

FRAKTIONIERUNGSPROZESSE IM FROHEN SONNENSYSTEM

von

G. Kurat +)

(eingelangt am 5. Mai 1987)

Zusammenfassung

Die primitivsten Gesteine unseres Sonnensystems, die Chondrite, bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten wie Chondren, Gesteins- und Mineralfragmenten, Mineralaggregaten u.a.m.. Geochemische, isotopengeochemische und petrologische Untersuchungen dieser Komponenten zeigen, daß sie eine individuelle Geschichte haben und daß die Materie des solaren Nebels vor der Akkretion einer Reihe von chemisch-physikalischen Prozessen ausgesetzt war. Die wichtigsten davon sind: Isotopen-Fraktionierung im prä-solaren Nebel bei tiefen Temperaturen (z.B. $^{12}\text{C} - ^{13}\text{C}$ oder $^1\text{H} - ^2\text{H}$), Bildung von Mineralaggregaten, Erwärmung mit Rekristallisation, Aufschmelzung und Verdampfung, Rekondensation und metasomatische Veränderungen (Austauschreaktionen mit lokalem Gas) im abkühlenden Nebel. Die Hochtemperatur-Prozesse waren wahrscheinlich mehrfach aktiv, was auf turbulente Verhältnisse im solaren Nebel hinweist. Die Akkretion der Komponenten zu Chondriten (und Chondriten-Mutterkörpern) erfolgte bei unterschiedlich tiefen Temperaturen für die verschiedenen Meteoritenklassen. Die Erde akkretierte offensichtlich bei höheren Temperaturen, wesehalb sie an volatilen Elementen gegenüber den Chondriten verarmt ist.

Summary

The most primitive rocks of the solar system, the chondrites, consist of a variety of components like chondrules, rock and mineral fragments, mineral aggregates and others. Geochemical, isotope geochemical, and petrological investigations of these components show that each of them had its own genetic history and that a variety of processes were acting upon them before accretion occurred. The most important processes identified sofar are: isotopic fractionations at low temperatures in the pre-solar nebula (e.g. $^{12}\text{C} - ^{13}\text{C}$ or $^1\text{H} - ^2\text{H}$), formation of mineral aggregates, heating causing recrystallization, melting and evaporation, recondensation and solid-gas exchange reactions (metasomatism) in the cooling nebula apparently were active repeatedly indicating turbulent conditions in the solar nebula. Accretion of the components to form chondrites (and chondrite parent bodies) took place at lower temperatures which were different for different chondrite classes. The Earth apparently accreted at somewhat higher temperatures which is probably the cause for the depletion of volatile elements in the Earth.

Einführung

Die Meteorite sind die wichtigsten Proben aus unserem Sonnensystem, welche wir im Labor nach allen Regeln der Kunst untersuchen können. Sie sind fast durchwegs sehr alt, mit rund 4,5 Milliarden Jahren so alt wie das Sonnensystem selbst. Die Er-

+) Anschrift des Verfassers:
Dr. Gero Kurat
Naturhistorisches Museum Wien
Burgring 7, A-1010 Wien

forschung ihrer Entstehung kann uns daher helfen, die chemisch-physikalischen Bedingungen im frühen Sonnensystem zu ergründen und die Prozesse kennenzulernen, welche während der Entstehung unseres Sonnensystems wirksam waren.

Es gibt eine überraschend große Zahl verschiedener Meteorite (siehe DODD, 1981). Diese können nach ihrem Mineralgehalt und ihrer chemischen Zusammensetzung drei Hauptklassen zugeordnet werden. Nach den Gehalten an Nickeleisen und Silikat lassen sich unterscheiden:

Eisenmeteorite
Stein-Eisen-Meteorite
Stein-Meteorite

Jede dieser Klassen enthält eine Vielzahl von Gesteinen recht unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen und Strukturen. Die Stein-Meteorite umfassen zwei sehr unterschiedliche Gesteine: die Chondrite und die Achondrite. Die Chondrite sind charakterisiert durch das Vorhandensein von "Chondren", sphärische Objekte mit einem Durchmesser von um 1 mm. Die Achondrite sind frei von Chondren und haben meist magmatische Struktur (z.B. ähnlich irdischen Basalten).

Chondrite

Die Chondrite sind mit 85 % aller Meteoritenfälle die bei weitem häufigste Klasse. Und sie sind die primitivsten Gesteine, die wir aus dem Sonnensystem kennen. Primitiv bedeutet, daß sie die ältesten Gesteine sind und daß sie eine chemische Zusammensetzung haben, die direkt vergleichbar mit der Zusammensetzung der Sonne haben, die direkt vergleichbar mit der Zusammensetzung der Sonne ist: Die Elementhäufigkeiten in den Chondriten entsprechen jenen des kondensierbaren Anteils der Sonnenmaterie (ca. 0.1 Atom-%), die ja hauptsächlich aus nicht-kondensierbarem Wasserstoff und Helium besteht (siehe NOYES, 1982).

Trotz der ähnlichen chemischen Zusammensetzung der Chondrite sind sie mineralogisch sehr verschieden. Dies kommt daher, daß sie unter verschiedenen Redox (Reduktion - Oxidation)-Bedingungen und Temperaturen entstanden sind. Wir unterscheiden aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung kohlige Chondrite, gewöhnliche Chondrite (die bei weitem häufigsten) und Enstatit Chondrite. Die kohligen Chondrite (vom Typ I, kurz CI) sind voll oxidiert und reich an volatilen Elementen (z.B. Wasserstoff). Dementsprechend bestehen sie aus komplexen wasserhaltigen Schichtsilikaten, z.B. $(Mg,Fe)_6Si_4O_{10}(OH)_8$, Sulfaten (z.B. Epsomit, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) und führen Magnetit (Fe_3O_4).

Die gewöhnlichen Chondrite sind teil-reduziert, d.h. daß z.B. das Eisen in drei verschiedenen Phasen vorkommt: als Metall, als Sulfid und im Silikat (als FeO gelöst). Diese Chondrite bestehen hauptsächlich aus Olivin, $(Mg,Fe)_2SiO_4$, Orthopyroxen, $(Mg,Fe)SiO_3$, Troilit, FeS , und Metall (Fe-Ni-Legierung).

Die Enstatit Chondrite sind sehr stark reduziert und bestehen daher aus FeO -freiem Enstatit, $MgSiO_3$, komplexen Sulfiden (Fe-, Ca-, Mn-, Mg-Sulfiden) und Metall (Fe-Ni-Si-Cr-Legierung).

Alle Chondrite sind chaotische, komplexe Gesteine, trotz relativ einfacher mineralogischer Zusammensetzung. Sie sind Mikrobrekzien und bestehen aus Gesteins- und Mineralbruchstücken, Chondren und manchmal auch einer feinkörnigen Matrix (Abb.1). Die einzelnen Bestandteile sind offensichtlich chemisch differenziert, da sie die verschiedenen Hauptminerale in höchst unterschiedlichen Proportionen enthalten. So finden sich Chondren und Gesteinsfragmente, welche nur aus Olivin, und alle Übergänge zu solchen, welche nur aus Pyroxen bestehen. Ähnliches kann man mit den Proportionen von Olivin/Pyroxen zu Glas beobachten. Auch die Gehalte an Neben- und Spurenelementen der einzelnen Chondritenbestandteile variieren meist in einer chaotischen Art und Weise und zeigen nur selten Korrelationen. In der Abb.2 sind einige Daten von Chondren aus dem Chondriten Chainpur zusammengefaßt.

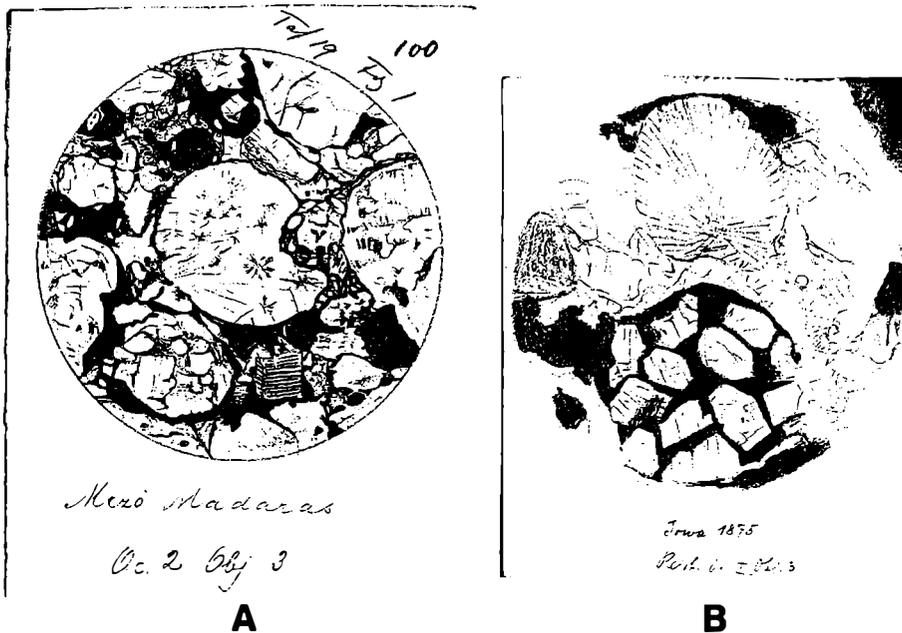


Abb.1: Mikroskopische Struktur der Chondrite Mezö-Madaras (A) und Homestead (= Iowa) (B). Chondren und Fragmente unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung sind als Mikrobrekzie vereinigt. Pyroxenreiche Chondren (im Zentrum von A und radialstrahlig in B) kommen neben olivinreichen Objekten (z.B. Olivin-Balkenstapel in A und porphyritische Olivin-Chondre mit dunkler Matrix in B) vor. Original Bleistiftzeichnungen von G. Tschermak (zu TSCHERMAK, 1883) aus dem Archiv der Mineralogisch-Petrographischen Abteilung des Naturhistorischen Museums Wien. Die größten Objekte messen etwa 1,5 mm.

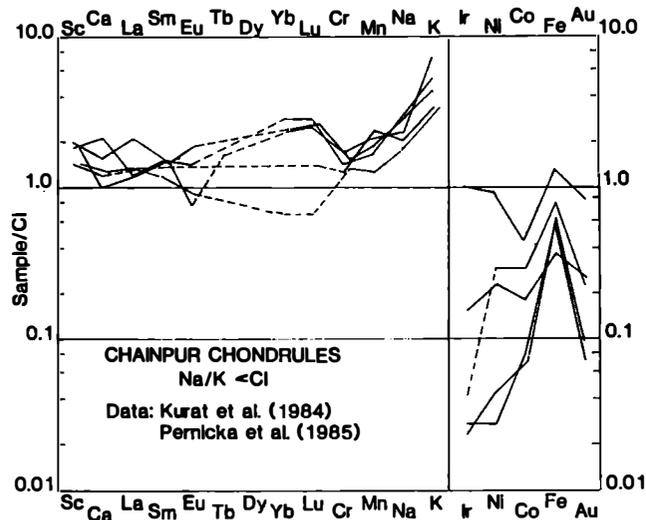


Abb.2: Spurenelement-Gehalte von K-reichen Chondren aus dem Chondriten Chainpur (KURAT et al., 1984; PERNICKA et al., 1985) normiert auf die Häufigkeiten in CI-Chondriten (PALME et al., 1981). Die lithophilen (links) und die siderophilen Elemente (rechts) sind nach zunehmender Volatilität von links nach rechts geordnet. Strichlierte Linien signalisieren unvollständige Daten oder Obergrenzzehalte.

Die Daten, welche mittels Instrumenteller Neutronenaktivierungs-Analyse (INAA) an den ca. 1 mm großen Chondren gewonnen wurden, sind auf die Elementhäufigkeiten in den Kohligen Chondriten vom Typ I (CI) normiert, wodurch Abweichungen von der primitiven chemischen Zusammensetzung sofort sichtbar werden. Im linken Teil der Abb.2 sind die lithophilen Elemente zusammengefaßt, also jene Elemente, welche bevorzugt in die Oxid- und Silikatphasen eingebaut werden. Die Elemente sind nach zunehmender Volatilität von links nach rechts geordnet. Links finden sich also die refraktären Elemente (niedriger Dampfdruck) wie Sc, Ca, La usw. und rechts die volatilen Elemente (hoher Dampfdruck) wie Mn, Na und K. Wir sehen sofort, daß die meisten Chondren reicher an lithophilen Elementen sind, als die primitiven CI Chondrite. Wir sehen weiters, daß die Häufigkeiten der einzelnen Elemente in den einzelnen Chondren sehr stark variieren. Eine Systematik dieser Variabilitäten ist nicht zu erkennen, außer jener, welche zur Auswahl dieser Chondren führte. Es wurden hier nur die K-reichen Chondren ausgewählt und diese zeigen mehr oder weniger ähnliche Na-K-Beziehungen. Die chaotische Variabilität der Elemente in den Chondren (in Aggregaten und Gesteinsfragmenten ist das Bild ähnlich) lassen nur einen Schluß zu: Die Bestandteile der Chondrite wurden aus prä-existenten Mineralkörnern durch Aggregation von Zufallsmischungen gebildet. Damit sind zwei wichtige Theorien zur Entstehung der Chondren, nämlich die Kondensationstheorie (Bildung von Schmelztröpfchen durch direkte Kondensation aus dem solaren Nebel, WOOD 1963) und die Vulkantheorie (Schmelztröpfchen als Auswurfprodukte von Vulkanen, TSCHERMAK 1875) widerlegt, da diese beiden Prozesse nur relativ homogene Tröpfchen bilden können (z.B. Chondre All-SHE in Abb.4). Die Abb. 2 zeigt noch einen interessanten Aspekt der Chondrenbildung auf: Die volatilen Elemente Mn, Na und K sind nicht verarmt, obwohl man das erwarten müßte, da diese Elemente aus kleinvolumigen Schmelzen ($T \sim 1500$ K) im solaren Nebel ($p \lesssim 10^{-3}$ atm) in Sekundenschnelle verdampfen müßten. Die relativ häufig vorkommenden volatilreichen Chondren dokumentieren, daß der Schmelzprozeß (Mineralaggregate werden zu Chondren geschmolzen) nicht in einem Gas solarer Zusammensetzung stattfand, sondern bei höherem Gesamtdruck und bei hohem Partialdruck der volatilen Elemente. Die Chondrenbildung erfolgte also in einer vom solaren Nebel abgekoppelten, fraktionierten Atmosphäre.

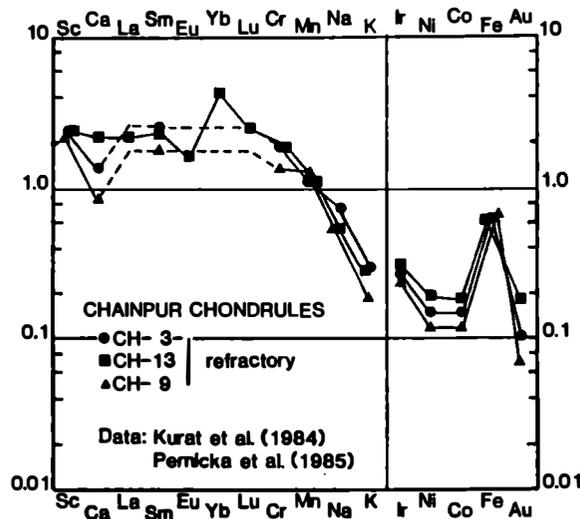


Abb.3: Spurenelement-Gehalte von refraktären Chondren aus dem Chainpur Chondriten (KURAT et al., 1984; PERNICKA et al., 1985) normiert auf die Häufigkeiten in CI-Chondriten (PALME et al., 1981). Anordnung der Elemente wie in Abb.2.

In allen Chondriten finden sich jedoch auch Chondren, welche die erwartete Dampfraktionierung zeigen. In Abb.3 sehen wir die Elementhäufigkeit in drei refraktären Chondren aus dem Chondriten Chainpur. Wir sehen wiederum die Anreicherung der lithophilen Elemente und ihre chaotische Variabilität. Im Gegensatz zu Abb.2 sehen wir jedoch bei den volatilen Elementen eine zunehmende Verarmung mit zunehmender Volatilität von Mn über Na zu K. Diese Chondren wurden also ebenfalls durch Aufschmelzen von Mineralaggregaten gebildet, die Aufschmelzung erfolgte jedoch entweder in einer Atmosphäre mit niedrigen Partialdrücken der volatilen Elemente oder die Schmelze war stark überhitzt. Letzteres ist wahrscheinlicher, da alle diese Chondren sogenannte Balkenolivin-Chondren sind, was bedeutet, daß sie nur aus einem Olivin-Kristall mit etwas Matrix bestehen (siehe Balken-Olivin-Fragment in Abb.1A). Eine solche Struktur signalisiert totales Aufschmelzen mit folgender Unterkühlung und Kristallisation der gesamten Chondre vom ersten Olivin-Keim (TSUCHIYAMA und NAGAHARA, 1981). Diese Chondren demonstrieren, daß es keine einheitlichen Schmelzbedingungen für alle Bestandteile eines Chondriten gab, sondern daß jeder einzelne Baustein seine eigene Geschichte hat. Dies ist nur möglich bei statistischen Prozessen, wie z.B. Impakts auf Protoplaneten (FREDRIKSSON, 1963; KURAT, 1967) oder turbulenten Gasbewegungen im solaren Nebel (MORFILL, 1985). Sehr extreme Fraktionierungen dieser Art sind in allen Chondriten durch die sogenannten Ca-Al-reichen Einschlüsse dokumentiert (KURAT, 1970). Diese Objekte können manchmal Chondren-ähnliche Formen haben, sind jedoch häufig komplexe amöboide Gebilde mit einer extremen Mineralogie: Sie bestehen hauptsächlich aus Spinell ($MgAl_2O_4$), Melilith ($Ca_2Al_2SiO_7$), Perowskit ($CaTiO_3$), Ca-Al-Ti-Pyroxen (Fassait) und Anorthit ($CaAl_2Si_2O_8$). Ihr Pauschalchemismus ist dementsprechend extrem gegenüber der normalen chondritischen Zusammensetzung fraktioniert. Die refraktären Elemente Ca, Al, Ti, Sc, Seltene Erden, Os, Ir, u.a. sind stark bis extrem angereichert und die volatilen Elemente sind entsprechend verarmt. Häufig ist die Anreicherung der refraktären Elemente um die 20xCI (das 20-fache des chondritischen Gehaltes), jedoch Extreme bis zu 10.000-facher Anreicherung wurden schon beobachtet (PALME et al., 1982). Diese Ca-Al-reichen Objekte haben noch eine Besonderheit: Sie enthalten viele Elemente mit Isotopenhäufigkeiten, welche anders sind als auf der Erde. Die Isotopen-Anomalien signalisieren, daß die Ca-Al-reichen Objekte in Chondriten nicht aus dem solaren Nebel stammen können (z.B. könnten sie der Mineralogie nach Hochtemperatur-Kondensate des solaren Nebels sein), sondern sonnensystemfremde Materie sein müssen. Tatsächlich können einige der Isotopen-Anomalien auf Elementsynthesen in Supernovae (explodierende Sterne) zurückgeführt werden (CLAYTON, 1978). Eine der auffallendsten und wichtigsten Isotopen-Anomalien der Ca-Al-reichen Objekte ist jene des Sauerstoffes. Die Objekte als Ganzes sind mit leichtem Sauerstoff (^{16}O) angereichert, was mit einer Herkunft aus einer ^{16}O -reichen Quelle (Supernova) erklärt werden kann. Obwohl alle diese Objekte unübersehbare Anzeichen einer Bildung bei sehr hoher Temperatur zeigen (kosmochemisch refraktäre Elemente und deren Verbindungen haben auch hohe Schmelzpunkte), zeigten Detailuntersuchungen, daß der Sauerstoff der verschiedenen Phasen nicht im Gleichgewicht ist. So haben die Spinelle bis zu 4 % mehr leichten Sauerstoff als die Materie unseres Sonnensystems und die koexistierenden Melilithe sind reich an normalem Sauerstoff. Die Erklärung für dieses Puzzle ist, daß die Melilithe höhere O-Diffusionsgeschwindigkeiten haben als die Spinelle, ihren Sauerstoff daher mit dem solaren Nebel austauschten, die Spinelle jedoch nicht. Bei den Ca-Al-reichen Objekten haben wir es also mit einer prä-solaren Materie zu tun, welche in das Sonnensystem eingedrungen ist, dort wohl zum Großteil verdampfte, jedoch teilweise erhalten blieb. Sehr effektive Verdampfungsprozesse waren wohl am Werk und führten in den meisten Fällen wahrscheinlich zur kompletten Verdampfung der prä-solaren Materie. Gibt es Verdampfung, so wird wenigstens ein Teil der verdampften Materie auch wieder kondensieren. Hinweise auf Kondensations-Prozesse finden sich viele, jedoch sind sie vielfach durch nachfolgende Sinter- und Schmelzprozesse verwischt. Nur ganz selten finden sich Relikte aus der Kondensationsphase, welche auch petrographisch als solche zu erkennen sind. Erst vor kurzem fanden PALME et al. (1985) (siehe auch KURAT et al., 1987) ein Gesteinsbruchstück im Chondriten

Allende, welches hauptsächlich nur aus dendritischem Olivin (mit extrem hohen Nebenelementgehalten) besteht. Normalerweise sind die strukturellen Charakteristika von aus der Dampfphase gewachsenen Kristallen durch spätere Rekristallisationen zerstört. Da der überwiegende Teil der Kondensate Kristalle waren (bei dem niedrigen Gesamtdruck im solaren Nebel kann nur eine Kondensation zur Kristallen erfolgen) sind kaum Relikte zu finden. Es gibt jedoch Objekte, von denen wir glauben, daß sie Flüssigkeits-Kondensate (wie die Regentropfen) waren: die feinfaserigen Pyroxenchondren (Abb.1). Die Elementhäufigkeiten einer solchen Chondre sind in Abb.4 wiedergegeben. Wir sehen, daß die refraktären lithophilen Elemente keinerlei Variabilität zeigen, alle sind ca. 3.5-fach gegenüber CI angereichert (Chondre All-SHE). Die volatilen Elemente Cr, Mn und Na sind verarmt, da die Temperatur zum Zeitpunkt der Kondensation für ihre vollständige Ausfällung offensichtlich zu hoch war. Solche Chondren finden sich in allen Chondriten und sind sich - unabhängig vom Chondriten-Typ - chemisch und mineralogisch sehr ähnlich. Akzeptieren wir die Hypothese einer Kondensation zu Tröpfchen, dann müssen wir annehmen, daß es im solaren Nebel lokal sehr hohe Silikat-Partialdrucke gegeben hat.

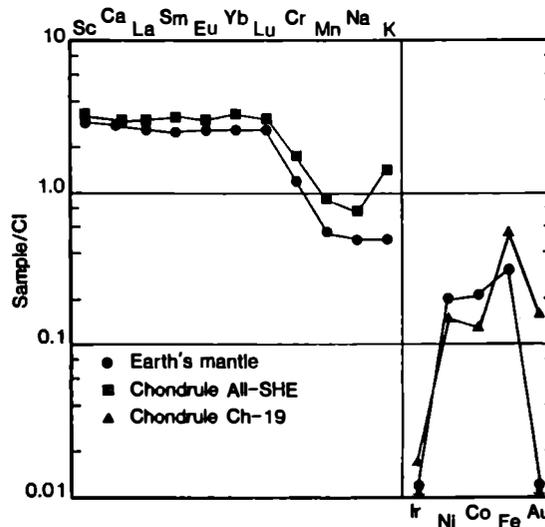


Abb.4: Spurenelement-Gehalte in einer feinfaserigen Pyroxenchondre (All-SHE) aus dem Chondriten Allende (unveröffentlichte Daten MPI Mainz), einer Chondre CH-19 aus dem Chondriten Chainpur (unveröffentlichte Daten MPI Heidelberg) und im Erdmantel (JAGOUTZ et al., 1979). Die Daten sind wie in Abb.2 und 3 normiert und angeordnet.

Betrachten wir nun die Häufigkeiten der siderophilen Elemente in Abb.2 bis 4. Als Erstes fällt auf, daß die siderophilen Elemente in den Chondren durchschnittlich stark verarmt sind. Tatsächlich sieht man diese Verarmung natürlich schon im Dünnschliff (vergl. Abb.1) und sie wurde schon in der Frühzeit der Meteoritenforschung erkannt (vergl. z.B. HOWARD, 1802, SORBY, 1864, TSCHERMAK, 1883). Die Chondren sind also an siderophilen Elementen verarmt (mit ihnen auch viele Fragmente und Aggregate), die Chondrite (das Gesamtgestein) jedoch nicht. Dies bedeutet, daß es einen Fraktionierungsprozeß gegeben haben muß, der die lithophilen Elemente von den siderophilen trennte, eine Silikat-Metall-Fraktionierung. Da diese Fraktionierung nicht nur die Chondren (also die Schmelztröpfchen) erfaßte, sondern auch andere Objekte, können wir sie nicht auf eine Entmischung von Silikat- und Metallschmelze (siehe Hochofen) zurückführen. Ein an-

derer Mechanismus muß wirksam gewesen sein, einer, der eine bevorzugte Zusammenballung der Silikate unter praktischem Ausschluß der Metallkörner bewirkte. Die Details sind noch nicht klar, unterschiedliche elektrostatische Ladungen und Bewegungsenergien könnten die Ursache sein. Letztlich fanden sich alle Bestandteile zusammen mit dem Ergebnis, daß fast alle Chondrite einen unfraktionierten Anteil auch der siderophilen Elemente haben. Obwohl geringfügige Fraktionierungen zwischen den Chondriten-Klassen erkennbar sind, bedeutet dies letztlich, daß bestimmte Teile des solaren Nebels fast vollständig zu Chondriten akkretierten.

Die relativen Häufigkeiten der siderophilen Elemente in den verschiedenen Chondren und anderen Objekten geben uns natürlich auch Auskunft über bestimmte Prozesse bei der Entstehung. Nur selten sind die siderophilen Elemente untereinander nicht fraktioniert. Das hat verschiedene Ursachen, wie das unterschiedliche kosmochemische oder geochemische Verhalten der verschiedenen Elemente. Am einfachsten ist die Situation in Abb. 3. Dort sehen wir, daß das Ir gegenüber Ni, Co angereichert und das Au verarmt ist. Dies entspricht der Volatilität dieser Elemente und bestätigt unseren Befund von den lithophilen Elementen, daß diese Chondren dampffraktioniert wurden. Der ursprüngliche Metallgehalt dieser Chondren war jedoch niedrig, da auch das Ir, eines der refraktärsten Elemente, gegenüber den refraktären lithophilen Elementen wie Sc verarmt ist.

Das Fe zeigt hier, und auch in allen anderen Beispielen, die hier gegeben werden, eine positive Anomalie. Dies ist darauf zurückzuführen, daß das Fe in unseren Beispielen keinen reinen siderophilen Charakter hat. Ein Teil ist wohl als Metall vorhanden, die Hauptmasse ist jedoch als FeO in den Silikaten gelöst. Das bedeutet, daß entweder während der Bildung dieser Chondren leicht oxidierende Bedingungen herrschten oder daß FeO später gegen MgO in den Silikaten ausgetauscht wurde. "Leicht oxidierend" bedeutet im Zusammenhang mit Chondriten für irdische Begriffe noch immer "reduzierend", da ja ein wesentlicher Teil des Fe als Metall vorliegt. Der nachträgliche Einbau von FeO in die Silikate, eine FeO-Metasomatose, muß ernsthaft in Betracht gezogen werden. In einem Gas solarer Zusammensetzung (mit 92.1 Atom.-% H!) ist bei den hohen Temperaturen, welche wir zur Chondrenbildung brauchen nur das metallische Fe stabil. Oxidiertes Fe (FeO) kann nur bei tiefen Temperaturen (600K) existieren oder in einem Gas, welches den Großteil des H verloren hat (z.B. durch Staub-Gas-Trennung oder Staub-Anreicherung).

Die Erde

Die massivste Probe aus unserem Sonnensystem ist wohl die Erde. Die dünne Erdkruste, auf der wir leben ist geochemisch stark fraktioniert und kann uns nur wenig Auskunft über die gesamte Erde geben. Anders verhält es sich mit dem Erdmantel. Dieser bildet die Hauptmasse der Erde. Er ist zwar für uns nicht direkt zugänglich, tektonische Vorgänge und Vulkane versorgen uns jedoch mit genügend Proben aus dem oberen Bereich (oberer Erdmantel). Aus der Vielzahl von Proben läßt sich eine primitive Erdmantel-Zusammensetzung ableiten (JAGOUTZ et al. 1979). In der Abb.4 ist diese Zusammensetzung ähnlich jener der Chondren dargestellt. Wir sehen sofort, daß die refraktären lithophilen Elemente unfraktioniert, also chondritisch, und ähnlich angereichert sind, wie in vielen Chondren. Die Häufigkeiten der volatilen Elemente nehmen im Erdmantel mit zunehmender Volatilität ab. Wir können daraus schließen, daß die Erde aus einer dampffraktionierten chondritischen Materie aufgebaut wurde. Dies bedeutet, daß die Erde bei einer Temperatur akkretierte, welche zu hoch für eine vollständige Kondensation der flüchtigen Elemente war. Die Temperatur muß um 1000 K betragen haben.

Betrachten wir die siderophilen Elemente, so sehen wir, daß diese - ähnlich wie in den Chondren - gegenüber den lithophilen Elementen stark verarmt sind. Das war zu erwarten, da die Erde ja einen Metallkern hat und dort alle siderophilen

Elemente konzentriert sein sollten. Diese Verarmung ist besonders deutlich ausgeprägt bei den Edelmetallen Ir und Au. Auch das ist zu erwarten, da diese Metalle sehr hohe Verteilungskoeffizienten zwischen Metall und Silikat haben ($D_{Ir} \sim 100.000$, d.h. daß ein Metall im Gleichgewicht mit Silikat rund 100.000-mal mehr Ir und Au enthält, als das Silikat). Viel weniger stark verarmt als die Edelmetalle sind Ni, Co und Fe. Deren Metall-Silikat-Verteilungskoeffizienten sind sehr abhängig von den Redox-Bedingungen. Für ein leicht oxidiertes Metall-Basalt-System gelten die Verteilungskoeffizienten 6, 350 und 650 für Fe, Co und Ni (DREIBUS und WÄNKE, 1984). Wurde die Erde aus kohligem Chondriten vom Typ I (CI) gebildet und der Erdmantel war im Gleichgewicht mit dem Metall, welches den Erdkern bildete, dann sollten die Elemente Fe, Co und Ni im Erdmantel die Häufigkeiten von $1/6 (0.17) \times CI$ Fe, $1/350 (0.003) \times CI$ Co und $1/650 (0.0015) \times CI$ Ni haben (berücksichtigt man die verschiedenen Massen von Silikat und Metall, ändern sich die Zahlen nicht wesentlich). In der Abb.4 sehen wir sofort, daß zwischen Theorie und Praxis eine große Lücke klafft und daß alle drei Elemente im Erdmantel viel zu häufig sind. Gleiches gilt auch für die Edelmetalle, welche mit ihrem extrem hohen Verteilungskoeffizienten praktisch quantitativ im Erdkern sein müßten. Eine einfache Rechnung für Ir soll das veranschaulichen: Mit dem Metall-Silikat-Verteilungskoeffizienten von 100.000 dürfte im Erdmantel nur $0,00001 \times CI$ Ir vorhanden sein. Tatsächlich finden wir $0,0075 \times CI$ Ir (JAGOUTZ et al., 1979), also 750-mal mehr, als erwartet werden kann. Dieser Überschuß an siderophilen Elementen im Erdmantel bedeutet wahrscheinlich, daß die Erde auch nach ihrer Differenzierung in Kern und Mantel noch primitive chondritische Materie zugeführt bekam. Die Mantel-Kern-Differentiation muß also deutlich vor Ende der Akkretion der Erde erfolgt sein. An ein Wunder grenzt allerdings die weltweit homogene Verteilung der siderophilen Elemente im Erdmantel. Ein sehr effektiver Mischprozeß muß hier aktiv gewesen sein (und ist es wahrscheinlich noch immer).

Synthese

Die Bestandteile der chondritischen Meteorite (Chondren, Gesteinsfragmente, Mineralaggregate u.a.m.) haben komplexe Entwicklungsgeschichten. Sie haben "Erinnerungen" an die Zeit ihrer Bildung und manchmal auch an die Zeit davor. Bei richtiger Fragestellung können sie uns viel über das frühe Sonnensystem erzählen. Was wir bis heute von ihnen erfahren konnten, zeichnet ein komplexes und chaotisches Bild des frühen solaren Nebels. Versuchen wir, das, was wir heute von den Chondriten lernen konnten, in ein einfaches Modell der Entstehung unseres Sonnensystems einzubauen.

Sterne und mit ihnen Planetensysteme entstehen aus interstellaren Gas-Staub-Wolken (vergl. SAFRONOV, 1969; MORFILL, 1985), welche gravitativ instabil werden und sich zu Sternen (mit oder ohne Planeten) zusammenballen. Da bei diesem Prozeß große (gravitative) Energiemengen frei werden, müssen wir erwarten, daß die prä-solare Materie vielfach umgewandelt wurde und wir kaum Relikte dieser Materie finden können. Petrographisch können wir tatsächlich keine Relikte identifizieren. Isotopengeochemische Studien konnten allerdings in jüngster Zeit prä-solaren Kohlenstoff in einigen kohligem Chondriten nachweisen (SWART et al., 1983; LEWIS et al., 1987). Diese offensichtlich unveränderten Relikte sind nur in geringen Mengen erhalten geblieben (bis zu 400 ppm). Aber auch in der umgewandelten Materie, den Bestandteilen der Chondrite, ist die prä-solare Materie nachweisbar. Dies ist möglich, da die Umwandlungen nicht mit einem völligen Auslöschen des "Gedächtnisses" dieser Materie verbunden waren. Aufgrund dieses "kosmischen chemischen Gedächtnisses" der Materie (vergl. CLAYTON, 1982) kann man isotopengeochemisch interstellare Materie in fast allen Bestandteilen der Chondrite nachweisen. Sie wird durch Isotopen-Anomalien sichtbar, die auch darauf hinweisen, daß diese Materie wahrscheinlich aus Supernovae, also explodierten Sternen, stammt (vergl. CLAYTON, 1978). Dies überrascht nicht so sehr, sind doch die kurzlebigen Sterne der Ort der Synthese der schweren chemischen Elemente (BURBIDGE et al., 1957).

Jene Materie, aus welcher letztlich die Bestandteile der Chondrite gebildet wurden, die prä-chondritische Materie, ist in den meisten Fällen auch nur auf chemischem Wege identifizierbar (vergl. KURAT, 1984). Im turbulenten solaren Nebel wurde die prä-solare Materie erhitzt, geschmolzen und verdampft, rekondensierte zum Teil und wurde verschiedenen Redox-Bedingungen ausgesetzt. Die so prozessierten Körner bildeten Mineralaggregate. Diese bestanden entweder aus reduzierten (FeO-freien) oder aus oxidierten (FeO-reichen) Silikaten und Oxiden, oder aber auch aus sulfurisierter Materie (komplexe Mg-Ca-Mn-Na-Sulfide). Diese Aggregate wurden wiederum gesintert, geschmolzen, teilweise oder vollständig verdampft (mit teilweiser Rekondensation) und wurden annähernd zu dem, was wir heute als Bestandteile der Chondrite beobachten können: Chondren, gesinterte Mineralaggregate, Gesteins- und Mineralfragmente. Die physikalischen Bedingungen während dieser Prozesse waren höchst unterschiedlich: die Temperatur, der Gasdruck und die Partialdrücke von O, S und anderen Elementen variierten über einen weiten Bereich. Bevor sich diese Partikel (jedes mit seiner eigenen Geschichte) zu den Gesteinen zusammenballten, welche wir heute Chondrite nennen, wurden sie noch umfassend mittels Austauschreaktionen mit dem umgebenden Gas chemisch verändert. Alle erlebten eine Metasomatose mit meist geringfügiger Rekristallisation. Der Großteil erlebte eine FeO-Metasomatose bei der ein Teil des MgO der Silikate durch FeO aus dem umgebenden Gas ausgetauscht wurde. Durch Akkretion dieser Partikel entstanden die gewöhnlichen Chondrite, die bei weitem häufigsten Meteorite. Andere Partikel erlebten eine S-Metasomatose, bei der Silikate z.T. in Sulfide umgewandelt wurden. Aus diesen entstanden die seltenen Enstatit-Chondrite. Etwas anders war wahrscheinlich die Entwicklung der Erde. Sie akkretierte zum Großteil wohl vor der (bei schon tiefen Temperaturen $< 800^{\circ}\text{C}$) stattfindenden Metasomatose und bevor auch die volatilen Elemente kondensieren konnten, ein Schicksal, das sie wahrscheinlich mit allen terrestrischen Planeten teilt.

Wenn wir auch schon viele Prozesse im frühen solaren Nebel nachweisen konnten und auch von der prä-chondritischen Materie mehr wissen, als je zuvor, sind wir und werden auch noch lange nicht in der Lage sein, einen detaillierten Ablauf der Ereignisse zu rekonstruieren. Zu chaotisch sind die Prozesseabläufe und ihre Produkte, die Chondrite, die primitivsten Gesteine dieser unseren kleinen Welt.

Danksagung

Die Forschungsarbeit an chondritischen Meteoriten wurden mit Unterstützung des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung durchgeführt.

Literatur

- BURBIDGE, E.M., BURBIDGE, G.R., FOWLER, W.A. & HOYLE, F. (1957): Synthesis of the elements in stars. - *Rev. mod. Phys.* 29, 547.
- CLAYTON, D.D. (1982): Cosmic chemical memory: a new astronomy. - *Q.J.R. astr. Soc.* 23, 174-212.
- CLAYTON, R.N. (1978): Isotopic anomalies in the early solar system. - *Ann. Rev. Nucl. and Particle Phys.* 28, 501-522.
- DODD, R.T. (1981): *Meteorites. A petrologic-chemical synthesis.* - Cambridge Univ. Press, Cambridge, Mass., pp 368.
- DREIBUS, G. & WÄNKE, H. (1984): Accretion of the Earth and the inner planets. - *Proc. 27th Internat. Geolog. Congr., VNU Science Press*, vol. 11, 1-20.
- FREDRIKSSON, K. (1963): Chondrules and the meteorite parent bodies. - *Trans. N.Y. Akad. Sci., Ser.II.*, vol. 25, 756-769.
- HOWARD, E. (1802): Experiments and Observations on certain stony and metalline Substances, which at different Times are said to have fallen on the Earth; also on various Kinds of native Iron. - *Phil. Trans. Royal Soc. London, Part I*, 168-212.
- JAGOUTZ, E., PALME, H., BADDENHAUSEN, H., BLUM, K., CENDALES, M., DREIBUS, G., SPETTEL, B., LORENZ, V. & WÄNKE, H. (1979): The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. - *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 10th, 2031-2050.
- KURAT, G. (1967): Zur Entstehung der Chondren. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 31, 491-502.
- KURAT, G. (1970): Zur Genese der Ca-Al-reichen Einschlüsse im Chondriten von Lancé. - *Earth Planet. Sci. Lett.* 9, 225-231.
- KURAT, G. (1984): Geochemistry of chondrules: fractionation processes in the early solar system. - *Proc. 27th Internat. Geol. Congr., VNU Sci. Press*, vol. 11, 155-197.
- KURAT, G., PERNICKA, E. & HERRWERTH, I. (1984): Chondrules from Chainpur (LL-3): reduced parent rocks and vapor fractionation. - *Earth Planet. Sci. Lett.* 68, 43-56.
- KURAT, G., PALME, H., BRANDSTÄTTER, F. & HUTH, H. (1987): Allende - AF: undisturbed record of condensation, accretion, and metasomatism. - *Lunar Planet. Sci. XVIII, The Lunar Planet. Sci. Inst., Houston, TX*, p 523-524.
- LEWIS, R.S., MING, T., WACKER, J.F., ANDERS, E. & STEEL, E. (1987): Interstellar diamonds in meteorites. - *Nature* 326, 160-162.
- MORFILL, G.E. (1985): Physics and chemistry in the primitive solar nebula. - In: *Birth and Infancy of Stars*, R. Lucas, A. Omont and R. Stora (eds.), Elsevier, Amsterdam, p 693-792.
- NOYES, R.W. (1982): *The Sun, Our Star.* - Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., pp 263.
- PALME, H., SUESS, H.E. & ZEH, H.D. (1981): Abundances of the elements in the solar system. - In: *Landolt - Börnstein, Vol. 2 (Astronomy and Astrophysics)*, K. Schaifers & H.H. Voigt (eds.), Springer Verlag, Berlin, p 257-272.

- PALME, H., WLOTZKA, F., NAGEL, K. & EL GORESY, A. (1982): An ultra-refractory inclusion from the Ornans carbonaceous chondrite. - Earth Planet. Sci. Lett. 61, 1-11.
- PALME, H., KURAT, G., BRANDSTÄTTER, F., BURGHELE, A., HUTH, J., SPETTEL, B. & WLOTZKA, F. (1985): An unusual chondritic fragment from the Allende meteorite. - Lunar Planet Sci. XVI., The Lunar Planetary Inst., Houston, TX, p 645-646.
- PERNICKA, E. et al. (1985): unveröffentlichte Daten.
- SAFRONOV, V.S. (1969): Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets. - Nauka, Moskau (Translated 1972, NASA TT F-677).
- SORBY, H.C. (1864): On the microscopical structure of meteorites. - Proc. Royal Soc. London XIII., 333.
- SWART, P.K., GRADY, M.M., PILLINGER, C.T., LEWIS, R.S. & ANDERS, E. (1983): Interstellar carbon in meteorites. - Science 220, 406-410.
- TSCHERMAK, G. (1875): Die Bildung der Meteoriten und der Vulkanismus. - Sitzungsber. math.-naturw.Kl., Akad. Wiss. Wien 71/2, 661-673.
- TSCHERMAK, G. (1883): Die mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten erläutert durch photographische Abbildungen. - Schweizerbart, Stuttgart.
- TSUCHIYAMA, A. & NAGAHARA, H. (1981): Effects of precooling thermal history and cooling rate on the texture of chondrules: a preliminary report. - Mem. Nat. Inst. Polar Res., Tokyo, Spec. Iss. 20, 175-192.
- WOOD, J.A. (1963): Origin of chondrules and chondrites. - Icarus 2, 152-180.