Einführung; Eigenschaften und Entstehung der Elemente

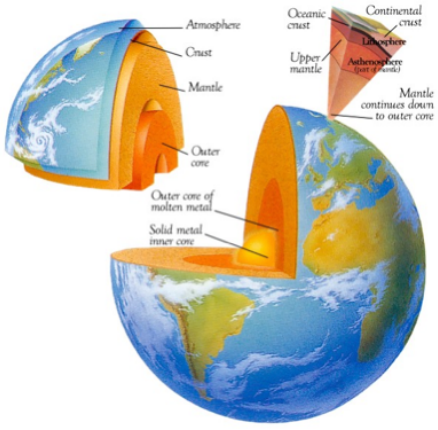
Thorsten Kleine

Raum 111a IG I, Wilhelm-Klemm-Str. 10, thorsten.kleine@wwu.de

Einführung in die Geochemie

Geochemie

- benutzt Methoden der Chemie, um Entstehung und Entwicklung von *geologischen Systemen* zu verstehen
  → *Kern, Mantel, Kruste, Ozeane und Atmosphäre*



- befasst sich mit der Verteilung der chemischen Elementen und deren Isotopen zwischen diesen Systemen
- Wichtige Disziplinen: Isotopengeochemie, Geochronologie, Kosmochemie, Biogeochemie

Inhalt der Vorlesung

- Entstehung und Eigenschaften der Elemente
- Meteorite und Planeten
- Differenzierung der Erde und Verteilung der Elemente
- Datierungsmethoden
- Spurenelement-Geochemie
- Geochemie von Mantel und Kruste
- Verwitterung und Flusswasserchemie
- Geochemie der Ozeane und der Atmosphäre

Überblick: Eigenschaften und Entstehung der Elemente

- Eigenschaften von Nukliden
- Stabilität von Nukliden und Bindungsenergie
- Nuklidkarte und Tal der Stabilität
- Häufigkeiten der Elemente und Isotope im Sonnensystem
- Nukleosynthese in Sternen und Supernovae

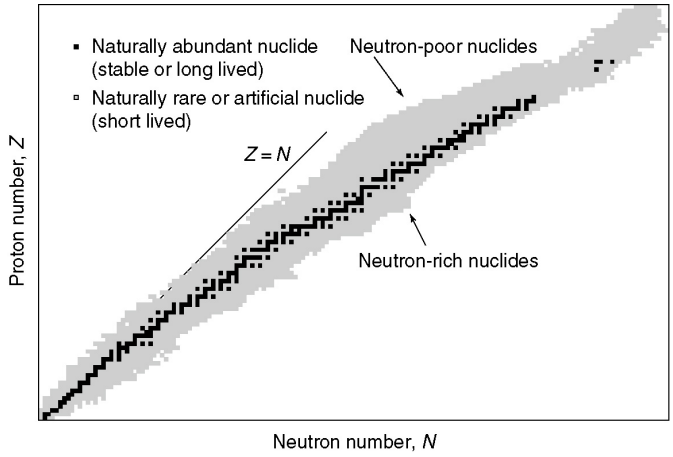
Literatur:

- White: Geochemistry Kap. 1.4 & 1.5: Seiten 6-19 (allgemeiner Überblick über Geochemie)
- White: Geochemistry Kap. 8: Seiten 321-326
- White: Geochemistry Kap. 10: Seiten 430-442

Eigenschaften von Nukliden

- Nukleonen sind Kernbausteine, also Neutronen und Protonen
- N = Anzahl Neutronen
- Z = Anzahl Protonen (Ordnungs- oder Kernladungszahl)
- A = N + Z (Massenzahl)
- Isotope: gleiches Z (gleiches chem. Element), unterschiedliches N
  $\rightarrow$ z.B. $^{40}_{20}$Ca und $^{48}_{20}$Ca
- Isobare: gleiches A, aber unterschiedliches Z (verschiedene Elemente gleicher Masse)
  $\rightarrow$ z.B. $^{40}_{20}$Ca und $^{40}_{18}$Ar
- Atomare Masseneinheit: atomic mass unit (amu), dalton (Da)
  - 1 amu = $^{1}/_{12}$ der Masse von ^{12}C
  - Proton = 1.007593 amu = 1.6726231 $\times 10^{-27}$ kg
  - Neutron = 1.008982 amu
  - Elektron = 0.000548756 amu

Stabilität von Nukliden



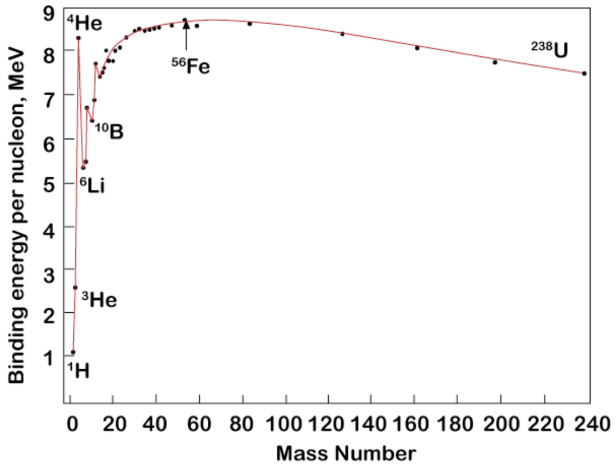
- Bestimmte Kombinationen von N und Z stabil
- Stabile Nuklide N $\approx$ Z
- Für kleine A giltt N = Z
- Für große A gilt N > Z (schwere Elemente durch Neutronen-Anreicherung stabilisiert)

Stabilität von Nukliden - Massendefekt

- Konfiguration mit der niedrigsten Energie ist die stabilste
- Beispiel: ^{4}He (2 Protonen, 2 Neutronen) sollte niedrigeren Energiezustand haben als je 2 freie Protonen und Neutronen
- Wegen $E = mc^2$ ist niedriger Energiezustand gleichbedeutend mit niedriger Masse
- Massendefekt $\delta = W - M$;
  W = Summe der Massen der Teilchen, M = wahre Masse
- Für ^{4}He: $W = 2m_p + 2m_n + 2m_e = 4.034248$ amu
- M für ^{4}He = 4.003873 amu, d.h. $\delta = 0.030375$ amu

Stabilität von Nukliden - Bindungsenergie

- Bindungsenergie ergibt sich aus Massendefekt
  $E = (W - M)\,c^2$
- Bindungsenergie pro Nukleon:
  $\frac{B}{A} = \left(\frac{W - M}{A}\right) c^2$
- Mass für die Stabilität von Nukliden: höchste Bindungsenergie pro Nukleon
  = niedrigster Energiezustand
  = stabilstes Nuklid

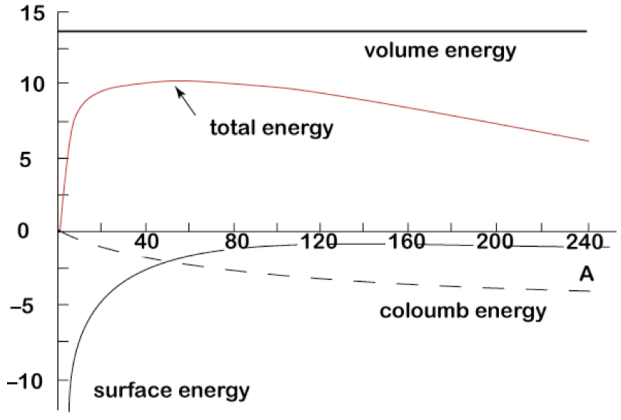


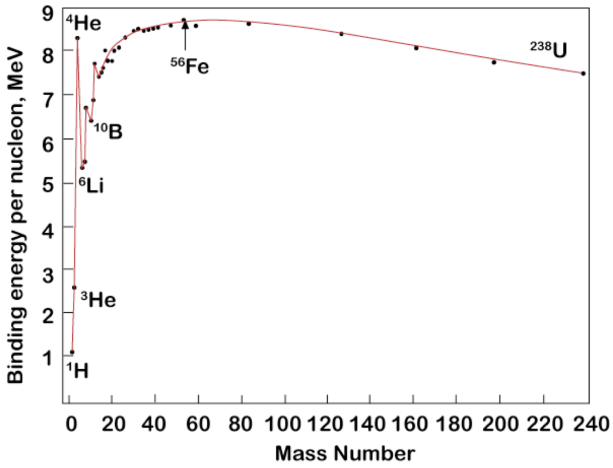
^{56}Fe ist das stabilste Nuklid

Veränderung der Bindungsenergie mit Massenzahl

- Kräfte im Atomkern: v.a. starke Wechselwirkung (Kernkraft) und Coulomb-Abstoßung
- **Starke Wechselwirkung**: Bindet zwei benachbarte Nukleonen aneinander (konstant ca. 14-16 MeV/Nukleon, sog. Volumen-Energie)
- **Couloumb-Abstoßung**: Zwischen Protonen; schwächt die Bindung; nimmt mit zunehmender Anzahl Protonen zu
- **Oberflächenenergie**: Nukleonen an der Oberfläche haben weniger Nachbarn und sind weniger stark gebunden; nimmt mit zunehmender Massenzahl ab

Bindungsenergie: Modell und Beobachtung





Magische Zahlen und Gerade-Ungerade-Effekte

- Nuklide, deren Nukleonen Schalen im Atomkern vollständig besetzen, sind besonders stabil $\rightarrow$ magische Zahl an Neutronen oder Protonen
- Magische Zahlen: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
- Doppelt magischer Kern enthält magische Zahl an Neutronen und Protonen: He-4, O-16, Ca-40, Ca-48, Pb-208
- Gerade-Ungerade-Effekte (Oddo-Harkins-Effekt):

Z	N	A	number of stable nuclei	number of very long-lived nuclei
		(Z + N)		
odd	odd	even	4	5
odd	even	odd	50	3
even	odd	odd	55	3
even	even	even	165	11

Tal der Stabilität

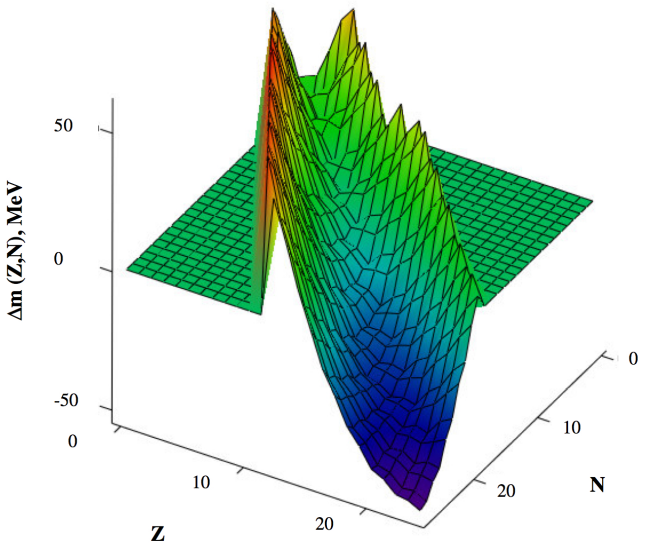
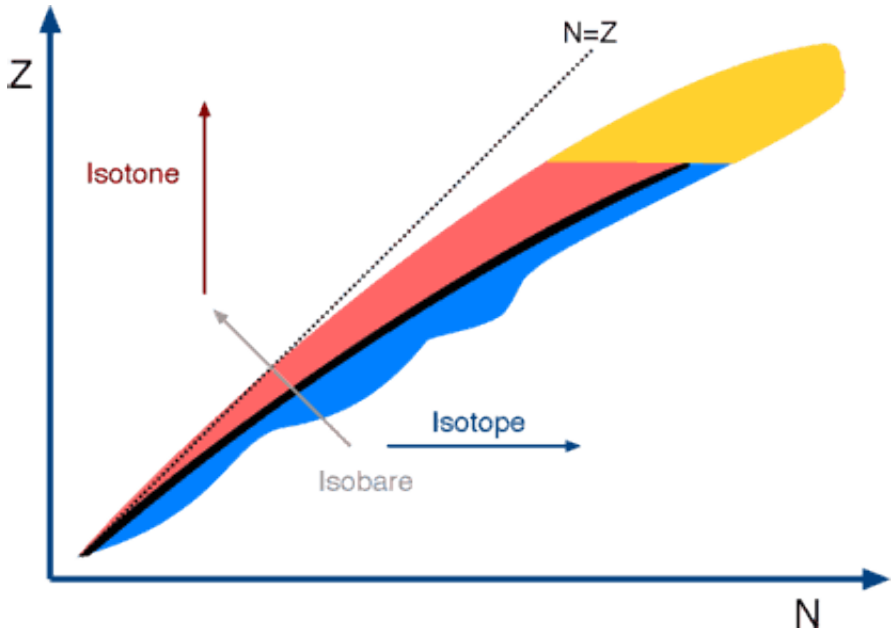


Abb. 10.6. Massendefekt für leichte Kerne bis A ≈ 40, der das Stabilitätstal zeigt.

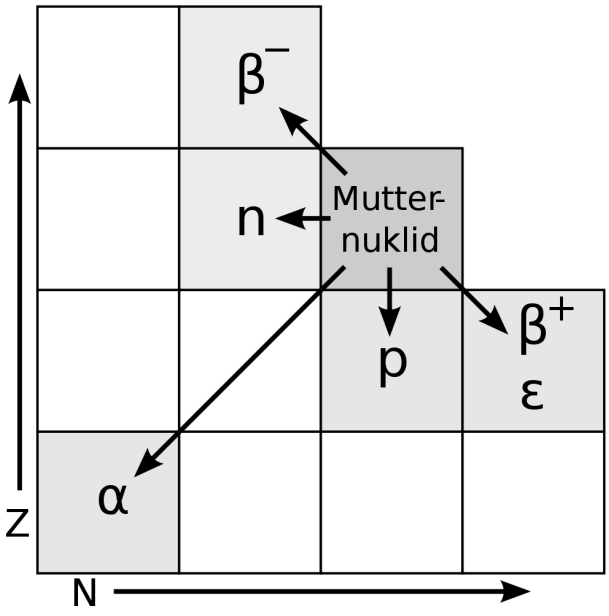
Kerne mit höchster Stabilität (d.h. höchstem Massendefekt) befinden sich im Tal

Nuklidkarte

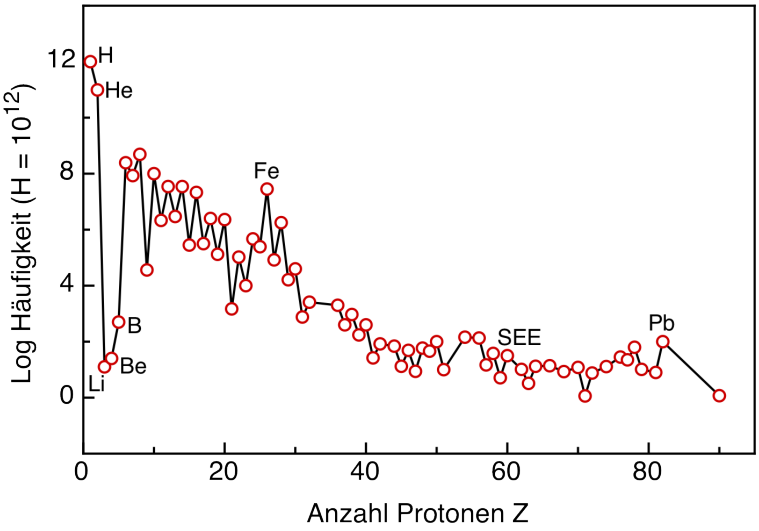


Radioaktiver Zerfall und Nuklidkarte

- α-Zerfall:
  ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$
- β^--Zerfall:
  ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \overline{\nu}_e$
- β^+-Zerfall:
  ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + e^+ + \nu_e$



Häufigkeiten der Isotope im Sonnensystem

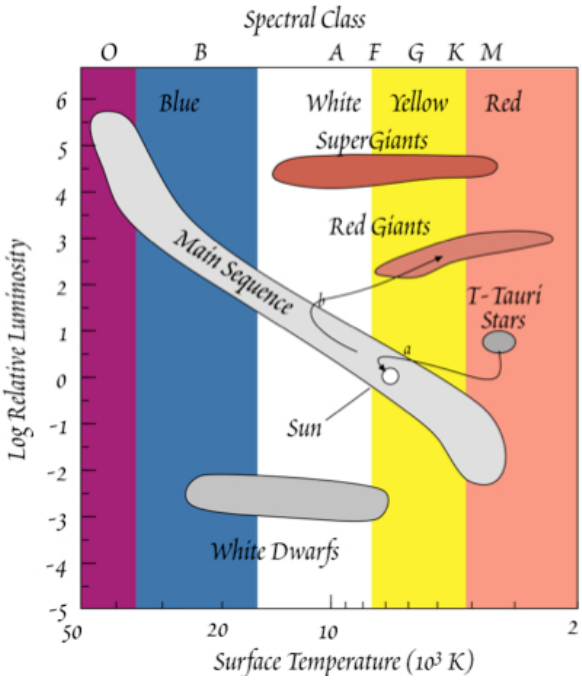


- H und He sind die häufigsten Elemente
- Häufigkeiten nehmen mit zunehmender Protonenzahl kontinuierlich ab
- Zick-Zack-Muster: Elemente mit geradem Z häufiger als solche mit ungeradem Z
- Elemente der Fe-Gruppe sind besonders häufig
- Li, Be und B haben besonders niedrige Häufigkeiten

Entstehung der Elemente - Nukleosynthese

- Kosmologische (primordiale) Nukleosynthese: Bildung von H und He und etwas Li im Urknall
- Stellare Nukleosynthese
- Explosive Nukleosynthese in Supernova-Explosionen
- Galaktische Nukleosynthese: Bildung von Li, Be und B durch Wechselwirkung mit kosmischer Strahlung

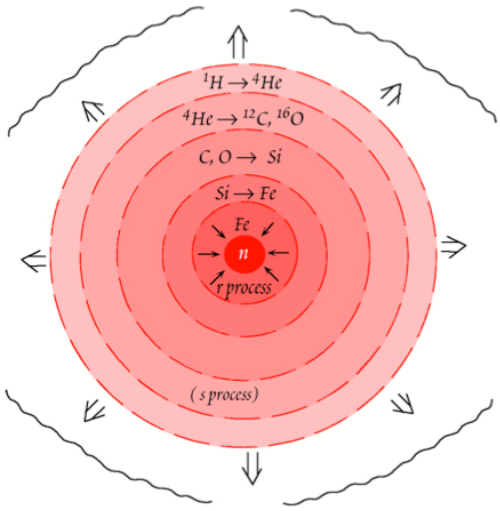
Stellare Nukleosynthese - Entwicklung von Sternen



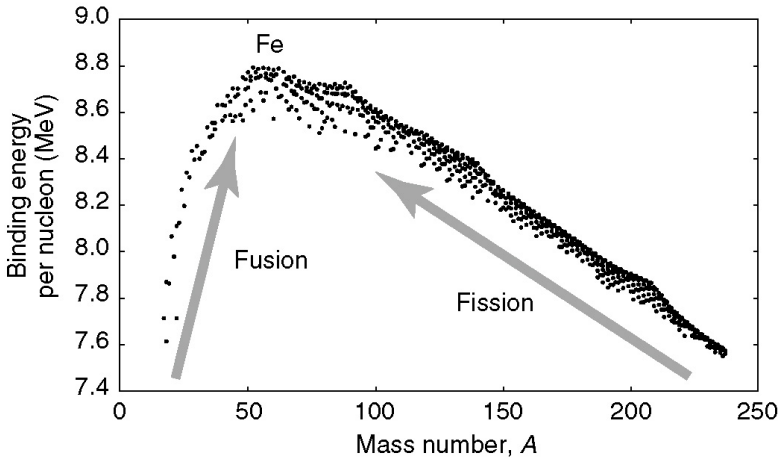
- Klassifikation nach Farbe (= Absorptionsspektrum = Temperatur)
- Heiße Sterne (O) leuchten stärker als kalte (M)
- Meisten Sterne (ca. 90 %) befinden sich auf der Hauptreihe
- Hauptreihensterne erzeugen Energie durch Verbrennung von H zu He

Stellare Nukleosynthese

- Hydrostatisches Gleichgewicht zwischen Gravitation und Strahlungsdruck
- Brennstoff im Kern des Sterns aufgebraucht $\rightarrow$ Kollaps $\rightarrow$ Temperaturerhöhung $\rightarrow$ Fusion zu schwereren Elementen
- Fusionsprozesse laufen sukzessive in Schalen ab
- Stellare Nukleosynthese endet mit Si-Brennen und der Synthese von Fe
- Massive Sterne ($> 8M_\odot$) explodieren in einer Supernova



Nukleosynthese von Elemente schwerer als Fe

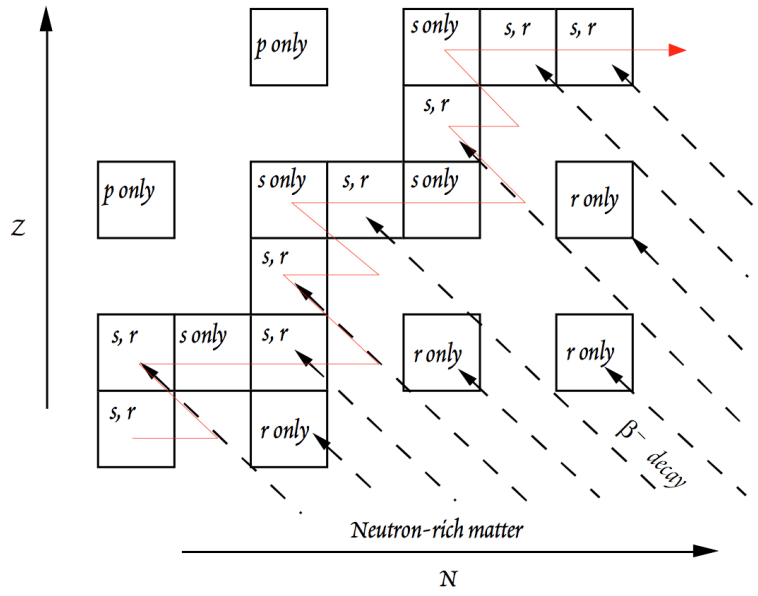


- Elemente schwerer als Fe entstehen nicht durch Kernfusion, da Energie verbraucht und nicht produziert werden würde
- Nukleosynthese durch Kernfusion endet bei Fe
- Elemente schwerer als Fe werden durch Neutroneneinfang synthetisiert

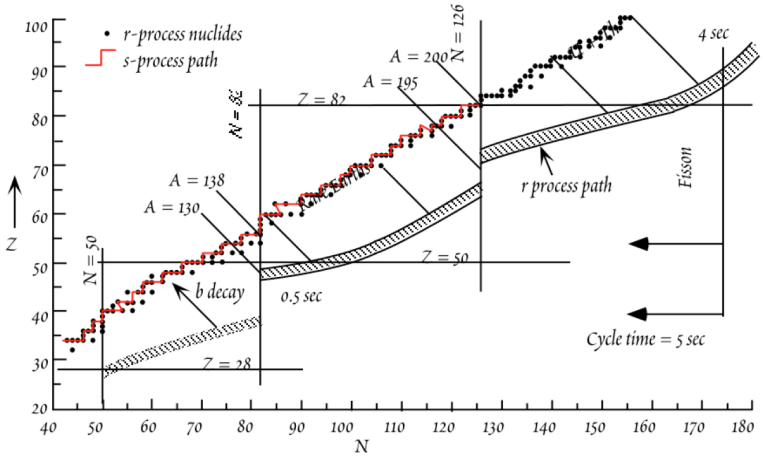
Nukleosynthese der schweren Elemente

- s-Prozeß: slow neutron capture in Roten Riesen (sog. AGB-Sterne)
- r-Prozeß: rapid neutron capture (Supernovae)
  - Wesentlicher Unterschied ist Geschwindigkeit des Neutroneneinfangs relativ zum Zerfall instabiler Nuklide:
  - s-Prozeß: Neutroneneinfang-Rate langsamer als β^--Zerfall
  - r-Prozeß:Neutroneneinfang-Rate schneller als β^--Zerfall
- p-Prozeß: proton capture
  - Entstehung Protonen-reicher Isotope durch Protonen-Einfang
  - Coulomb-Abstoßung muss überwunden werden
  - Photodisintegration: γ-Strahlung entfernt Neutron aus Kern
  - rp-Prozeß: rapid proton capture bei sehr hohen Temperaturen

s-, r- und p-Prozeß



Explosive Nukleosynthese - r-Prozeß



- Nach Abklingen des Neutronenfluß (nach ca. 100 Sek.), zerfallen die Nuklide durch β^--Zerfall in Richtung des Tals der Stabilität
- Bei magischen Neutronenzahlen 50, 82 und 126 (geschlossene Neutronenschale) sinkt die Wahrscheinlichkeit einer weiteren Neutronenanlagerung, der r-Prozess verlangsamt sich kurz, so daß die Häufigkeit dieser Nuklide erhöht ist

Zusammenfassung

- Stabilität von Nukliden gegeben durch deren Bindungsenergie. Diese hängt maßgeblich von der starken Wechselwirkung zwischen zwei benachbarten Nukleonen und der Coulomb-Abstoßung zwischen den Protonen ab.
- Nur bestimmte Kombinationen von N und Z sind stabil. Für kleine A gilt $N = Z$, für große A ist $N > Z$. Neutronenanreicherung erhöht die Stabilität bei schweren Nukliden, da hier die Coulomb-Abstoßung immer größer wird.
- ^{56}Fe hat die höchste Bindungsenergie und ist daher das stabilste Nuklid. Elemente schwerer als Fe können somit nicht durch Kernfusion erzeugt werden. Diese werden durch Neutroneneinfang in Sternen und Supernova-Explosionen erzeugt.

Zusammenfassung

