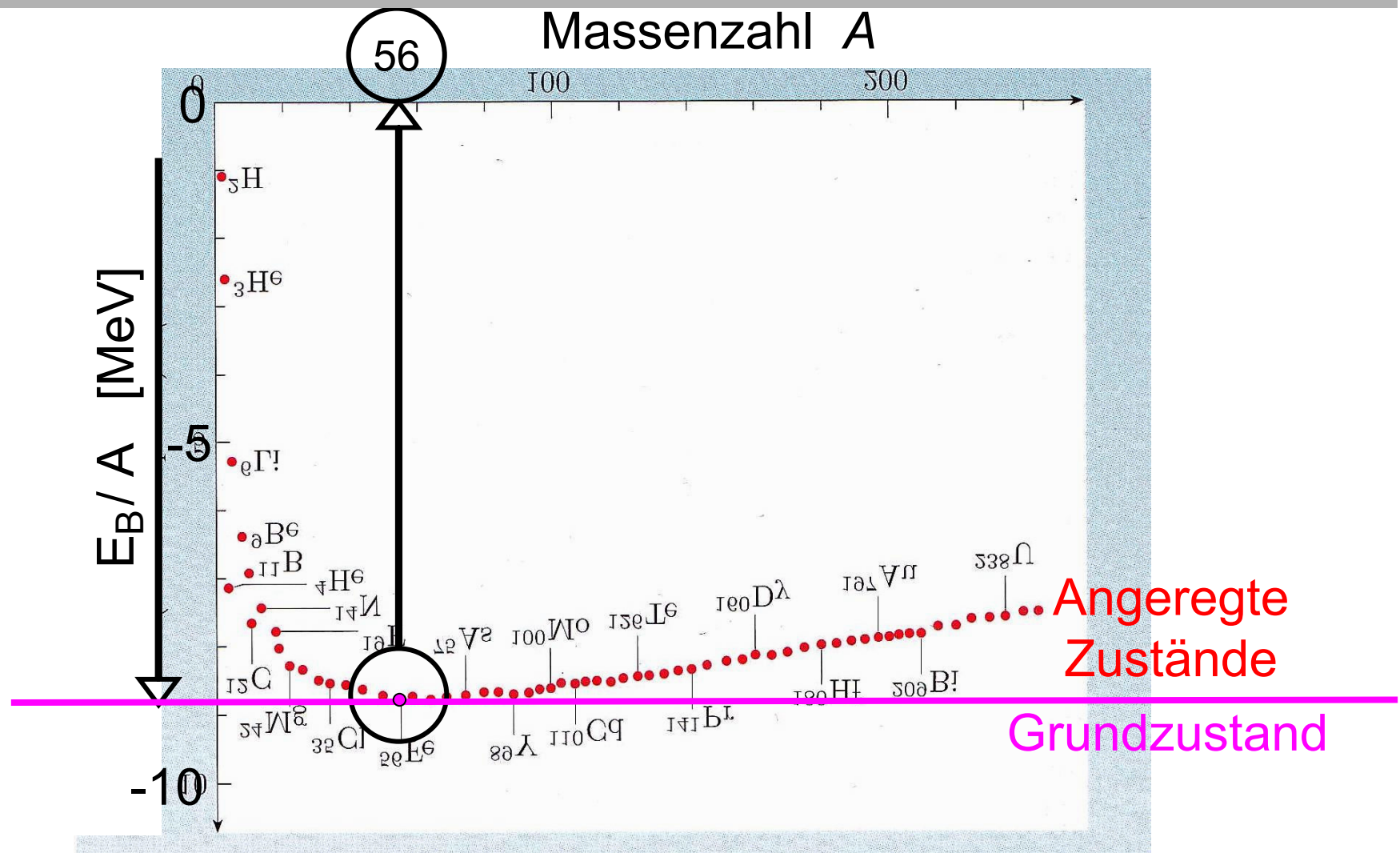
Actinoide

57 La Lanthan 138,91 2/8/18/18/9/2	58 Ce Cer 140,12 2/8/18/19/9/2	59 Pr Praseodym 140,91 2/8/18/21/9/2	60 Nd Neodym 144,24 2/8/18/22/9/2	61 Pm Promethium 146,90 2/8/18/23/9/2	62 Sm Samarium 150,36 2/8/18/24/9/2	63 Eu Europium 151,96 2/8/18/25/9/2	64 Gd Gadolinium 157,25 2/8/18/26/9/2	65 Tb Terbium 158,93 2/8/18/27/9/2	66 Dy Dysprosium 162,50 2/8/18/28/9/2	67 Ho Holmium 164,93 2/8/18/29/9/2	68 Er Erbium 167,26 2/8/18/30/9/2	69 Tm Thulium 168,93 2/8/18/31/9/2	70 Yb Ytterbium 173,05 2/8/18/32/9/2	71 Lu Lutetium 174,97 2/8/18/32/9/2
89 Ac Actinium (227) 2/8/18/32/18/8/1	90 Th Thorium 232,04 2/8/18/32/18/8/2	91 Pa Protaktinium 231,04 2/8/18/32/18/8/3	92 U Uran 238,03 2/8/18/32/18/8/4											

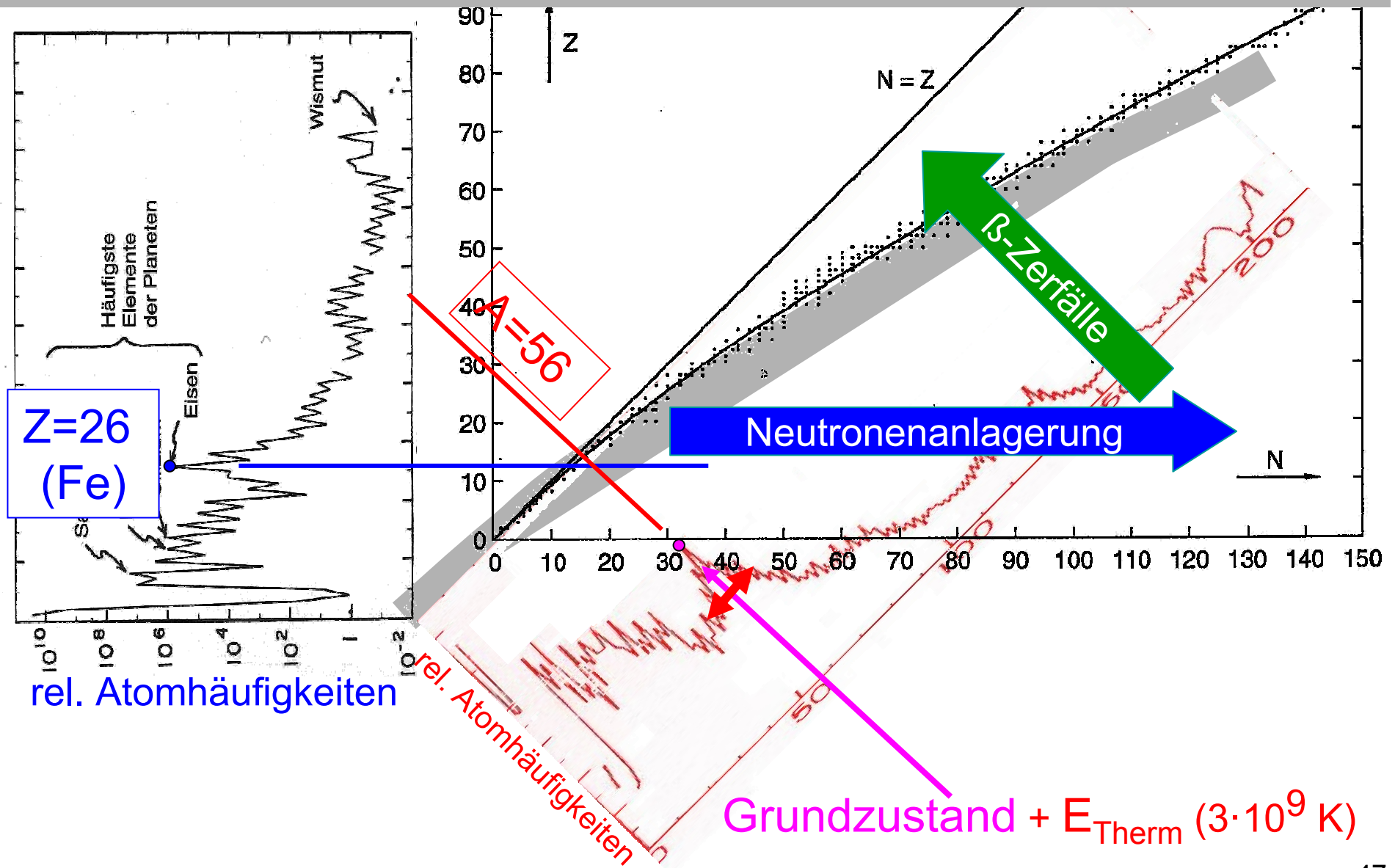
Bindungsenergie pro Nukleon längs der "Talsohle der stabilen Isotope"



Bindungsenergie pro Nukleon längs der "Talsohle der stabilen Isotope"

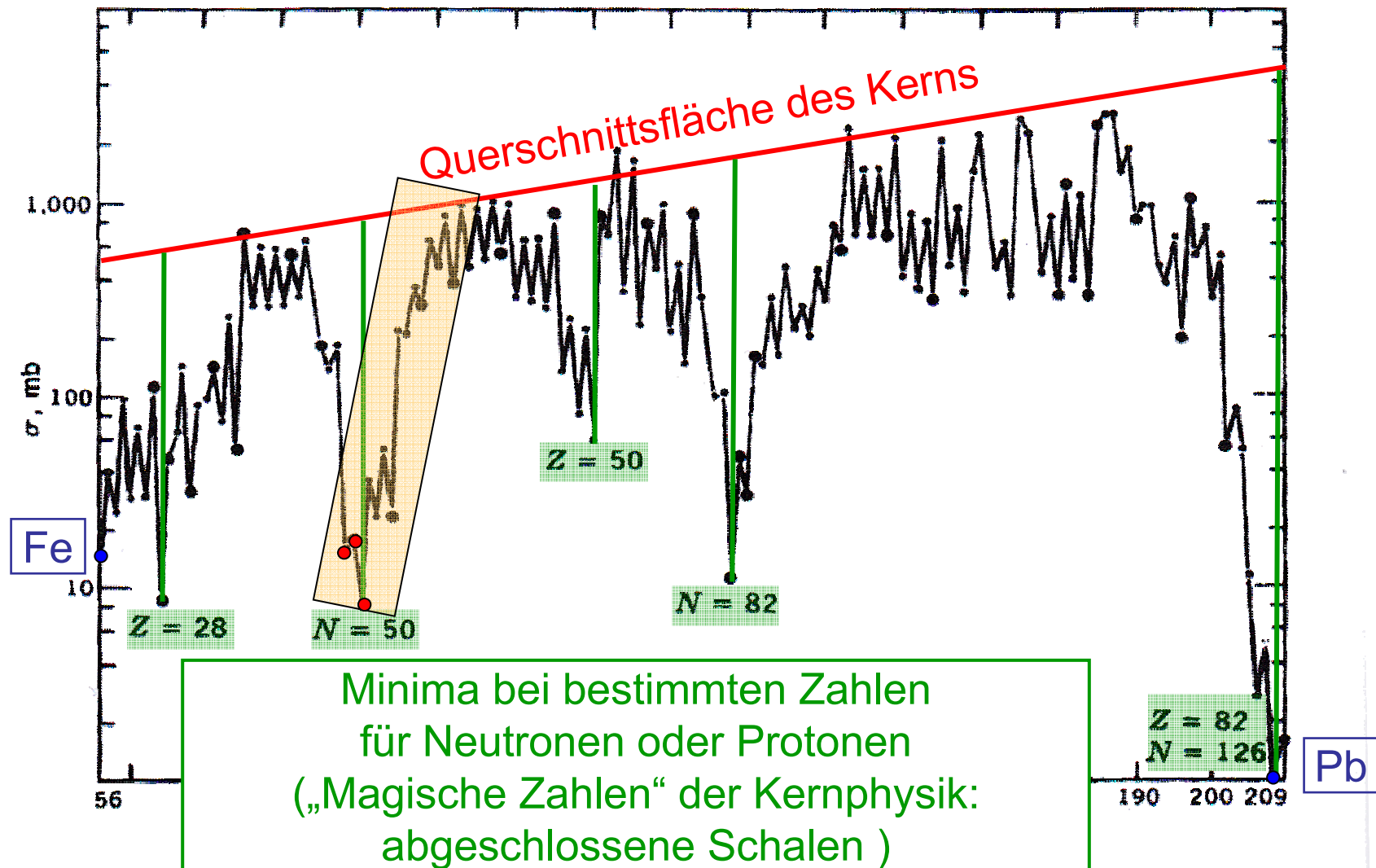


Eisenpeak : Boltzmann-Verteilung

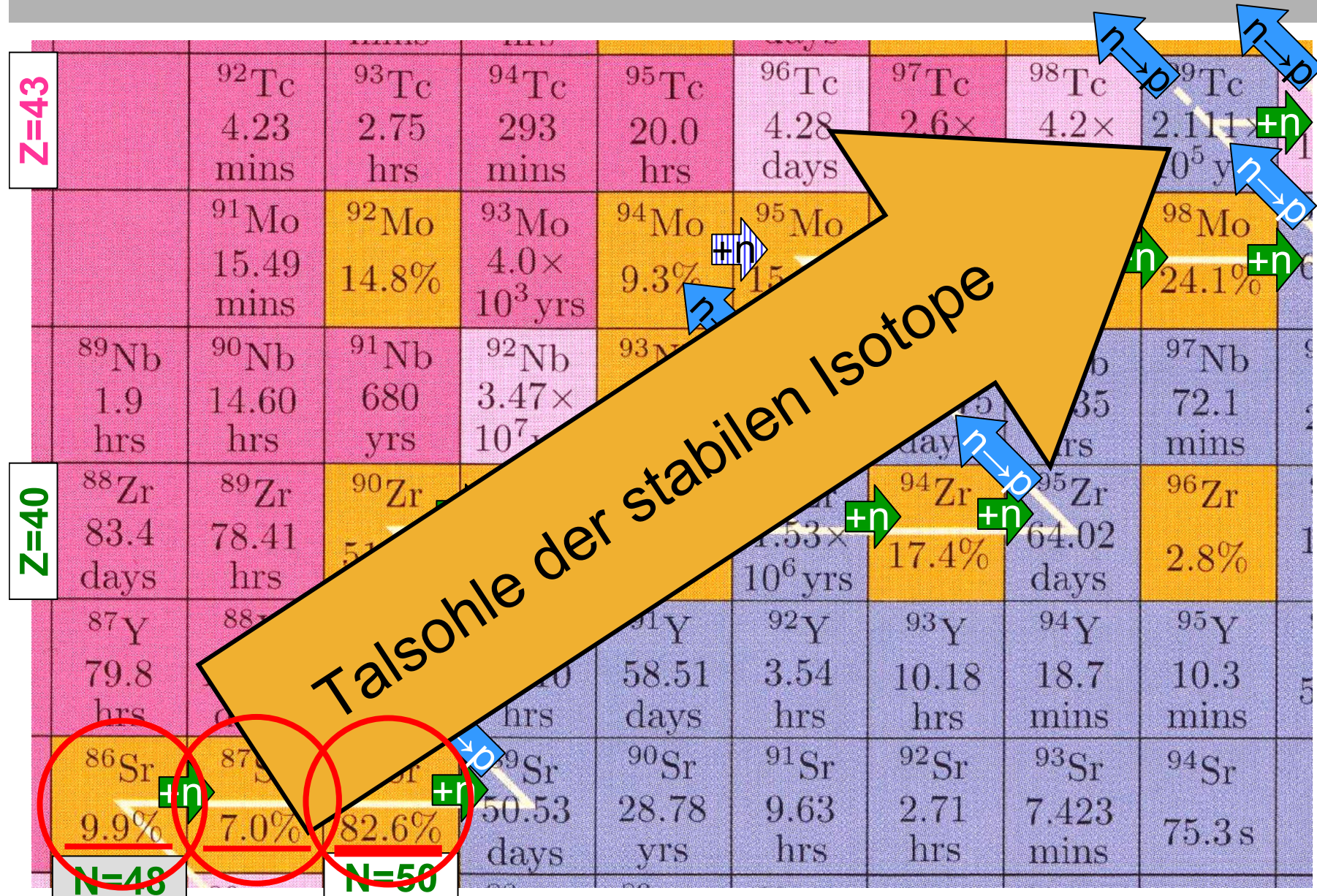


weiter bis zum Uran ${}^A_Z X + n \rightarrow {}^{A+1}_Z X + \gamma$

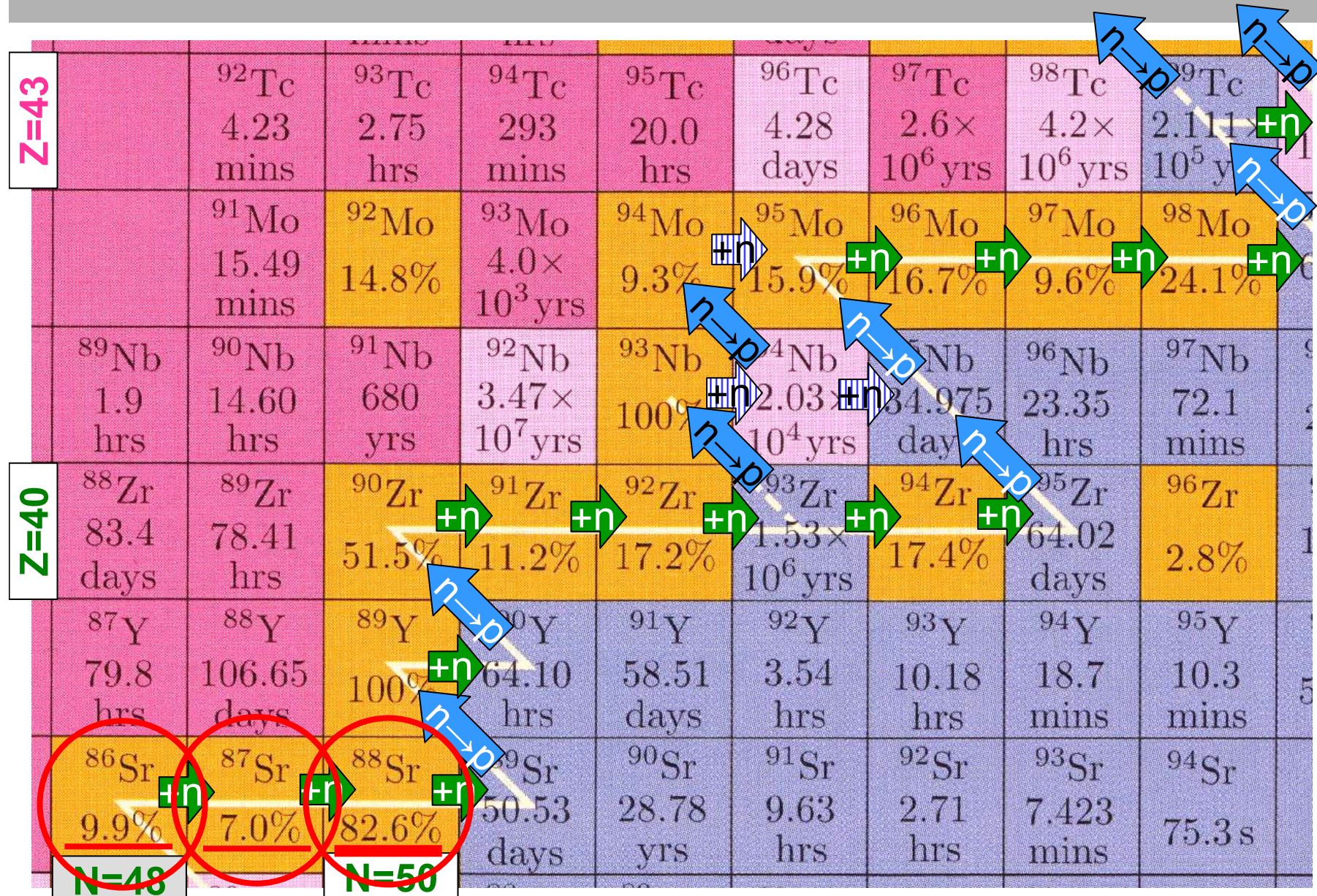
Wirkungsquerschnitt σ für Neutroneneinfang



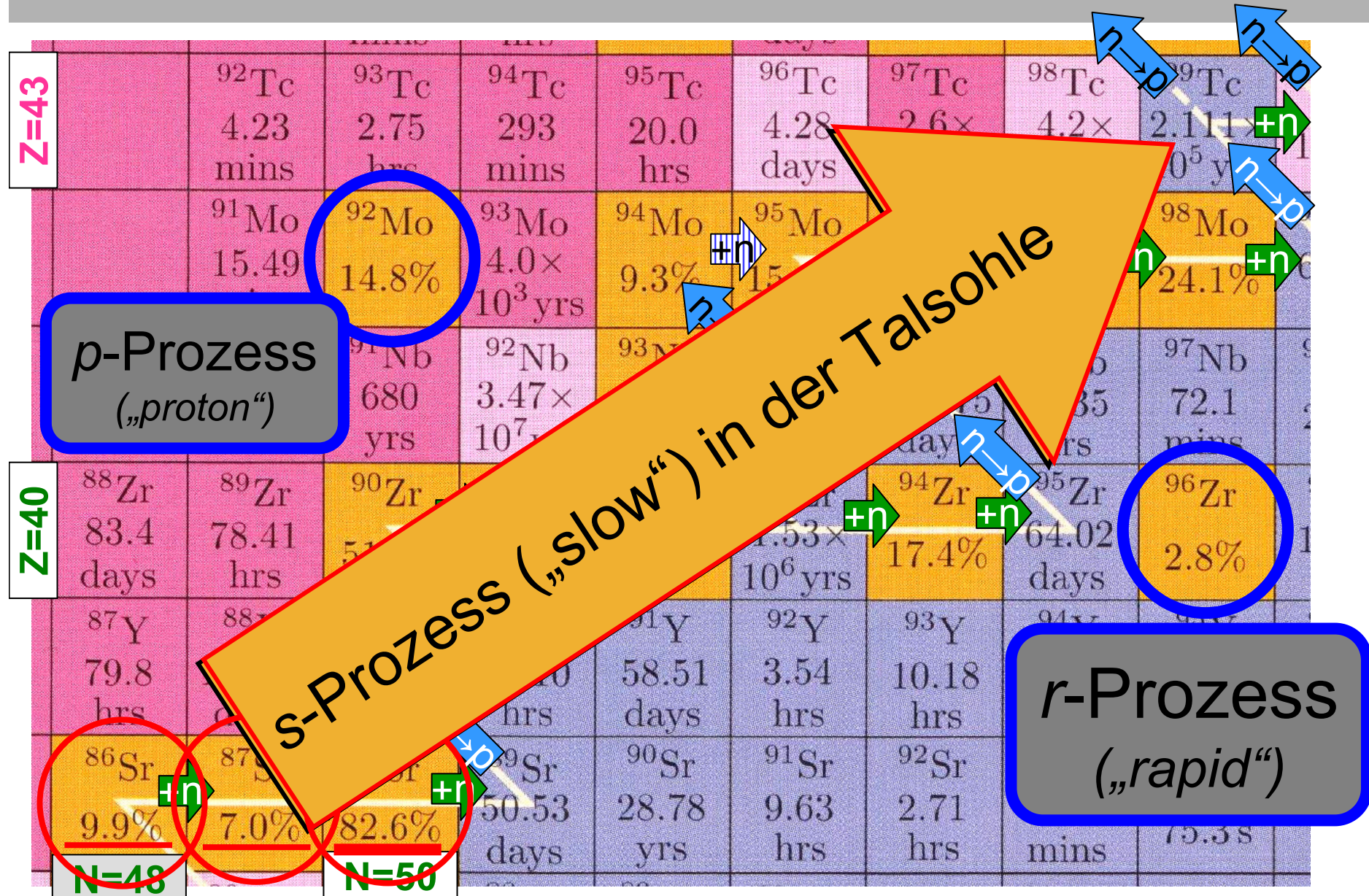
Der s-Prozess entlang der Talsohle



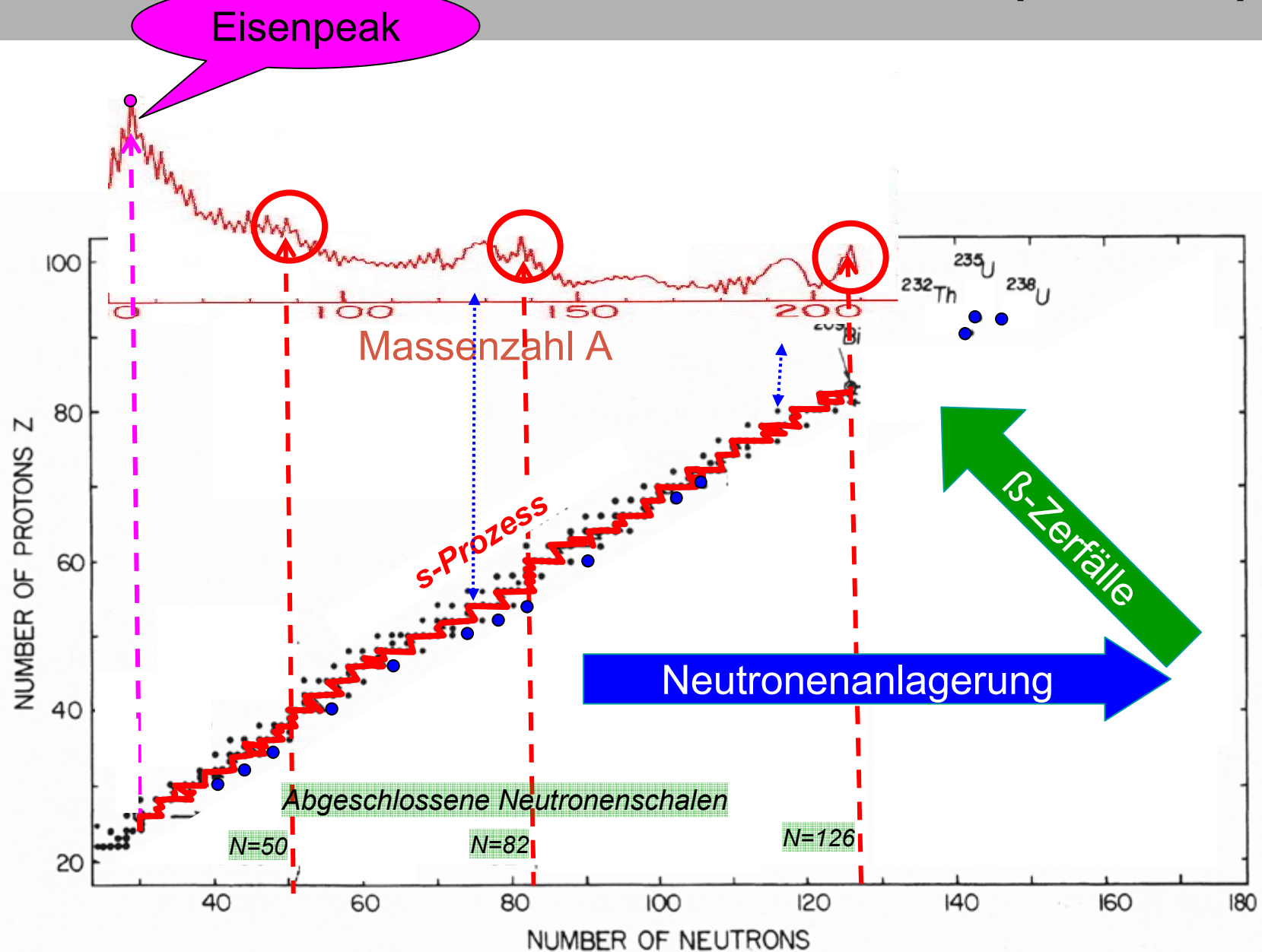
Der s-Prozess entlang der Talsohle



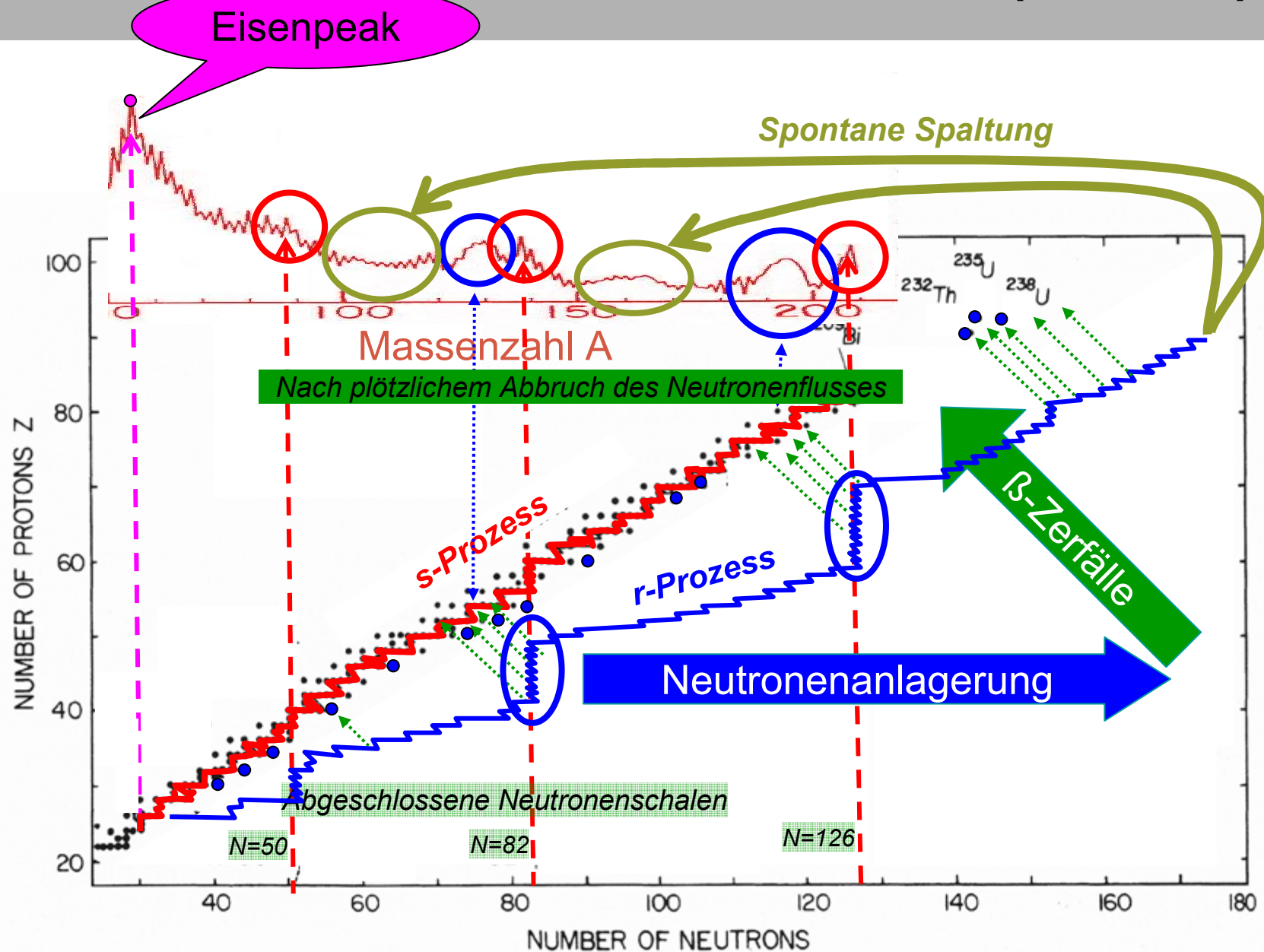
Der s-Prozess entlang der Talsohle



s-Prozess und *r-Prozess* (u.s.w)



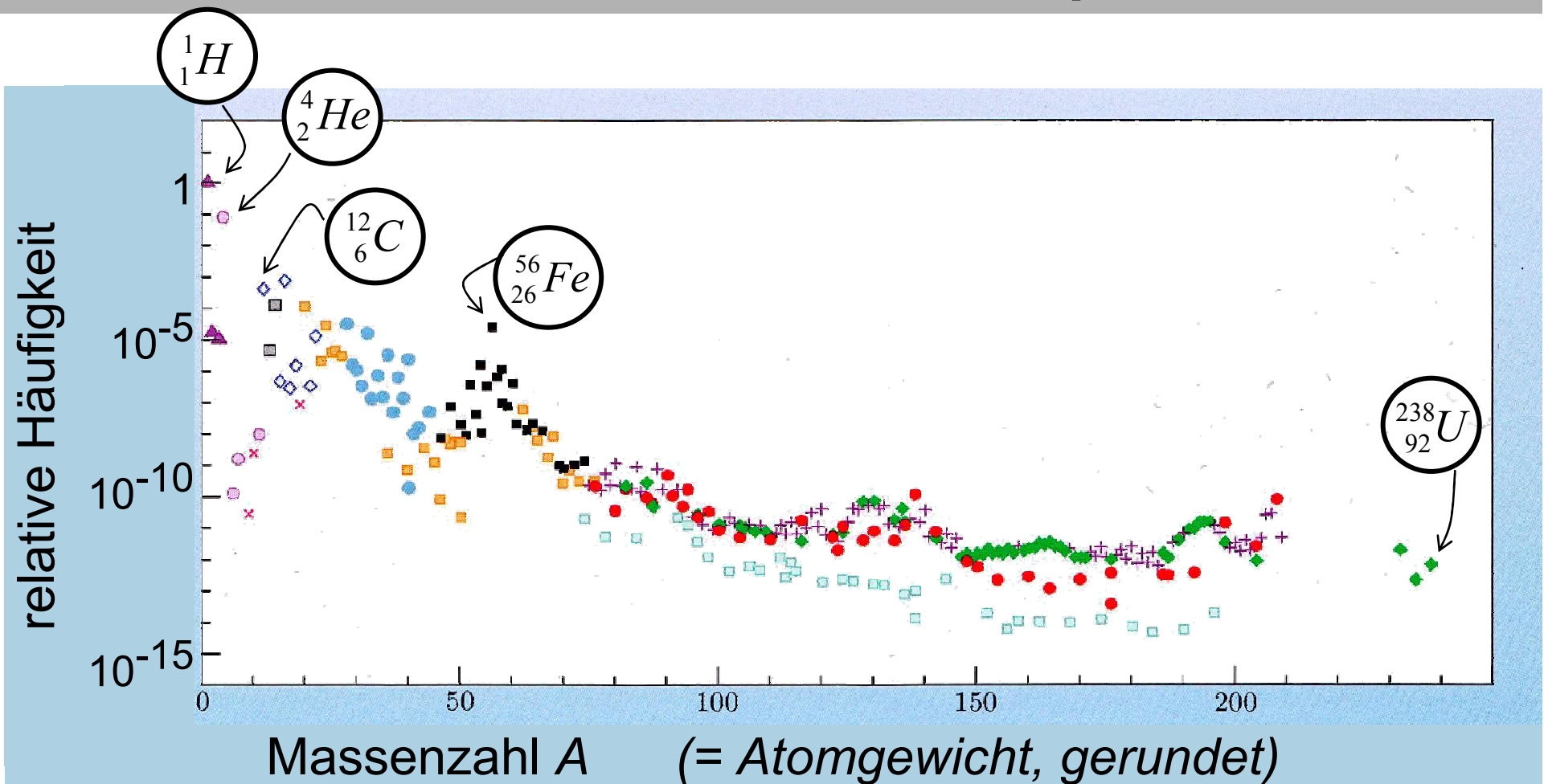
s-Prozess und *r*-Prozess (u.s.w)



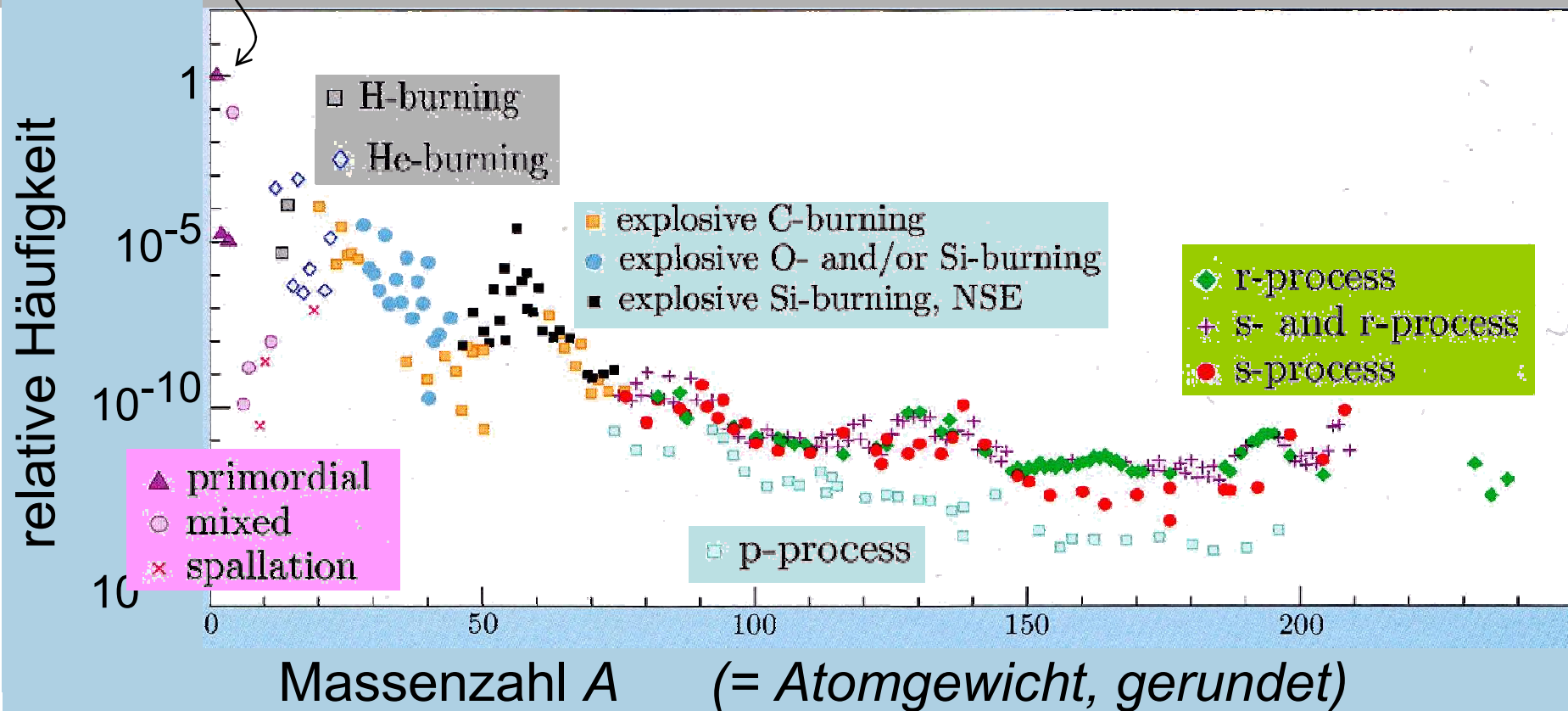
Wo finden *s*- und *r*-Prozess statt?

- *s*-Prozess: Pulsierende Sterne
Konvektion zwischen Schichten verschiedener Tiefe
(~100-1000 Jahre)
- *r*-Prozess: Supernova-Explosion
Ende des Si-Brennen (~1 Std.)
 - Sternkollaps (~1 Sek., bis zur Dichte der Kernmaterie)
 - Schockwelle nach außen
 - Erhitzung auf 10^{10}K
 - Neutronenfreisetzung (durch γ -Strahlung)
 - Neutroneneinfang
 - Abstoßung der äußeren Hülle

Die Häufigkeiten der ca. 250 natürlichen Isotope



Die Häufigkeiten der Isotope: Der Schlüssel zu den einzelnen Entstehungsprozessen



Literatur und Quellen

- [1] *Kerne und Sterne*, von Heinz Oberhummer
(Joh. Amb. Barth, Leipzig, 1993)
- [2] *Stellar Evolution and Nucleosynthesis*
von Sean Ryan, Andrew Norton (Cambridge Univ.
Press, 2010)
- [3] *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of
Galaxies*, von Bernard Pagel (Cambridge Univ.
Press, 2009)
- [4] *Elementare Teilchen*, von Jörn Bleck-Neuhaus
(Springer-Verlag, Heidelberg, 2010)
- [5] Wikipedia