Bildung der Planeten und Verteilung der Elemente

Thorsten Kleine

Einführung in die Geochemie

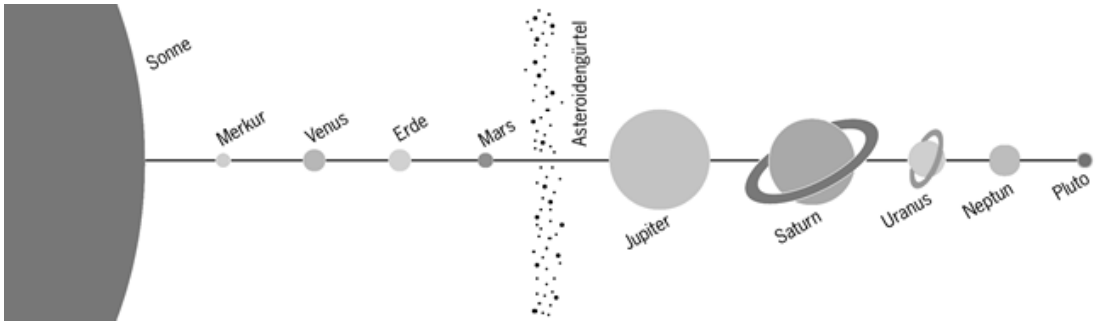
Überblick

- Entstehung und Aufbau des Sonnensystems
- Der solare Nebel und die Bildung und Zusammensetzung der Planeten
- Meteorite: Klassifikation und Bedeutung der Chondrite
- Geochemische Eigenschaften und Verteilung der Elemente in Planeten

Literatur:

- White: Geochemistry, Kap. 1.4, Seiten 6-15
- White: Geochemistry, Kap. 7.2, Seiten 270-272
- White: Geochemistry, Kap. 10.3, Seiten 442-456 (in Auszügen)

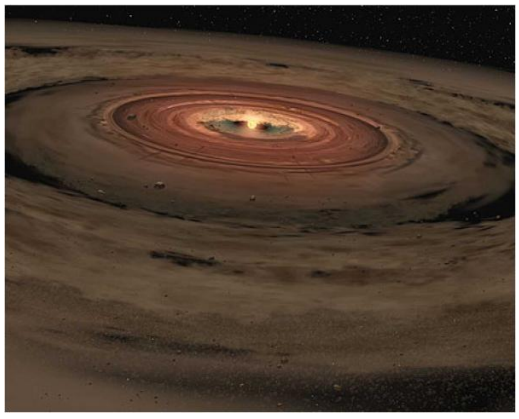
Aufbau des Sonnensystems



- Vier innere, terrestrische Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars)
- Vier äußere Planeten: Gas- und Eisriesen (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun)

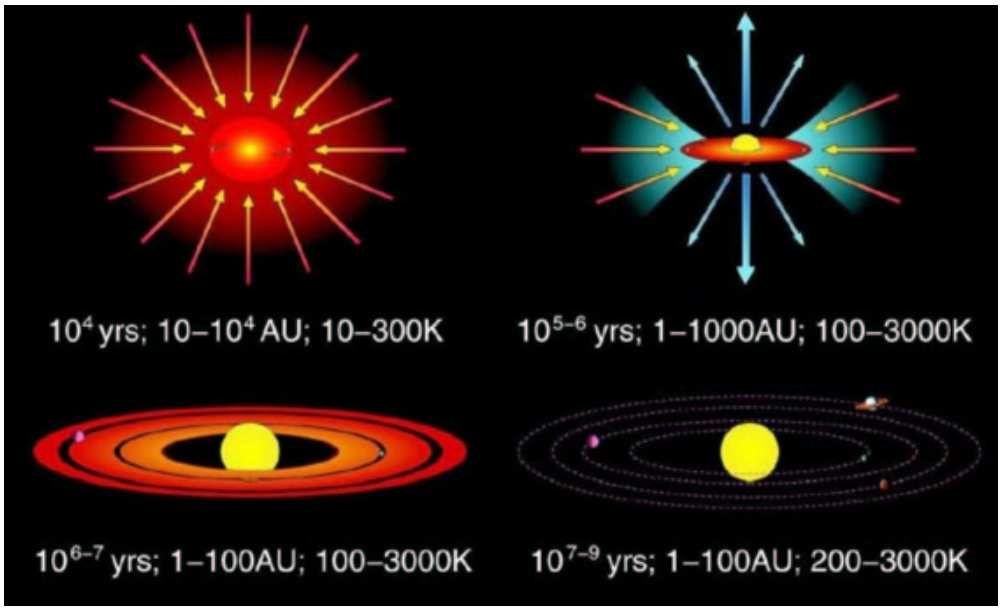
Entstehung des Sonnensystems



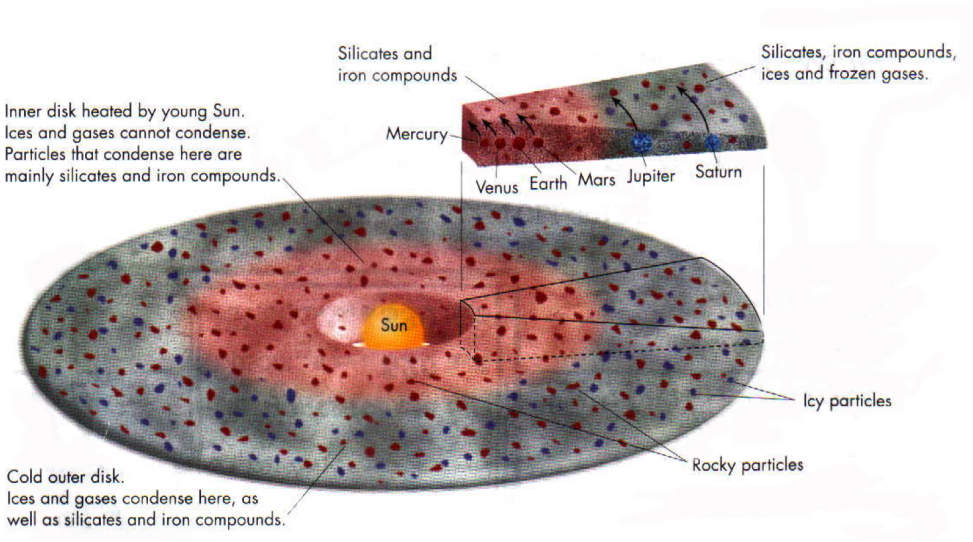


- Kollaps einer interstellaren molekularen Wolke
- Bildung der Sonne, umgeben von protoplanetarer Akkretionsscheibe (solarer Nebel)
- Akkretion der Planeten aus solarem Nebel

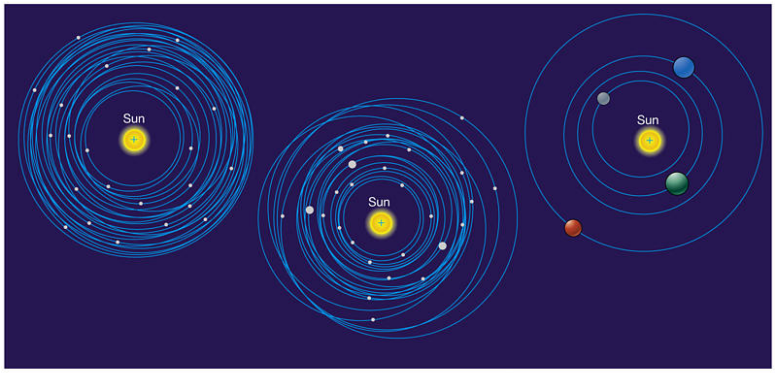
Entstehung des Sonnensystems



Der solare Nebel – Struktur



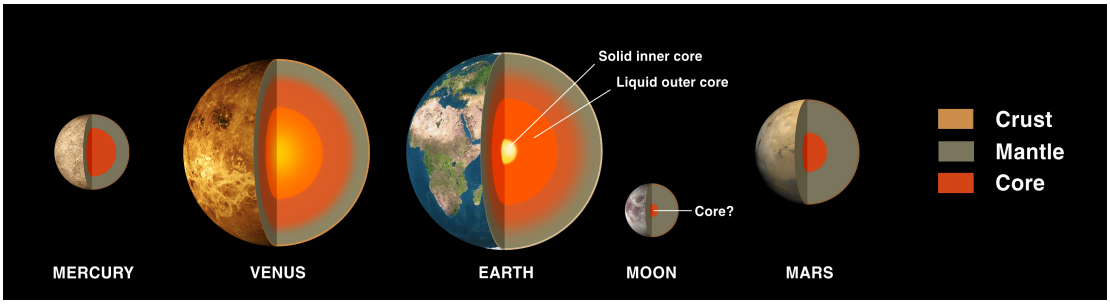
Entstehung der terrestrischen Planeten in drei Stufen



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

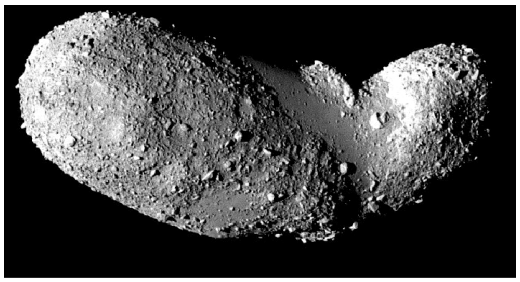
1. Akkumulation von Staub in km-große Planetesimale (< 1 Myr)
2. Mond- bis Mars-große Embryos durch Kollision zwischen Planetesimalen (~ 1 Myr)
3. Terrestrische Planeten durch Kollisionen zwischen Embryos (~ 100 Myr)

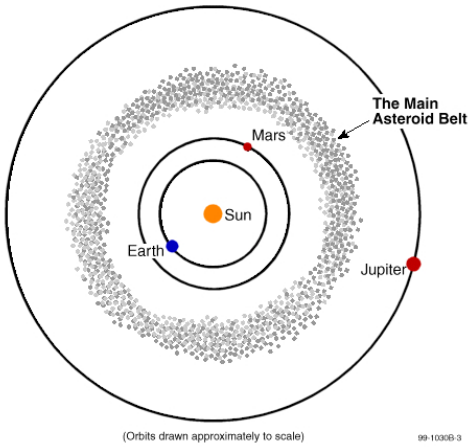
Innerer Aufbau der terrestrischen Planeten



- Chemisch differenziert in metallischen Kern und silikatischen Mantel
- Wärmequellen: Kollisionen, Zerfall von ^{26}Al

Asteroide





- Asteroiden-Gürtel zwischen Mars und Jupiter
- Durch gravitativen Einfluß von Jupiter konnte hier kein Planet entstehen
- Fragmente aus der Frühzeit der Planetenentstehung

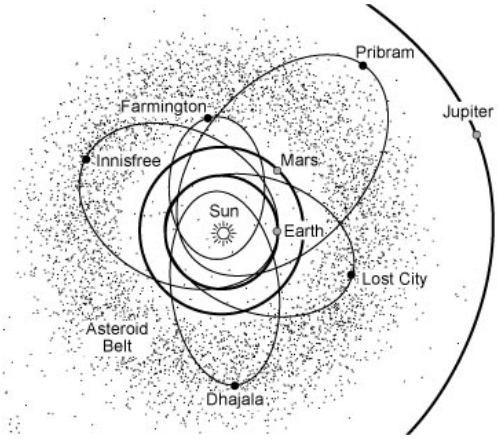
Asteroide und Meteorite

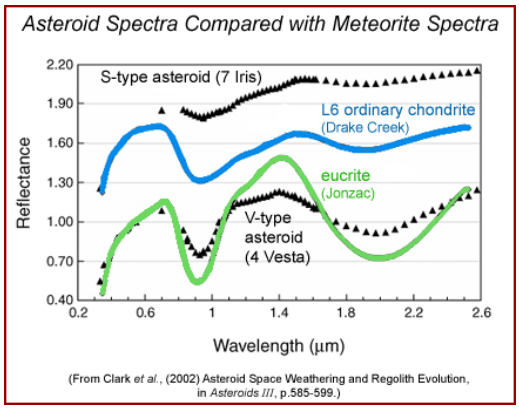




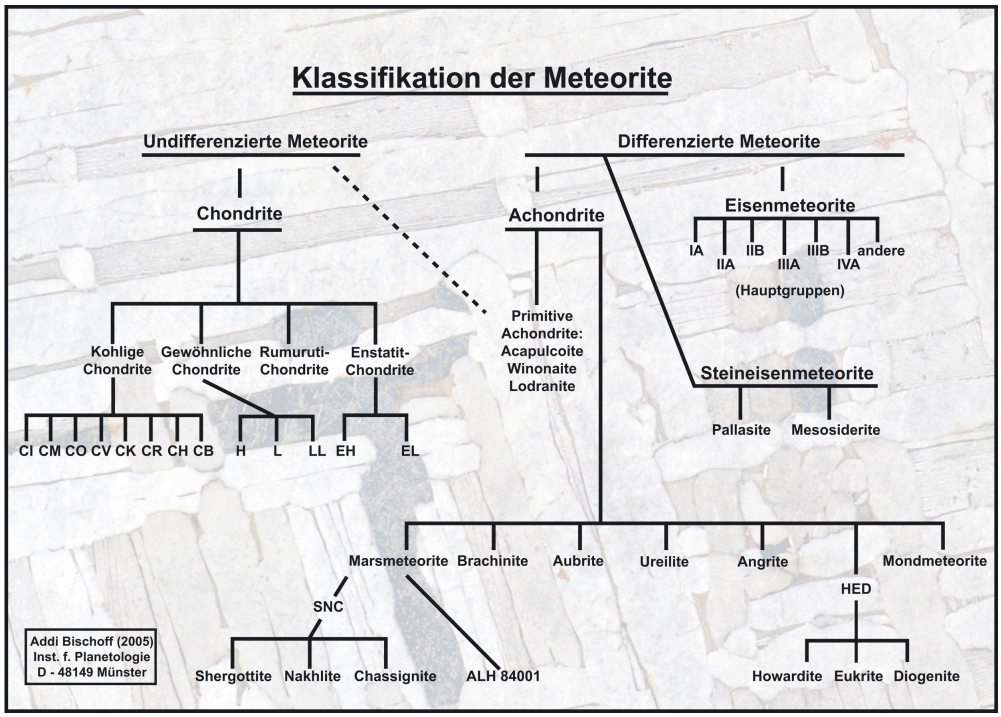
- Meteorite sind Gesteine von planetaren Körpern, die auf die Erde gefallen sind
- Meiste Meteorite kommen von den Asteroiden
- Einige Meteorite von Mond und Mars

Herkunft der Meteorite



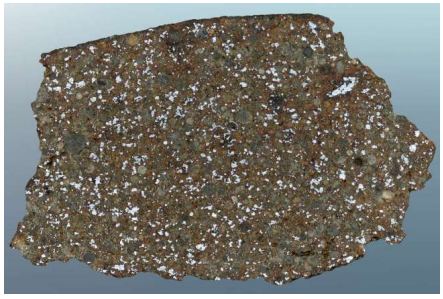


Meteoriten-Klassifikation

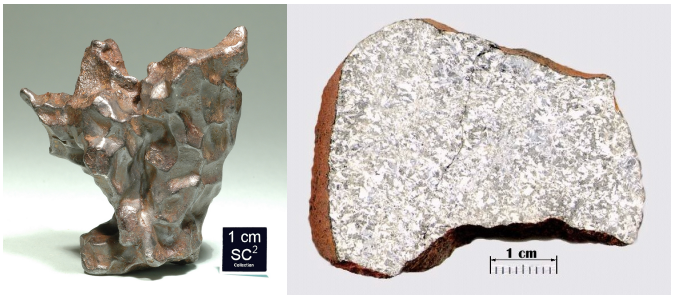


Klassifikation beruht auf chemischer Zusammensetzung und Textur

Meteoriten-Klassifikation - Textur

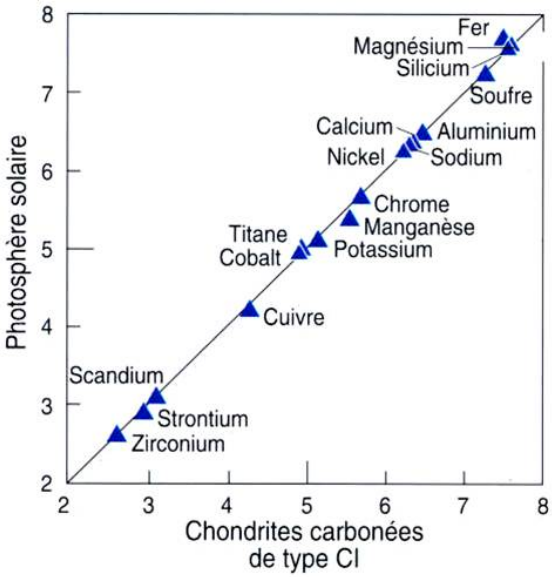


Undifferenzierte Meteorite:
Homogene Verteilung von Metall und Silikat

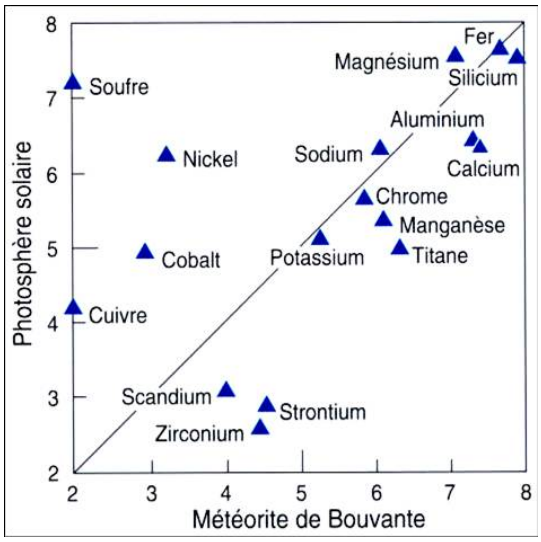


Differenzierte Meteorite:
Trennung von Metall und Silikat

Meteoriten-Klassifikation - Chemismus

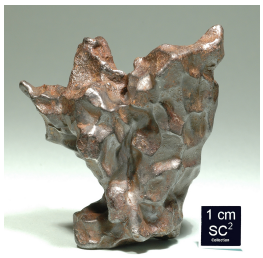


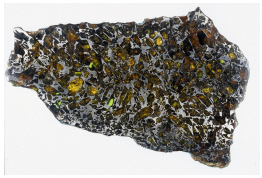
Undifferenzierte Meteorite:
Gleiche Zusammensetzung wie die Sonne



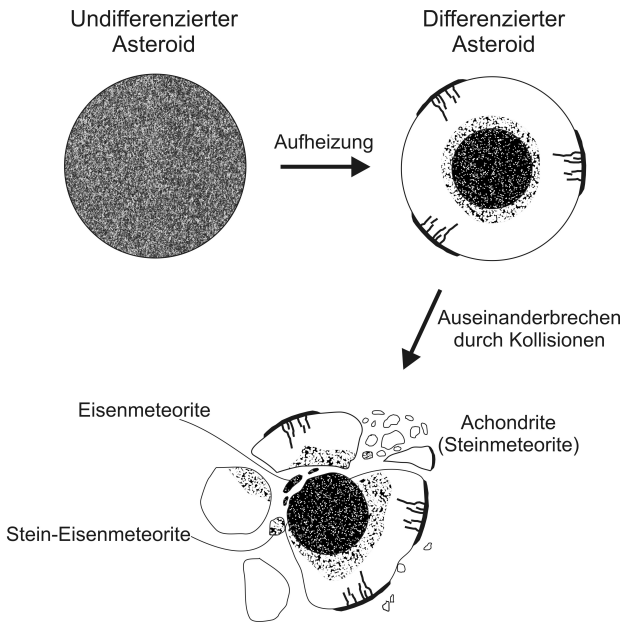
Differenzierte Meteorite:
Zusammensetzung verändert durch Metall-Silikat-Trennung

Differenzierte Meteorite









Undifferenzierte Meteorite - Chondrite

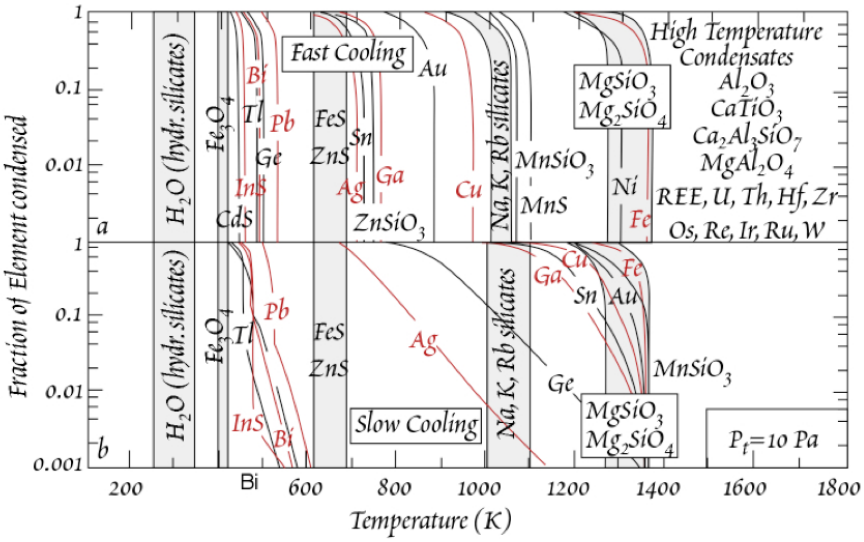




Bestehen aus Komponenten, die sich im solaren Nebel gebildet haben:

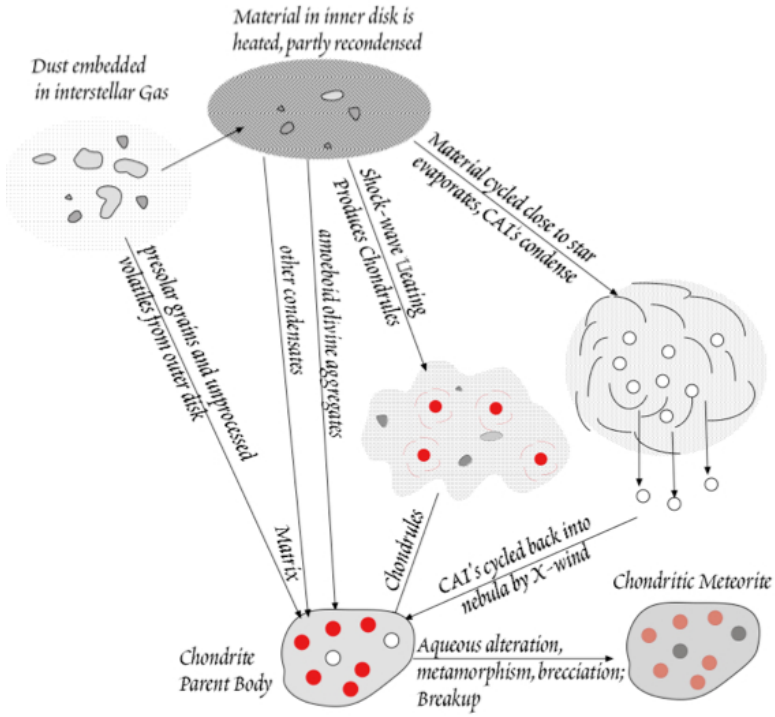
- Ca-Al-reiche Einschlüsse (CAI): Hochtemperatur-Kondensate (Alter = 4.567 Ga)
- Chondren: Schmelzkügelchen (Fe-Mg-Silikate); durch Aufschmelzung von Staub entstanden
- Matrix: Enthält unprozessierten, präsolaren Staub

Kondensationssequenz - Kosmochemische Klassifikation



- T $>$ 1350 K: **Refraktäre** Elemente
- 1350 - 1250 K: Kondensation von Mg, Si, Fe $\rightarrow$ **Hauptkomponente**
- 1250 - 640 K: **Moderat volatile Elemente**
- T $\sim$ 640 K: Kondensation von FeS
- T $<$ 640 K: Hoch-volatile Elemente

Akkretion der Chondrit-Mutterkörper



Urey-Craig-Diagramm

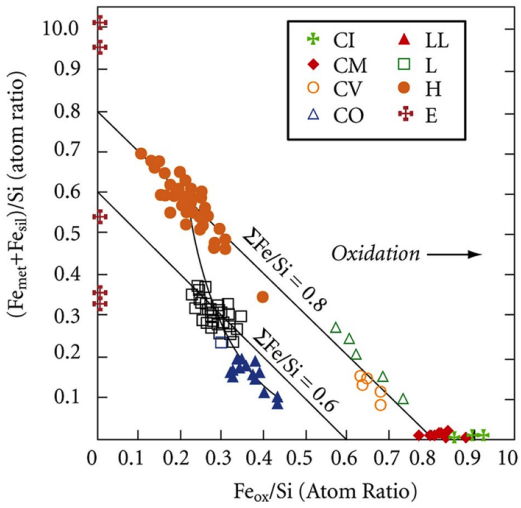
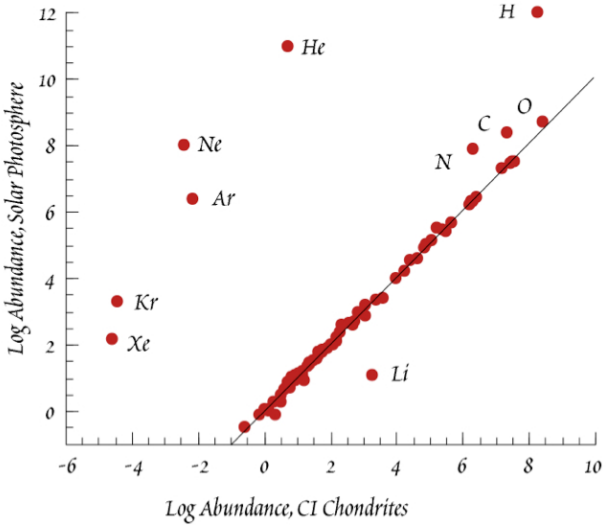


Figure 10.13 Ratio of reduced and oxidized iron to Si in chondrites. Carbonaceous and H group chondrites have approximately equal ΣFe/Si ratios; L and LL groups are iron-depleted. Wasson (1974). With kind permission of Springer Science+Business Media.

Geochemistry, First Edition. William M. White.
© 2013 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

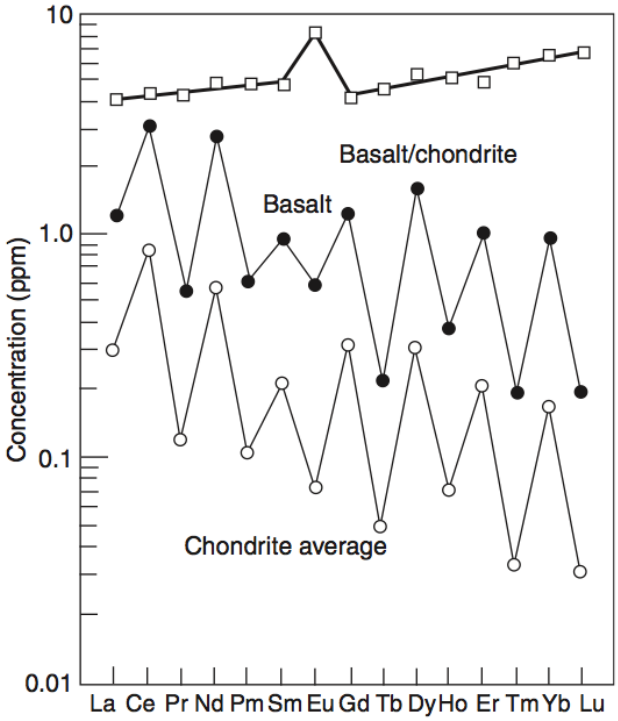
Bedeutung der Chondrite



- CI-Chondrite und Sonne haben ±identische Zusammensetzung
- Hoch-volatile Elemente verarmt in Chondriten
- Li verarmt in der Sonne
- Zusammensetzung: CI-Chondrite = Sonne = Sonnensystem

→ Chondritische Zusammensetzung wichtigste Referenz-Zusammensetzung: jede Abweichung von chondritischer Zusammensetzung geht auf einen geochemischen Prozess zurück (z.B. Kernbildung, Volatil-Verarmung, partielles Schmelzen,...)

Normierung auf Chondrite



Differenzierte Meteorite - Achondrite

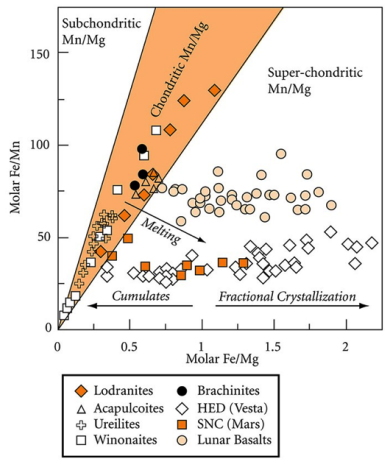
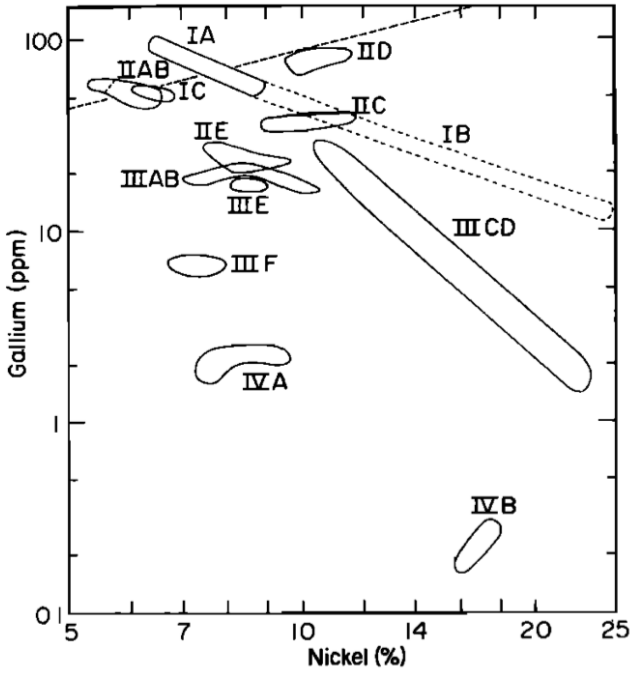


Figure 10.16 Variation in Fe/Mn and Fe/Mg ratios in achondrites and lunar basalts. Primitive achondrites are variably depleted in Fe, but have Mn/Mg ratios similar to chondrites. The HED and SNC chondrites, like lunar basalts, have superchondritic Mn/Mg ratios and higher Fe/Mg ratios than primitive achondrites as a consequence of their igneous origin. Data from Goodrich and Delaney (2000).

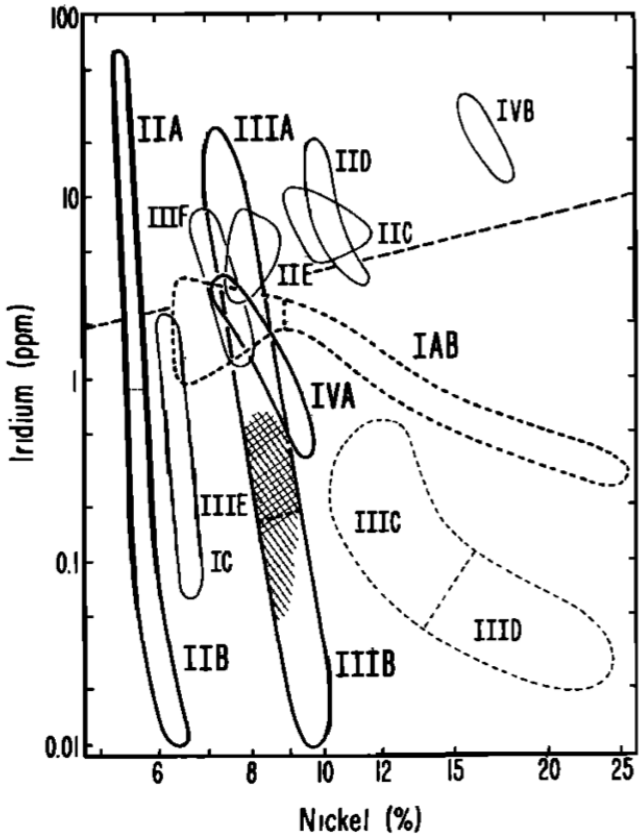
Geochemistry, First Edition. William M. White.
© 2013 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

Differenzierte Meteorite - Eisenmeteorite



- Gruppen I – IV: abnehmender Gehalt an moderat-volatilen Elementen (Bsp. Ga)

Differenzierte Meteorite - Eisenmeteorite



- Fraktionierte Kristallisation metallischer Schmelzen
  $\Rightarrow$ magmatische Gruppen
  $\Rightarrow$ Kern differenzierter Planetesimale
- Nicht-magmatische Gruppen: IAB; IIICD

Verteilungsgesetze der Elemente nach V.M. Goldschmidt

- V.M. Goldschmidt (1938): Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente
- Basiert i.W. auf der Elementverteilung in Meteoriten, zwischen Metall, Sulfide (Troilit) und Silikate
- Terrestrische Proben: Elemente, die bevorzugt in Metallen oder Sulfiden vorkommen sind verarmt
- Daraus hat Goldschmidt geschlussfolgert, dass die Erde diese Elemente in den metallischen Kern verloren hat
- Aufgrund der Elementverteilung in Meteoriten hat Goldschmidt die geochemische Klassifikation der Elemente aufgestellt

Geochemische Klassifikation der Elemente

Table 7.1 Goldschmidt's classification of the elements.

Siderophile	Chalcophile	Lithophile	Atmophile
Fe*, Co*, Ni*	(Cu), Ag	Li, Na, K, Rb, Cs	(H), N, (O)
Ru, Rh, Pd	Zn, Cd, Hg	Be, Mg, Ca, Sr, Ba	He, Ne, Ar, Kr, Xe
Os, Ir, Pt	Ga, In, Tl	B, Al, Sc, Y, REE	
Au, Re†, Mo†	(Ge), (Sn), Pb	Si, Ti, Zr, Hf, Th	
Ge*, Sn*, W‡	(As), (Sb), Bi	P, V, Nb, Ta	
C‡, Cu*, Ga*	S, Se, Te	O, Cr, U	
Ge*, As†, Sb†	(Fe), Mo, (Os)	H, F, Cl, Br, I	
	(Ru), (Rh), (Pd)	(Fe), Mn, (Zn), (Ga)	

* Chalcophile and lithophile in the Earth's crust.
† Chalcophile in the Earth's crust.
‡ Lithophile in the Earth's crust.

- Lithophil: bevorzugen Silikatschmelze
- Siderophil: bevorzugen Metallschmelze
- Chalkophil: bevorzugen Sulfidschmelze
- Atmophil: bevorzugen Gasphase

Geochemische Klassifikation der Elemente

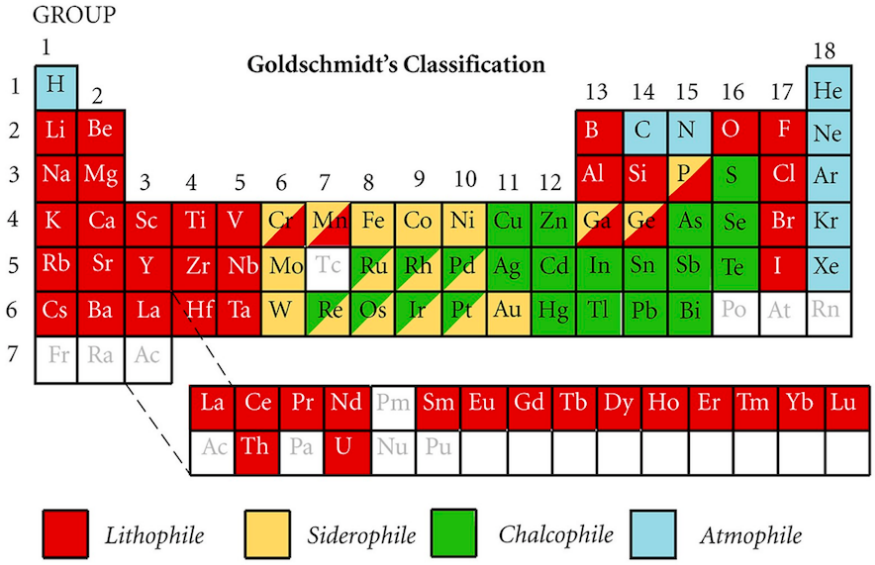


Figure 7.2 Goldschmidt's classification of the elements.

Geochemistry, First Edition. William M. White.
© 2013 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

- Lithophil: hohe oder niedrige Elektronegativität; bevorzugt ionische Bindung
- Siderophil und chalkophil: mittlere Elektronegativität; bevorzugt kovalente oder metallische Bindung

Geochemische Klassifikation der Elemente

Table 7.2 Free energy of formation of some oxides.

Oxide	$-\Delta G_f^\circ$(kJ/ mole/oxygen)	Oxide	$-\Delta G_f^\circ$(kJ/ mole/oxygen)
CaO	604.0	In_2O_3	304.2
ThO_2	584.6	SnO_2	260.0
MgO	569.4	*FeO*	*245.9*
Al_2O_3	527.3	WO_3	247.3
ZrO_2	521.6	CdO	221.9
CeO_2	512.6	NiO	211.6
TiO_2	444.7	MoO_3	215.4
SiO_2	428.1	Sb_2O_3	207.9
Na_2O	398.3	PbO	189.3
Ta_2O_3	374.0	As_2O_3	180.1
MnO	362.8	Bi_2O_3	168.8
Cr_2O_3	353.1	CuO	127.6
ZnO	318.4	Ag_2O_3	10.9

- Lithophil: hohes $-\Delta G_f^0$; d.h. Oxid stabiler als Metall
- Siderophil: $-\Delta G_f^0$ ähnlich dem von FeO
- Chalkophil: niedriges $-\Delta G_f^0$
- Beispiel: $Fe + MgO \rightleftharpoons FeO + Mg$
  - $\Delta G_R = \Delta G_f(FeO) - \Delta G_f(MgO)$
  - $\Delta G_R = -245.9 kJ/mol - (-569.4 kJ/mol) = +350.5 kJ/mol$
  - Reaktion findet nicht statt, d.h. Mg ist lithophil

Zusammenfassung

- Sonnensystem durch Kollaps einer molekularen Wolke entstanden
- Sonne im Zentrum, umgeben von einer Scheibe aus Gas und Staub (solare Nebel)
- Planeten im inneren Sonnensystem gebildet durch Akkretion von Staub und anschließende Kollisionen zu immer größeren Körpern
- Asteroiden-Gürtel zwischen Mars und Jupiter: Quelle der meisten Meteorite
- Chondrite haben gleiche chemische Zusammensetzung wie die Sonne (= Sonnensystem = solarer Nebel = Ausgangszusammensetzung der Planeten)
- Chondrite wichtige Referenzproben für die Normierung von Spurenelementen
- Verteilung zwischen den Reservoiren eines Planeten beschrieben durch Goldschmidtsche Klassifikation der Elemente in lithophil, siderophil, chalkophil und atmophil