



Meteoriten

Ein neues Bild der außerirdischen Besucher,
erarbeitet in und mit der Sammlung
des Naturhistorischen Museums in Wien

Das Wachstum der Erde begann vor 4,56 Milliarden Jahren, war in der Anfangsphase hektisch und katastrophal, verlangsamte sich vor etwa 3,8 Milliarden Jahren, setzt sich bis heute auf einer Sparrate fort und wird sich weiter fortsetzen bis zum Ende dieser Welt (in etwa 5 Milliarden Jahren) in der Sonne, die inzwischen zu einem Roten Riesen entartet sein wird. Die Erde sammelt auf ihrem Weg um die Sonne (und mit der Sonne durch unsere Galaxie) ständig außerirdische Materie in Form von Atomkernen (galaktische kosmische Strahlen, Sonnenwind), Staub (interstellar und interplanetar, 0,1 – 500 μm oder 0,0001–0,5 mm) und größeren Körpern mit Massen bis zu über 10 000 000 Tonnen. Die Häufigkeit der Objekte nimmt mit zunehmender Masse ab. Vom feinen interplanetaren Staub (1 – 10 μm oder 0,001–0,01 mm) fällt etwa ein Partikel pro Quadratmeter und Tag. Meteore, erzeugt von millimetergroßen Meteoroiden gibt es – weltweit gesehen – durchschnittlich alle 30 Sekunden, solche von zentimeter- bis metergroßen Meteoroiden («Feuerbälle») vielleicht einen pro Tag. Reste der Feuerball-Materie, Meteoriten, finden sich nur einige wenige pro Jahr. Ereignisse vergleichbar mit jenen des Meteor-Krater-Einschlages (60 m Projektildurchmesser, 1000 m Kraterdurchmesser) sind alle 10 000 – 20 000 Jahre zu erwarten, globale Katastrophen (verursacht von Objekten über 5 km im Durchmesser) jedoch nur alle 20 – 30 Millionen Jahre.

Meteoritenfall

Der Massefluss auf die Erde variiert stark mit der Masse der einfallenden Objekte. So wird die Hauptmasse des täglichen Einfalls (~ 100 t/Tag, $\sim 40\,000$ t/Jahr) von Teilchen mit etwa 10^{-5} Gramm (= 0,00001 g) Masse (oder $\sim 0,2$ mm Durchmesser) getragen. Diese Partikel und die ganz großen Körper, welche nur alle 20 – 30 Millionen Jahre die Erde treffen, tragen den Hauptteil zum Wachstum der Erde bei. Die Meteoriten in unseren Sammlungen repräsentieren Objekte, welche nur sehr wenig zum Wachstum der Erde beitragen (nur ~ 100 t/Jahr, weniger als 1 % des gesamten Masseflusses).

Mit der Erde zusammenstoßende außerirdische Körper («Meteoroiden») dringen mit kosmischer Geschwindigkeit (10 – 90 km/s) in die Erdatmosphäre ein. **1** Sie werden durch die Kollision mit Luftmolekülen erhitzt, ihre Oberfläche schmilzt und verdampft zum Teil. Diesen Vorgang sehen wir häufig und nennen die Erscheinung «Meteor» («Sternschnuppe», wenn klein, «Feuerball», wenn groß).

Kleinste Partikel (kleiner als 0,1 mm, weniger als 0,00001 g Masse) werden sanft gebremst und fallen als «kosmischer Staub», zum Teil etwas erwärmt, zum Teil völlig unverändert. **2** Größere Kleinpartikel (ab etwa 0,0001g Masse) werden aufgeschmolzen, verdampfen zum Teil und fallen als «kosmische Kügelchen». **3** Ab einer Meteoroid-Masse von etwa 10 Gramm besteht die Chance, dass ein Teil die anstrengende Reise durch die Erdatmosphäre unverändert überlebt. Finden

wir diesen, so nennen wir ihn «Meteorit». Sehr große Meteoroiden (Massen über 100 t) können von der Erdatmosphäre nicht mehr genügend abgebremst werden. Sie treffen die Erdoberfläche mit kosmischer Geschwindigkeit und verursachen Einschlagkatastrophen («Impakt»). 4

Meteoriten, welche unmittelbar nach ihrem Fall aufgesammelt wurden, nennen wir «Fälle». Diese sind von einer glasigen Schmelzkruste überzogen. 5 Meteoriten, deren Fall nicht beobachtet wurde, nennen wir «Funde». Nur die Fälle geben uns Auskunft über die Häufigkeiten der Meteoritenklassen im erdnahen Raum. Den Namen erhält jeder Meteorit nach dem nächstgelegenen Ort mit Postamt oder, in Gegenden ohne Siedlungen (Wüsten, polare Eiskappen) nach der Gegend und mit einer fortlaufenden Nummer. 6–8

Meteoriten fallen selten als Einzelstücke. Häufig sind es mehrere und manchmal bis zu 100 000 Stücke (Meteoritenschauer). Die Ursache dafür liegt in einem relativ schwachen inneren Zusammenhalt der meisten Meteoroiden. Sie zerbrechen in der Atmosphäre nach vorgegebenen Schwächezonen, welche primärer Natur (Aggregate, Brekzien) oder sekundärer Natur (Brüche verursacht durch Kollisionen im Weltraum) sein können.

Meteoritenklassen

Die Meteoriten sind mineralogisch und chemisch sehr vielfältig zusammengesetzt. Nach der Häufigkeit der Hauptminerale Olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ und Pyroxen, $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ (= Silikate) und Metall (Eisen-Nickel-Legierungen) unterscheidet man folgende Meteoritenklassen (in Klammern die Häufigkeit unter den Meteoritenfällen):

- A Steinmeteoriten: überwiegend Silikate (92,9%). 9
- B Stein-Eisen-Meteoriten: Silikate und Metall etwa gleich häufig (1,4%). 10
- C Eisenmeteoriten: überwiegend Metall (5,7%). 11

Alle Meteoriten sind sehr alt, sie entstanden vor 4,56 Milliarden Jahren, zusammen mit der Sonne und den Planeten. Ausnahmen sind die wenigen Meteoriten, die wir vom Mond haben und eine kleine Gruppe von Steinmeteoriten, welche wir SNC-Meteoriten nennen (siehe unten). Die Meteoriten waren also offensichtlich dabei, als die Sonne, die Erde und die anderen Planeten entstanden, sie können uns davon Geschichten erzählen, und diese Tatsache macht sie besonders wertvoll für uns.

STEINMETEORITEN – CHONDRITE

Die Chondrite sind Steinmeteoriten und mit rund 85 Prozent aller Fälle die bei weitem häufigsten Meteoriten. Ihre chemische Zusammensetzung ist «primitiv»:

sie entspricht dem kondensierbaren Anteil (rund 0,1 Atom-%) der Sonnenmaterie. Die Tatsache, dass die Chondrite und die Sonne die gleichen relativen Häufigkeiten der schweren Element (ab dem Element Na) haben, beweist, dass sowohl Sonne (99,9% der Gesamtmasse des Sonnensystems) als auch Chondrite aus der gleichen Quelle stammen, dem solaren Urnebel. Dieser war ursprünglich ein Teil einer viel größeren interstellaren Staub-Molekül-Gas-Wolke, die Quelle unseres Seins. Übrigens erinnert sich auch unsere Erde an ihren Ursprung aus diesem Urnebel: Die Hauptmasse der Erde, der Erdmantel, ein Gesteinskomplex der sich im Inneren der Erde von 30–2900 Kilometer Tiefe erstreckt, hat auch eine chemische Zusammensetzung, welche jener der Chondrite (und der Sonne) ähnelt.

Chondrite sind chaotische Gesteine, Mikrobrekzien, bestehend aus einer Fülle von Komponenten, darunter auch Kügelchen (Chondren), welche dieser Meteoritenklasse den Namen geben. 12, 13 Alle Komponenten der Chondrite haben eine individuelle mineralogische und chemische Zusammensetzung, sie sind chemisch «fraktioniert». Die Fraktionierung kann sehr extrem sein, z. B. gibt es Objekte, die nur aus Metall bestehen, oder nur aus Elementen, welche bei sehr hohen Temperaturen kondensieren, oder nur aus solchen, welche nur bei niedrigen Temperaturen kondensieren, usw. Auch die Häufigkeiten der Isotope vieler chemischen Elemente sind in den einzelnen Bausteinen verschieden. Das Gemisch all dieser Komponenten jedoch, das chondritische Gestein, hat immer eine chemische Zusammensetzung, welche eine Verwandtschaft mit der Sonne erkennen lässt (sie ist «unfraktioniert»). Diese delikate Mischung von fraktionierten Bausteinen zu einem unfraktioniertem Ganzen lässt den Schluss zu, dass die Materie der Chondrite in einem geschlossenen System bearbeitet, sozusagen in einem Topf «gekocht» wurde und Prozesse wie Schmelzen, Verdampfen und Kondensieren eine große Rolle gespielt haben. 14 Während dieses «Kochens» wurden die Bausteine voneinander getrennt und separat bearbeitet. Nach Ende des Prozesses wurden alle Produkte gesammelt und zu einem Stein zusammengefügt, zu dem Stein, welcher 4,5 Milliarden Jahre später als Meteorit mit unserer Erde zusammenstoßen wird. 15 Darüber hinaus zeigen uns die Inhomogenitäten in den Häufigkeiten der Isotope auch an, dass die Isotope der Elemente im solaren Urnebel inhomogen verteilt waren, dass die Materie dieses Nebels offensichtlich aus vielen verschiedenen Quellen stammte und dass das «Kochen» der Materie im Urnebel nicht ausreichte, um eine Homogenisierung der Isotope zu bewirken. 16, 17

Eine Liste der Chondriten-Klassen findet sich im Anhang.

Die Chondrite spiegeln bei größtenteils gleichbleibender chemischer Zusammensetzung in ihrer mineralogischen Zusammensetzung unterschiedliche Bildungsbedingungen wider. Am eindrucksvollsten zeigt dies der Oxida-

tionsgrad, welcher von stark reduzierend (Mangel an Sauerstoff) bis stark oxidierend (sauerstoffdominiert, vergleiche unsere irdische Atmosphäre) reicht. Die Extreme bilden dabei die seltenen Enstatit-Chondrite (stark reduziert, alles Eisen ist als Metall und Sulfid vorhanden) und die Kohligen Chondrite (stark oxidiert, Eisen und auch Nickel sind als Oxide, zum Teil gelöst in Silikaten, vorhanden). Die meisten der Chondrite, die gewöhnlichen Chondrite, haben einen zwischen den Extremen liegenden Oxidationsgrad, wobei z.B. das Eisen auf drei Phasen aufgeteilt ist: Metall (Fe,Ni-Legierungen), Sulfid (Troilit-FeS) und Silikat (FeO gelöst in Silikaten). 18

Die mineralogische Zusammensetzung der Chondrite kann in einem weiten Rahmen variieren. Wie schon erwähnt, ist sie abhängig von den örtlichen physikalisch-chemischen Bedingungen im solaren Nebel. Unter sauerstoffarmen Bedingungen bildeten sich Olivin (Mg_2SiO_4), Pyroxen ($MgSiO_3$), Feldspat ($NaAlSi_3O_8$), Troilit (FeS) und Ni-Fe Metall (Mineralogie der gewöhnlichen Chondrite). Unter sauerstoffreichen Bedingungen bildeten sich (OH)- und wasserhaltige Silikate (Serpentin und Tonminerale), verschiedene Monosulfide, Magnetit (Fe_3O_4), Karbonate (z. B. $MgCO_3$, $FeCO_3$) und Sulfate. Dies ist die Mineralogie der Kohligen Chondrite und des interplanetaren Staubes. 19–21

Präsolare Materie

Chondrite (und auch der interplanetare Staub) enthalten nicht nur Materie, welche im solaren Urnebel «gekocht» wurde, sondern auch Materie, welche diesem «Kochen» entkommen konnte und daher in der Lage ist, uns Nachrichten aus der Zeit vor der Entstehung der Sonne zu übermitteln: die so genannten präsolaren Körner. Diese sind Staub-Reste von Sternen, welche lange vor unserer Sonne strahlten und vor der Geburt unseres Sonnensystems starben. Dieser Staub besteht vielfach aus Mineralien, welche auch auf der Erde beliebt sind: Diamant (C), Korund (Al_2O_3), Spinell ($MgAl_2O_4$), Graphit (C) 22, Siliziumkarbid (SiC), Titankarbid (TiC), Siliziumnitrid und auch Silikate. Alle diese Staubphasen sind sehr klein, besonders die präsolaren Diamanten, welche eine durchschnittlichen Größe von nur 2–3 Nanometer ($\sim 0,0000025$ mm) haben. Die präsolaren Staubphasen zeichnen sich durch extreme Anomalien in den Isotopenhäufigkeiten der in ihnen enthaltenen Elemente aus. Diese Anomalien ermöglichen es uns nicht nur, die Körner als exotisch zu erkennen, sondern geben uns auch Auskunft über ihre Herkunft (von welchem Sternentyp) und ihrer Entstehung (Elementsynthese in den Sternen). Viele verschiedene Sterne, welche vor der Sonne lebten und längst tot sind, darunter Rote Riesen 23, Novae und Supernovae, konnten bisher mittels der Botschaften im präsolaren Staub identifiziert werden: der Staub ermöglicht es uns, die Sternpopulation, welche zum Aufbau des solaren Urnebels beigetragen hat, post mortem zu studieren!

Präsolare Materie in Meteoriten und interplanetarem Staub besteht jedoch nicht nur aus «edlen», chemisch und physisch widerstandsfähigen Mineralien, sondern auch aus organischen Verbindungen. Diese umfassen eine große, bis heute nicht bekannte Anzahl von Verbindungen, welche von einfachen C-H-Verbindungen über polyzyklische C-H-X-Verbindungen bis zu hochpolymeren C-H-O-N-Verbindungen (Kerogen) reicht. Unter diesen Verbindungen finden sich Aminosäuren ebenso, wie Zucker, Alkohole, Fette und praktisch alle notwendigen Bausteine für die Bildung einer Zelle. Ein Teil dieser Verbindungen wurde im solaren Urnebel, lange bevor die Sonne entstand, als dieser noch eine kalte interstellare Gas-Molekül-Staub-Wolke war, gebildet. Leben auf der Erde ist möglicherweise aus diesen Verbindungen entstanden – daher sind auch wir Menschen nicht nur aus Sternenstaub gebaut, sondern auch aus interstellaren Molekülen, wir stammen aus extrem heißen (Sterne) und extrem kalten (interstellarer Raum) Küchen.

Achondrite

Silikatreiche Meteoriten ohne chondritische Textur und nicht-chondritischer chemischer Zusammensetzung nennen wir Achondrite (etwa 8 % der Fälle). Sie zeigen keine direkte chemische Verwandtschaft mit der Sonne, sie haben also eine «fraktionierte» chemische Zusammensetzung, ähnlich manchen Gesteinen auf der Erde. Ihr Entstehungsalter ist allerdings (mit Ausnahmen, siehe unten) vergleichbar jenem der Chondrite. Die Achondrite sind eine kleine, aber sehr heterogene Meteoritenklasse.

Eine Liste der Achondrite findet sich im Anhang.

Mit den Kohligen Chondriten scheinen die Ureilite verwandt zu sein. Sie bestehen hauptsächlich aus Olivin mit etwas Pyroxen und sind reich an Kohlenstoff, ein Teil davon liegt als Diamant vor.

Die Aubrite sind Brekzien, welche praktisch nur aus Enstatit (MgSiO_3) bestehen und möglicherweise mit den Enstatit-Chondriten verwandt sind.

Angrite sind sehr seltene Gesteine bestehend aus Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Olivin, $(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$ – und einem Ca- und Fe-reichen Pyroxen, $\text{CaFe}(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$.

24-29

Die Brachinaite, Acapulcoite und Lodranite sind mit Chondriten und mit Silikateinschlüssen in Eisenmeteoriten verwandt.

Die häufigsten Achondrite (3 % der Fälle) sind die Eukrite, meist Brekzien von Plagioklas-Pyroxen-Gesteinen, welche eine Ähnlichkeit mit einigen irdischen (und lunaren) basaltischen Gesteinen haben («Dolerit»). Verwandt mit den Eukriten sind möglicherweise die Howardite und Diogenite. Die Diogenite sind Brekzien von Orthopyroxen, $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$, Gesteinen, die Howardite sind ein brekziöses Gemisch aus Eukriten und Diogeniten. Die ganze Gruppe ist mit dem Silikat-

anteil der Mesosiderite (siehe unten) verwandt. Alle diese Gesteine werden vielfach als Produkte eines sehr frühen basaltischen Vulkanismus auf Planetesimalen und insbesondere auf dem Asteroiden Vesta gedeutet, d. h., dass der Glaube, Steine von Vesta befänden sich in unseren Meteoriten-Sammlungen, weit verbreitet ist.

Unsere neuesten Forschungsergebnisse machen es allerdings wahrscheinlich, dass die Achondrite nicht, wie allgemein angenommen wird, von Planetoiden aus dem Asteroiden-Gürtel stammen und durch chemische Fraktionierung entstanden sind, sondern ebenfalls – wie die Chondrite – Produkte der im solaren Urnebel ablaufenden Prozesse sind. Sie zeigen den chondritischen Bausteinen ähnliche chemische Fraktionierungen, sind aber viel größer geraten als jene (Dezimeter statt Millimeter), haben also eigene «Steine» gebildet.

Meteoriten vom Mars?

Eine ähnliche, scheinbar magmatische Assoziation wie die Howardite-Eukrite-Diogenite (HED) bilden die seltenen Shergottite **30**, Nakhllite **31** und Chassignite **32** (SNC-Meteoriten). Die Shergottite sind basaltähnliche Gesteine («Dolerite»), mit einer Textur, welche sehr ähnlich jener der Angrite und Eukrite ist. Die Nakhllite sind Pyroxen-Gesteine und Chassigny ein Olivin-Gestein. Die SNC-Meteoriten sind scheinbar sehr jung. Shergotty hat ein scheinbares Kristallisationsalter von nur 360 Millionen Jahren. Sollte dieses tatsächlich stimmen, dann können diese Meteoriten nicht von einem (längst erkalteten) Kleinplaneten des Asteroidengürtels, sondern müssen von einem Planeten stammen, der bis in die jüngste Zeit geologisch aktiv war. Viele Meteoritenforscher sind daher der Auffassung, dass die SNC-Meteoriten vom Mars kommen, von wo sie durch einen großen Einschlag auf eine Bahn gebracht wurden, welche die Bahn der Erde kreuzte.

Die Ergebnisse der Pathfinder-Mission und der zz. auf dem Mars aktiven Sonden Spirit und Opportunity sprechen allerdings nicht für diese Theorie – die chemische Zusammensetzung der auf der Mars-Oberfläche analysierten Gesteine deckt sich nicht mit jener der SNC-Meteoriten. Auch zeigen die Bilder von der Marsoberfläche deutlich, dass der Mars mit großen Massen von Sedimenten bedeckt ist. Unter den so genannten «Marsmeteoriten» findet sich allerdings kein einziges Sediment, sondern ausschließlich magmatische Gesteine! Da stimmt doch etwas nicht! Dieser Frage sind wir auch mit einem Experiment nachgegangen: Das STONE-Experiment, ein Versuch, mit Hilfe einer wiederkehrenden Raumkapsel künstliche Meteoriten zu erzeugen – eine kurze Geschichte dazu findet sich am Ende des Aufsatzes.

Auch unsere petrologischen und geochemischen Forschungsergebnisse an SNC-Meteoriten sprechen gegen eine Herkunft vom Mars und lassen eher eine

Verwandtschaft mit den Kohligen Chondriten und auch mit den HED-Meteoriten erkennen. Die scheinbar jungen radiometrischen Alter lassen sich auf Störungen der radiometrischen Uhren zurückführen. Wie das vor sich gegangen sein könnte, kann man allerdings noch nicht sagen. Es bleibt etwas Rätselhaftes in Bezug auf die SNC-Meteoriten übrig, aber das gilt für die gesamte außerirdische Materie.

Meteoriten vom Mond

Im antarktischen Eis und in Wüsten (z. B. Sahara, Nullarbor) **33** wurden in den letzten 25 Jahren Meteoriten gefunden, welche bis dahin unbekannt waren: Anorthositische Brekzien **34** und Basalte, Gesteine vom Mond. Diese Mondgesteine müssen durch einen relativ rezenten Einschlag eines extralunaren Körpers auf dem Mond in eine die Erdbahn kreuzende Bahn gebracht worden sein. Viele dieser Meteoriten (bis heute sind etwa 30 bekannt und jedes Jahr werden neue entdeckt) befinden sich in den Antarktischen Meteoritenansammlungen der USA und Japans.

Bemerkenswert ist, dass die Mondmeteoriten die einzigen Meteoriten sind, deren Herkunft klar erwiesen ist – wir können sie ja direkt mit den von den amerikanischen Apollo- und den russischen Luna-Missionen vom Mond auf die Erde gebrachten Gesteine vergleichen. Für alle anderen, also praktisch die gesamte außerirdische Materie, welche wir zur Untersuchung zur Verfügung haben, gibt es nur Vermutungen, die mehr oder weniger zutreffen werden – ein nicht sehr befriedigender Zustand.

STEIN-EISEN-METEORITEN

Diese Meteoriten bestehen zu etwa gleichen Teilen aus Silikaten und Metall. Die zwei Hauptklassen unterscheiden sich in ihrer mineralogischen und chemischen Zusammensetzung und in ihrem Gefüge:

Mesosiderite sind chaotische Brekzien von Silikaten und Metall. **35** Der Silikatanteil besteht hauptsächlich aus Orthopyroxen, $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ und Plagioklas, $(\text{Ca,Na})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$ und ist ähnlich jenem der Eukrite und Howardite.

Pallasite sind meist mehr oder weniger grobmaschige Aggregate von Olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, mit Metall als Matrix. **10** Das Olivin/Metall-Verhältnis ist sehr variabel. Bereichsweise können Pallasite frei von Olivin sein.

Die Meteoriten-Standard-Modelle sehen die Mesosiderite als chaotische Brekzien, welche durch Zusammenstöße von Kleinplaneten mit metallischer und mit eukritischer Zusammensetzung entstanden sind und die Pallasite als Proben aus dem Inneren von chemisch differenzierten Kleinplaneten, von der Grenze zwischen silikatischem Mantel und metallischem Kern. Unsere Forschungsergebnisse widersprechen diesem Glauben und sehen beide Meteoriti-

tenklassen als poröse Silikat-Aggregate, welche durch Metall sozusagen «fixiert» wurden. Im Falle der Mesosiderite bestehen die Aggregate aus Feldspat, Pyroxen und Metall, im Falle der Pallasite aus meist bis zu zentimetergroßen Olivinen.

DIE EISENMETEORITEN

36 sind mit 5,7 Prozent der Meteoritenfälle seltene und natürlich auch fraktionierte Meteoriten mit einer chemischen Zusammensetzung, welche weit von jener der Sonne entfernt ist.

Da wir Irdischen den Hochofen zum Eisenschmelzen schon erfunden haben und damit Metall von Oxiden und Silikaten im großen Stile trennen, scheinen alle anderen Wege zur Trennung von Silikaten und Metall verschlossen zu sein. Konsequenterweise werden daher die Eisenmeteoriten als Proben von Kernen von Kleinplaneten angesehen, welche in silikatischen Mantel und metallischen Kern differenzierten. Dass das nicht funktionieren kann, zeigen unsere Forschungsergebnisse. Unten, nach dem Kennenlernen der Eisenmeteoriten, werde ich das neue Modell vorstellen.

Gefüge der Eisenmeteoriten

Eisenmeteoriten bestehen hauptsächlich aus zwei Eisen-Nickel-Mineralien, dem Ni-armen Kamazit (rund 5 % Ni) und dem Ni-reichen Taenit (10 – 60 % Ni). Troilit (FeS) ist praktisch immer vorhanden, andere Minerale, wie Graphit (C), Schreibersit (Fe, Ni-Phosphid) und Silikate können manchmal reichlich vorhanden sein.

Die meisten Eisenmeteoriten zeigen auf polierten und geätzten Flächen so genannte Widmanstätten'sche Figuren. Es ist dies wahrscheinlich ein Entmischungsgefüge, welches bei der Abkühlung entstand: Bei Temperaturen oberhalb von rund 900 Grad Celsius ist nur der Taenit (mit 0 – 100 % Ni, d.h., Ni und Fe sind zu 100 % mischbar) stabil. Abkühlung führt zur Entmischung von Kamazit aus dem Taenit. Die Entmischungslamellen orientieren sich dabei an den Oktaederflächen des Taenits. Meteoriten mit diesem Gefüge nennen wir daher Oktaedrite. Diese sind die häufigsten Eisenmeteoriten.

Beachtenswert ist, dass die meisten Oktaedrite aus einem ursprünglichen Taenit-Einkristall entstanden sind, darunter auch Stücke von über 10 Tonnen Masse. Polykristalline Oktaedrite sind selten. Die Gefüge sind grob mit den Nickel-Gehalten korreliert, wobei mit zunehmendem Ni-Gehalt das Gefüge feinkörniger wird.

Neben den Oktaedriten, welche nach der Dicke der Kamazit-Lamellen unterteilt werden (sehr grob, grob, fein, sehr fein), kennen wir Hexaedrite (Kamazit-Einkristalle), Ataxite (dichte, strukturlose, polykristalline Eisen, meist Ni-reich) und Anomale Eisen, welche in keine Klasse passen.

Chemische Klassifikation der Eisenmeteoriten

Im Gegensatz zur eher monotonen mineralogischen Zusammensetzung ist die chemische Zusammensetzung der Eisenmeteoriten erstaunlich vielfältig. Der Ni-Gehalt schwankt zwischen rund 5 und 60 Gewichtsprozent und die Spurenelement-Gehalte variieren über mehr als fünf Größenordnungen (z. B. Ge: $< 0,1 - > 1000$ ppm = parts per million, Teile in einer Million Teile). Erstaunlicherweise existieren keine zwei Eisenmeteoriten, deren chemische Zusammensetzung die gleiche wäre. Jeder Eisenmeteorit ist also ein Individuum mit seinen «persönlichen» Haupt- und Spurenelement-Gehalten. In dieses Chaos kann etwas Ordnung gebracht werden, da sich ein Großteil der Eisenmeteoriten zu Gruppen ordnen lässt, die eine Verwandtschaft untereinander erkennen lassen. Eine große Zahl von Eisenmeteoriten (13 %) lässt sich allerdings keiner der chemischen Klassen zuordnen. Diese nennen wir «chemisch anomale Eisen (IRANOM)». Wahrscheinlich repräsentieren diese noch weitere Klassen (möglicherweise mehr als 50).

Die größten chemischen Klassen sind IIIAB (ca. 33 % aller Eisenmeteoriten), IAB (ca. 20 %) und IVA (ca. 10 %).

IAB- und IIICD-Eisen und einige IRANOM-Eisen enthalten häufig Silikateinschlüsse, welche chemisch mit den Chondriten verwandt sind (z. B. Campo del Cielo, Canyon Diablo, Carlton, Copiapo, Kendall County, Landes, Toluca, Zagora). Manche Eisen (IIE und IRANOM) enthalten Silikateinschlüsse von nicht-chondritischer Zusammensetzung (z. B. Elga, Kodaikanal, Zacatecas). **37, 38**

Entstehung der Eisenmeteoriten

Metall lässt sich von Silikaten einfach trennen, wenn man das Silikat-Metall-Gemisch schmilzt. Die spezifisch schwere Metall-Schmelze sinkt auf den Boden der Schmelzwanne und die spezifisch leichte Silikat-Schmelze schwimmt oben auf. Das Prinzip kennt jedes Kind und daher muss es auch für die Eisenmeteoriten herhalten. Die gängigen Modelle zur Entstehung der verschiedenen Eisenmeteoriten benutzen alle dieses Prinzip – nur die Schauplätze wechseln. Für die meisten Eisenmeteoriten wird heute eine Entstehung im Kern eines Kleinplaneten angenommen. Dazu muss der Kleinplanet (mit chondritischer Gesamtzusammensetzung) möglichst vollständig geschmolzen werden, damit das Metall in das Zentrum des Körpers sinken und einen Kern bilden kann, den die Silikate ummanteln. Die Silikatschmelze bildet in der Folge (nach Abkühlung) einen festen Mantel, bestehend aus Olivin-Gesteinen, und den HED-Meteoriten, die eine vulkanische Kruste bilden. Aus der Metallschmelze im Kern wachsen sehr große Metallkristalle. Fortgesetzte Abkühlung des Kleinplaneten führt zur Entmischung von Kamazit aus dem ursprünglichen Taenit und zur Bildung der Widmanstätten'schen Figuren. Irgendwann nach dieser Phase wurde der Klein-

planet durch den Zusammenstoß mit einem anderen Körper in seine Bestandteile zerlegt, in kleine Stücke zerteilt und diese auf die Reise ins Innere des Sonnensystems geschickt. Einige kollidierten mit der Erde und da sind sie nun: in unseren Sammlungen.

Gerade da beginnen aber auch schon die Probleme mit diesem beliebten Modell: Ein in Kern, Mantel und Kruste differenzierter Kleinplanet sollte, ähnlich wie die Planeten – allen voran die Erde, aus etwa $\frac{1}{3}$ Kern (Metall), $\frac{2}{3}$ Mantel (olivinreiche Gesteine = Peridotite) und weniger als ein Prozent Kruste (vulkanische Gesteine, Basalte) bestehen. ³⁹ Wird dieser Körper zertrümmert, so sollten die Trümmer die Häufigkeiten der Gesteine im Kleinplaneten widerspiegeln, d. h., wir sollten erwarten, dass die auf die Erde fallenden differenzierten Meteoriten etwa aus $\frac{1}{3}$ Eisen, $\frac{2}{3}$ Peridotiten und einigen wenigen Basalten bestehen. In unseren Sammlungen finden wir jedoch etwa $\frac{2}{3}$ Basalte (und verwandte Gesteine) und $\frac{1}{3}$ Eisen, aber überhaupt keine Peridotite. Die häufigsten Gesteine eines jeden differenzierten Planeten fehlen! Wie kann die Natur verhindern, dass neben Proben des Kerns und häufigen Proben der seltenen Kruste nicht auch Proben des sehr voluminösen Mantels auf die Erde fallen? Ich sehe keine Möglichkeit, bleibt also nur der eine Schluss: das Modell kann nicht richtig sein.

Dieser Schluss wird von vielen anderen Beobachtungen und Daten unterstützt, welche alle einen ganz anderen als dem gängigen Modell zugrunde liegenden Entstehungsprozess für die Eisenmeteoriten (und auch alle anderen differenzierten Meteoriten) wahrscheinlich machen. Unsere jüngsten Forschungsergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Eisenmeteoriten direkt aus dem solaren Urnebel entstanden sind. Sie haben nie einen Schmelzzustand erlebt und wurden bei Temperaturen weit unterhalb des Schmelzpunktes durch Kondensation gebildet. Es ist möglich, dass dabei chemische Verbindungen wie Carbonyle eine große Rolle gespielt haben. Carbonyle sind Verbindungen von Kohlenmonoxid, CO, mit Metallen, z. B. das gängige Eisencarbonyl $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Alle siderophilen (eisenliebenden = metallliebenden) Elemente bilden gerne Carbonyle und diese sind bei niedrigen Temperaturen stabile Verbindungen. Wird die Temperatur erhöht, zerfallen sie in Metall und CO (Gas). ⁴⁰ Das Metall präzipitiert (kondensiert) und kann Kristalle bilden. Unter bestimmten Bedingungen können diese Kristalle auch Riesenkristalle werden, nämlich dann, wenn keine Konkurrenten wachsen, d. h., wenn die Keimbildungs-Häufigkeit gering ist. Das ist sie, wenn die Verdünnung mit nicht-kondensierbaren Gasen groß ist – und genau das können wir vom solaren Urnebel erwarten, der ja zum größten Teil aus Wasserstoff bestand.

Auf diesem Wege können also Eisenmeteoriten unabhängig von anderen Gesteinen entstehen, genau das, was uns die Meteoriten-Häufigkeiten nahe le-

gen. Unser neues Modell erlaubt auch zwanglos die Erklärung vieler Besonderheiten der Eisenmeteoriten. Da sind einmal die Silikateinschlüsse, welche häufig delikate Aggregate darstellen, vollständig im Metall eingebettet und so erhalten geblieben sind. Mit einer Metall-Schmelze wäre eine solch delikate Mischung nicht zu erzielen, wohl aber mittels Metallbildung aus der Gasphase. Des Weiteren sind viele Eisenmeteoriten sehr reich an Graphit, ein direkter Hinweis auf Carbonyle, da das freiwerdende CO, der Reaktion $2\text{CO} = \text{C (Graphit)} + \text{CO}_2$ folgend, Graphit erzeugt und dieser Graphit inhomogene C-Isotopenhäufigkeiten hat, ebenfalls eine Folge dieser Reaktion, in der die C-Isotope zwischen C (Graphit) und CO_2 stark fraktioniert werden. Außerdem finden sich in Eisenmeteoriten Tieftemperatur-Mineralen, welche nicht da sein sollten, wenn das Eisen aus einer Schmelze entstanden wäre.

Entstehung der Meteoriten

Nach dem letzten Stand unseres Wissens stammen alle Meteoriten aus dem solaren Urnebel, ausgenommen sind lediglich die Mondmeteoriten. Demnach sind alle Meteoriten gemeinsam mit der Sonne und den Planeten entstanden.

Alles begann mit einer kalten interstellaren Gas-Molekül-Staub-Wolke, welche Materie von vielen explodierten Sternen enthielt. Ein Teil dieser Wolke fiel in sich zusammen, vielleicht ausgelöst durch eine Supernova-Explosion in der Nähe. Im Zentrum bildete sich die Proto-Sonne, und die in die Sonne stürzende Materie formte eine Gas-Staub-Scheibe, welche um die Sonne rotierte. In der Sonne endeten 99,9 Prozent der Masse des solaren Urnebels, nur 0,1 Prozent schafften es, in einer Umlaufbahn um die Sonne zu bleiben, davon fast alles in den Riesen-Planeten Jupiter und Saturn. Bevor alles soweit war, konzentrierte sich ein Teil der Materie in der Scheibe in Form von lokalen Wirbeln an den Orten, welche nun von den Planeten besetzt sind. Daraus entstanden die Planeten. Die Wirbel transportierten auch Materie nahe zur Sonne und auch wieder von dieser weg. Dabei wurde diese durch die Sonne erwärmt – mit unterschiedlichen Folgen, je nach dem Grad der Erwärmung. Man kann sich vorstellen, dass es Erwärmungen gab, welche zu einem teilweisen oder vollständigem Verdampfen der präsolaren Staubpartikel führten. Der so gebildete Dampf diffundierte zur kühlen Seite des Wirbels und kondensierte dort. Je nach Konzentration der kondensierfähigen Stoffe im Gas und je nach der lokal herrschenden Temperatur kondensierten verschiedene Minerale. In einem sich abkühlenden Dampf werden zuerst nur die bei hoher Temperatur stabilen Minerale (Hochtemperatur-Kondensate) wie Korund – Al_2O_3 , Perowskit – CaTiO_3 , Hibonit – $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$, Gehlenit – $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, Spinell – MgAl_2O_4 und viele andere mehr kondensieren, dann die Hauptminerale Forsterit (Olivin) – Mg_2SiO_4 und Enstatit (Pyroxen) – MgSiO_3 , gefolgt von den Mineralien der flüchtigen Elemente

wie Albit (Feldspat) – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ oder Nephelin – NaAlSiO_4 , und erst bei sehr niedrigen Temperaturen ($\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$) konnten sich wasserstoffhaltige Mineralien wie Serpentin und Tonminerale bilden. Wenn sich im Ablauf dieser Sequenz die frischgebildeten Mineralien zu größeren Einheiten aggregierten, konnten sie mit dem abkühlenden Dampf nicht mehr reagieren (um neue Mineralien zu bilden), sie überlebten die folgenden Reaktionen. Nicht-aggregierte Mineralien reagierten mit dem Dampf und z. B. aus dem Frühkondensat Korund (Al_2O_3) wurde später Albit (NaAlSiO_8) oder Nephelin (NaAlSiO_4). Jedenfalls kann man sich gut vorstellen, dass auf diesem Wege eine Vielzahl von Mineral-Vergesellschaftungen erzeugt werden können, welche sich alle an einen bestimmten Prozess bei bestimmten physikalischen Bedingungen erinnern. Neben den festen Mineralien kam es auch zur Kondensation von Silikat-Schmelzen. Diese erlaubten vielen Mineralaggregaten, eine runde Tropfenform anzunehmen, die, erstarrt, die häufigsten Bausteine der Chondrite, die Chondren, bildeten. Wenn man bedenkt, dass diese Prozesse nicht nur einmal, sondern vielfach ablaufen konnten, kann man ermessen, wie vielfältig die Produkte sein können. Werden am Ende alle diese Produkte in einen Stein gepackt, dann haben wir genau das, was wir unter den Meteoriten am häufigsten finden (und was wir von irdischen Prozessen nicht kennen): die Chondriten, Steine, welche aus fraktionierten Bausteinen (die Chondren und Aggregate) bestehen, aber immer eine nicht-fraktionierte, solare chemische Zusammensetzung haben. **41**

Die seltenen fraktionierten Meteoriten können auf genau die gleiche Art und Weise am gleichen Schauplatz erzeugt werden. Dazu brauchen nur die Mineral-Aggregate etwas größer zu werden als sie es in den Chondriten sind und statt bis Millimeter auf Dezimeter bis Meter Größe zu wachsen. Schon haben wir fraktionierte Gesteine, die (fast) jede mineralogische Zusammensetzung annehmen können. Die Ureilite, Aubrite, Brachinaite, Diogenite, Chassignite, Nakhilite, Acapulcoite und Lodranite könnten alle auf diesem Wege entstanden sein, ebenso die Silikat-Aggregate in den Eisenmeteoriten und den Pallasiten. Ziehen wir zudem auch die häufigen Silikat-Schmelzen in Betracht, so könnten diese die basaltähnlichen Achondrite, wie Eukrite, Angrite und Shergottite und auch den Silikat-Anteil der Mesosiderite gebildet haben. Das passt alles zusammen, sind doch alle diese Meteoriten sehr alt (ausgenommen die SNC-Meteoriten, siehe oben).

Nun fehlen uns nur noch die Eisenmeteoriten und ihre Verwandten. Diese passen offensichtlich nicht ins Bild. Eisen als Metall kann etwa gleichzeitig mit den Hauptmineralien Olivin und Pyroxen aus einem Gas solarer Zusammensetzung kondensieren und das passiert offensichtlich auch. Wir finden Metall in den Chondriten und da kann Metall ähnliche Bausteine bilden, wie die Silikate, also auch Chondren, ist also auch auf ähnliche Weise prozessiert worden. Die Rie-

sen-Metallkristalle, welche wir für die Eisenmeteoriten brauchen, können offensichtlich in dem turbulenten Chaos der Chondriten-Geburtsstätten nicht erzeugt werden. Für die Eisen brauchen wir ruhigere Bedingungen und nicht zu hohe Temperaturen. Dafür bieten sich die Randbereiche der Wirbel an: sie sind kühl, weniger dicht und ruhiger in der Bewegung. Dort können sich Carbonyle im kühlen Gas bilden und bei Erwärmung wieder zerfallen und Eisen-Nickel-Kristalle bilden. Dabei werden sie alles, was sich in diese Region verirrt, sanft einschließen: chondritische und basaltische Gesteine aus dem Inneren des lokalen Wirbels und hochporöse Olivin-Aggregate aus dessen Randbereichen. Die Produkte sind dann Eisen mit Silikateinschlüssen, Mesosiderite und Pallasite.

Und wie kamen die präsolaren Körner in die Meteoriten? Ganz einfach: sie kamen spät aus dem Urnebel in die Akkretions-Scheibe, zu spät, um verkocht zu werden, aber nicht zu spät, um in die sich zusammenballende prozessierte Materie mit eingebaut zu werden.

Nun haben wir alle Gesteine für zukünftige Meteoriten geschaffen, wohin damit? Sie dürfen ja erst in 4500 Millionen Jahren auf die Erde fallen. Wo sie sich seit ihrer Entstehung aufgehalten haben und woher sie letztlich auf die Erde gekommen sind, ist leider nicht bekannt. Sie müssen allerdings von genügend Masse bedeckt gewesen sein, die sie von der kosmischen Strahlung geschützt hat, also müssen es Körper gewesen sein, die wesentlich größer als die Meteoroiden selbst waren.

Die Hauptmasse der auf die Erde fallenden außerirdischen Materie, der interplanetare Staub, wurde sicherlich ebenfalls im solaren Urnebel gebildet, in der Folge in Kometen eingebaut und nur wenige Millionen Jahre vor der Kollision mit der Erde von seinem Mutter-Kometen freigesetzt. Zusammen mit dem Staub könnten auch Staubaggregate in Kometenkernen ⁴² tiefgefroren gelagert worden sein, z. B. einige der seltenen Kohligen Chondrite. Auch andere Meteoriten kommen für eine Zwischenlagerung in Kometenkernen in Frage. Die wenigen guten Bahnbestimmungen für chondritische Meteoriten deuten alle auf eine Herkunft aus dem Asteroidengürtel hin, also aus der Region zwischen den Umlauf-Bahnen von Mars und Jupiter, die gefüllt mit Kleinplaneten (Asteroiden) ist. Einige Meteoriten, vor allem Chondrite, könnten also Proben von Asteroiden sein, was durch die NEAR-Mission der NASA bestätigt wurde und durch die japanische Muses-C-Mission noch dieses Jahr nachgewiesen werden könnte.

Künstliche Meteoriten

Von den über 30 000 Meteoriten in unseren Sammlungen kennen wir den Herkunftsort nicht, nehmen aber an, dass sie hauptsächlich aus dem Asteroidengürtel stammen. Von nur etwa 30 kennen wir die Herkunft mit Bestimmtheit: Sie

stammen vom Mond. Die meisten dieser Mondmeteoriten sind Proben der Mondoberfläche, des «Regoliths», des Schutt-, Glas- und Trümmerhaufens, der die Mondoberfläche bedeckt. Das ist richtig so, denn was sollen wir denn vom Mond erhalten, wenn Gesteine von diesem durch Einschläge extralunarer Körper losgelöst werden? Die Sammlung entspricht also den Erwartungen.

Es gibt da aber auch noch weiter rund 30 Meteoriten, bekannt als SNC-Meteoriten, welche sich von den übrigen Meteoriten vor allem durch ihre Jugend unterscheiden: sie sind nur 180–1300 Millionen Jahre alt, viel zu jung, um von Kleinplaneten stammen zu können, welche ja alle schon sehr früh in der Geschichte des Sonnensystems erkaltet sind. Viele Kollegen glauben daher, dass sie vom Mars stammen. Wenn das so ist, dann sollten die SNC-Meteoriten – ebenso wie die Mondmeteoriten – hauptsächlich Proben von der Marsoberfläche sein. Da der Mars eine warme und feuchte Vergangenheit hat, ist seine Oberfläche sowohl mit Regolith, als auch mit Sedimenten bedeckt. Diese Sedimente stammen sowohl von fließenden als auch stehenden Gewässern und sollten daher fast die volle Palette der uns von der Erde bekannten Sediment-Gesteine umfassen. Jede Kollektion von Steinen von der Mars-Oberfläche sollte daher auch Proben von Sedimenten enthalten. Die SNC-Meteoriten sind jedoch durchwegs magmatische Gesteine, Gesteine, welche durch Kristallisation von Silikat-Schmelzen entstanden sind (wie die irdischen Basalte). Es erhebt sich also die Frage, was passiert den Sediment-Gesteinen beim Eintritt in die Erdatmosphäre, wie sind ihre Überlebenschancen? Um diese Frage zu beantworten, haben wir ein von Andre Brack, Orleans, vorgeschlagenes Experiment mit Hilfe der ESA durchgeführt, das STONE-Experiment. Dazu wurden drei Gesteinsproben auf der riesigen russischen Raumkapsel «Foton 12» montiert: 43 ein Basalt vom Pauliberg, Burgenland, eine künstliche Marsboden-Probe bestehen aus zerkleinertem Basalt mit Gips verkittet und ein Dolomit (chemisches Sediment) vom Monte Lagazuoi, Belluno, Italien. Die Kapsel wurde am 9.9.1999 um 9 Uhr abends von Plesetsk, Russland, in eine Umlaufbahn um die Erde geschossen und landete am 24.9.1999 in der Nähe von Sudbodarovka, Orenburg, Russland. Den Wiedereintritt in die Erdatmosphäre erlebten unsere Proben wie jeder Meteoroid auch: sie sahen den Feuerball von Innen. 44–46 Die Basalt-Probe ging bei der Landung verloren (der Halter löste sich), aber vom künstlichen Marsboden und vom Dolomit blieben Reste erhalten! Diese waren allerdings von der Hitze stark gezeichnet: Der Dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, war zum Teil in CaO und MgO zerfallen und aus dem CaO bildete sich in kurzer Zeit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, das Mineral Portlandit (das sich in Folge zu Calcit, CaCO_3 , umwandelt). Der künstliche Marsboden war wenig widerstandsfähig und zerfiel mechanisch und chemisch wobei sich aus dem Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaO (fest), SO_3 (Gas) und H_2O (Gas) bildeten und auch Silikatschmelzen, das exotische Mineral Oldha-

mit, CaS, und natürlich auch Anhydrit, CaSO₄. Es zeigte sich also, dass das chemische Sediment (Dolomit) keine Schmelzkruste bilden und somit nicht als Meteorit erkannt werden kann. Nur Isotopen-Analysen könnten helfen, aber wie viele Dolomite und ähnliche chemische Sedimente müsste man prüfen, um einen außerirdischen zu finden? Ähnliches gilt für den Marsboden. Die Mars-Rover Spirit und Opportunity haben erneut gezeigt, dass der Marsboden sehr reich an Sulfaten ist. Diese sind allesamt nicht hitzebeständig und zerfallen bei thermischer Belastung. Dazu kommt, dass die terrestrische Verwitterung ähnliche Gesteins-Zemente produziert und auch solche Gesteine schnell zerlegt. Eine kleine Chance gibt es nur im antarktischen Eis: Tiefgefroren und trocken aufbewahrt, könnten Marsboden-Proben dort einige Zeit überleben. Wer findet den ersten Stein? Oder haben wir gar keine Steine vom Mars in unseren Sammlungen?

Literatur zur weiteren Information

- Beatty J. K. and Chaikin A (eds.) *The New Solar System*. Third edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bernatowicz T. J. and E. Zinner (eds.) (1997) *Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials*. AIP Conference Proceedings 402, American Inst. Physics, Woodbury, New York.
- Berwerth F. (1918) *Die Meteoritensammlung des naturhistorischen Hofmuseums als Born der Meteoritenkunde*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl., Abt. I, 127, 715–795.
- A. Brack, P. Baglioni, G. Borruat, Fr. Brandstätter, R. Demets, H. G. M. Edwards, M. Genge, G. Kurat, M. F. Miller, E. M. Newton, C.-A. Roten and E. Wäsch (2002) *Do meteoroids of sedimentary origin survive terrestrial atmospheric entry? The ESA artificial meteorite experiment STONE*. – Planet. Space Sci. 50, 763–772
- Brezina A. (1904) *The arrangement of collections of meteorites*. Proc. American Philosoph. Soc. 43, 211–247.
- Buchwald V. F. B. (1975) *Handbook of Iron Meteorites*. Vol. 3, Univ. California Press, Berkeley.
- Burke J. G. (1986) *Cosmic Debris. Meteorites in History*. Univ. California Press, Berkely.
- Cassidy W. A. (2003) *Meteorites, Ice and Antarctica*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chladni E. F. F. (1794) *Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderen ihr ähnlichen Eisenmassen*. J. F. Hartknoch, Riga.
- Chladni E. F. F. (1819) *Über Feuer-Meteore und über die mit denselben herabgefallenen Massen*. Wien.

- Cohen E. (1894) *Meteoritenkunde*. I. Heft. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Cohen E. (1903) *Meteoritenkunde*. II. Heft. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Cohen E. (1905) *Meteoritenkunde*. III. Heft. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Dodd R. T. (1981) *Meteorites: A Petrological-chemical Synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Grady M. M. (2000) *Catalogue of Meteorites*. Fifth edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- Güssmann F. (1803) *Über die Steinregen*. Wien.
- Haidinger W. K. (1859) *Der Meteoreisenfall von Hraschina bei Agram am 26. Mai 1751*. Sitzungsber. Akad. Wissensch., Wien 35, 361–390.
- Heide F. (1988) *Kleine Meteoritenkunde*. 3. Auflage, bearbeitet von F. Wlotzka, Springer-Verlag, Verständliche Wissenschaft Bd. 23, Berlin.
- Humboldt A. von (1872) *Cosmos*. Harper & Bros., New York.
- Koblitz J. (2002) *Metbase*. CD-ROM.
- Krinov E. L. (1966) *Giant Meteorites*. Oxford Univ. Press, New York.
- Kurat G. & M. Maurette (1977) *Matière Extraterrestre sur Terre. De l'origine du système solaire à l'origine de la vie*. Sud Conseil Éditions, Musumeci SpA, Vallée d'Aosta.
- Mason B. H. (1962) *Meteorites*. John Wiley & Sons, New York.
- Maurette M. (1993) *Chasseurs d'étoiles*. Hachette.
- Nininger H. H. (1972) *Find a Falling Star*. Ericksson, New York.
- O'Keefe J. A. (1976) *Tektites and Their Origins*. Elsevier, Amsterdam.
- Papike J. J. (ed.) (1998) *Planetary Materials*. Rev. Mineral. Vol. 36, Mineralog. Soc. America, Washington, D. C.
- Schreibers C. von (1820) *Beyträge zur Geschichte und Kenntnis meteorischer Stein und Metallmassen, und der Erscheinungen, welche deren Niederfall zu begleiten pflegen* (als Nachtrag zu Herrn Chladni's neuestem Werk über Feuer-Meteore). J. G. Heubner, Wien.
- Taylor S. T. (1992) *Solar System Evolution. A New Perspective*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Tschermak G. (1885) *Die mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten erläutert durch photographische Abbildungen*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- Wasson J. T. (1985) *Meteorites: Their Record of Early Solar-System History*. W. H. Freeman, New York.

ANHANG

In Erinnerung an die Meteoriten-Schau, welche ich im Saal V des Naturhistorischen Museums eingerichtet habe (und die heute schon etwas veraltet ist), folge ich im Text grob dieser Schau und gebe in diesem Anhang Details zu Schaustellungen in den Wandvitrinen (Gestalt der Eisenmeteoriten, Einschläge außerirdischer Körper auf der Erde – Impaktite und Tektite), sowie eine auf den letzten Stand gebrachte systematische Liste der Meteoriten.

**Terminologische Meteoritensammlung (Wandvitrinen),
eingerrichtet von Aristides Brezina Ende des 19. Jahrhunderts**
Eine Zusammenstellung der wichtigsten Beobachtungen an Meteoriten aller Klassen, Mineralogie, Mineral-Vergesellschaftungen, Strukturen, Texturen, Ungewöhnliches und Kurioses. Eine extrem lehrreiche Sammlung für Feinschmecker, braucht viel Zeit zum Konsumieren, birgt viele Überraschungen.

Gestalt der Eisenmeteoriten

Eisenmeteoriten sind sehr zähe, widerstandsfähige Körper, welche nur mit großer Mühe zerlegt werden können. Es überrascht daher, dass auch Eisenmeteoriten in mehreren Stücken und manchmal auch in Schauern fallen. Offensichtlich ist der Zusammenhalt der Eisenmassen im jeweiligen Meteoroiden nicht so stark wie in den gefallenem Trümmern. Auch die Form und das meist ungestörte innere Gefüge der Eisentrümmer ist nicht mit einem Herausbrechen aus einer größeren kompakten Eisenmasse verträglich. Nur relativ wenige Stücke von Eisenschauern zeigen Deformationen, wie wir sie an Bruchstücken erwarten können (wie z.B. Sikhote-Alin und Glorieta Mountain). Das ungestörte Gefüge der meisten Eisentrümmer zeigt, dass sie nur in einem losen, leicht zerlegbaren Verband im Meteoroiden vorhanden waren. 47

Die häufigen sehr unregelmäßigen Formen und die häufigen Scheiben- und Spindel- Formen sprechen für ein ursprüngliches Gerüst oder für über die Ecken verbundene Zwischenräume. Dies würde bedeuten, dass die Eisenmassen möglicherweise in einer nichtmetallischen Masse eingebettet waren. Welcher Art diese Materie war, wissen wir nicht. In einigen Fällen, wie Canyon Diablo, Glorieta Mountain und Sikhote-Alin, könnten es Silikate gewesen sein (alle diese Eisen enthalten Reste von Silikaten). Da Silikate spröde sind, ist ein Zerbrechen (wie bei den Steinmeteoriten) möglich.

Einschläge außerirdischer Körper auf der Erde

Meteoroiden mit Massen über 100 Tonnen können von der Erdatmosphäre nicht mehr ausreichend gebremst werden. Sie erreichen die Erdoberfläche mit kosmischer Geschwindigkeit. Beim Auftreffen (Impakt) wird ihre gesamte kineti-

sche Energie in Sekundenbruchteilen in Schockwellen umgesetzt. Diese führen zu enormen Kompressionen der Projektilmasse und der getroffenen Gesteinsmassen. Dichte Gesteine erleiden dabei eine Volumen-Verkleinerung von über 50 Prozent. Sie werden dabei stark erhitzt, schmelzen und verdampfen zum Teil. Es kommt zu einer Explosion und zur Bildung eines Kraters. ⁴⁸ Die Schockwellen breiten sich von der Einschlagstelle mit abnehmender Intensität aus und führen zu nachhaltigen Veränderungen (z. B. zur Bildung von Hochdruckmodifikation gesteinsbildender Minerale) der betroffenen Gesteine (Schockmetamorphose).

Die ausgeworfenen Gesteinsschmelzen kühlen rasch ab (Impaktgläser) und werden zusammen mit nicht-geschmolzenen Gesteinen in der Umgebung des Kraters abgelagert (Impaktite, Impaktbrekzien, Suevite). Im Krater selbst bleibt häufig eine Schmelze zurück, welche rasch abkühlt und kristallisiert (Impakt-schmelze).

Impaktkrater sind im Sonnensystem sehr verbreitet. Vor allem die alten Oberflächen kleinerer Körper wie Merkur und der irdische Mond sind von Kratern übersät. Sie geben uns eine Vorstellung von den Vorgängen im frühen Sonnensystem, von denen natürlich auch die Erde betroffen war. Heute sind auf der Erde nur relativ wenige Impaktkrater erkennbar, da die Erdkruste sehr raschen Umwandlungen unterworfen ist. Die meisten Krater sind auf alten Krustenteilen, wie dem Kanadischen Schild, erhalten geblieben. Der am besten untersuchte Krater ist der Meteor (oder Barringer) Crater in Arizona (der durch den Einschlag des Canyon Diablo-Eisens entstand).

Tektite

Tektite sind natürliche Gläser mit einer chemischen Zusammensetzung, welche ähnlich, aber nicht identisch, mit jener von Impaktgläsern und irdischen Sanden ist. Sie kommen nicht einzeln vor, sondern in Massen auf so genannten Streufeldern mit Durchmesser von 1 – 10 000 Kilometern. Nur vier Streufelder sind bekannt:

Streufeld	Vorkommen	Alter (Mill. Jahre)
Australasiatisch	Australien, Indonesien, Philippinen Malaysia, Indochina, China	0,7
Elfenbeinküste	Elfenbeinküste	1,3
Zentraleuropäisch	Tschechien, Deutschland, Österreich	15
Nordamerikanisch	USA	34

Dazu kommen tektitähnliche Gläser aus der Umgebung der Einschlagkrater Zhamanshin (Aktyubinsk Provinz, UdSSR, 1 Mill. Jahre), Aouelloul (Maureta-

nien, 3 Mill. Jahre) und Mount Darwin Crater (Tasmanien, Australien, 0,7 Mill. Jahre) und das libysche Wüstenglas (Ägypten, 28 Mill. Jahre).

Die Entstehung der Tektite ist noch nicht bis in die letzten Details geklärt. Sicher ist lediglich, dass ihre Bildung mit großen Einschlagereignissen auf der Erde zusammenhängt.

So stimmt z. B. das Alter der Moldavite (die Zentraleuropäischen Tektite) mit dem Alter des Einschlagkraters Nördlinger Ries zusammen. Auch die chemische Zusammensetzung der Moldavite hat eine große Ähnlichkeit mit jener von tertiären Sanden, welche zur Zeit des Ries-Ereignisses an der vom Einschlag betroffenen Oberfläche lagen. Das Problem des Transportes der Materie von der Einschlagstelle zum Streufeld (rund 300 km) durch die dichte Erdatmosphäre ist noch nicht in allen Details geklärt. Dazu kommt, dass einige Australite aerodynamische Ablationsformen (Knopfform) haben, welche darauf hindeuten, dass sie sich mit kosmischer Geschwindigkeit (mindestens 10 km/s) durch die Luft bewegt haben. Da sie jedoch eine irdische Zusammensetzung haben, müssen sie durch einen Einschlag über die Erdatmosphäre hinaus in den nahen Weltraum transportiert worden sein, von wo sie wieder zurückfielen (mit rund 11 km/s). Dieser Mechanismus gilt wahrscheinlich für alle Tektite. Der alte Name für die Tektite, «Glasmeteorite», ist daher nicht falsch, sind sie doch tatsächlich Meteoriten, Objekte, welche aus dem interplanetaren Raum auf die Erde fielen, aber sie sind irdischer Herkunft. 49

SYSTEMATISCHE LISTE ALLER METEORITENKLASSEN

Chondrite

- 1 Enstatit-Chondrite (E)
 - a) EH (**H**igh iron = eisenreich)
 - b) EL (**L**ow iron = eisenarm)
- 2 Gewöhnliche Chondrite:
 - a) H-Chondrite (**H**igh iron = eisenreich)
 - b) L-Chondrite (**L**ow iron = eisenarm)
 - c) LL-Chondrite (**L**ow iron and **L**ow metal = eisenarm und metallarm)
- 3 R-Chondrite (**R**umuruti-Typ, sehr stark oxidiert)
- 4 K-Chondrite (**K**akangari-Typ)
- 5 Acapulcoite: Pyroxen, Olivin, Feldspat
- 6 Lodranite: Pyroxen, Olivin, Metall
- 7 Kohlige Chondrite (C: carbonaceous): Prinzipiell Mischungen aus reduzierter (z.B. Chondren) und oxidiertes (Matrix) Materie
 - a) CV-Chondrite: **V**igarano-Typ (grobkörnige Mischung)
 - b) CR-Chondrite: **R**enazzo-Typ (grobkörnig und etwas wasserhaltig)
 - c) CK-Chondrite: **K**aroonda-Typ (grobkörnig und voll oxidiert)
 - d) CO-Chondrite: **O**rnans-Typ (feinkörnige Mischung)
 - e) CH-Chondrite: Acfer 182-Typ (**H**igh metal = metallreich)
 - f) CM-Chondrite: **M**ighei-Typ (wasserhaltige und -freie Silikate gemischt)
 - g) CI-Chondrite: **I**vuna-Typ (nur wasserhaltige Silikate, «Matrix»)

Achondrite

- 1 HED-Meteoriten:
 - H**owardite: Mischung aus Eukrit und Diogenit; Pyroxen, Feldspat
 - E**ukrite: Pyroxen, Feldspat
 - D**iogenite: Pyroxen
- 2 SNC-Meteoriten:
 - S**hergottite: Pyroxen, Maskelynit (Feldspat-Glas), Olivin
 - N**akhlite: Pyroxen, Olivin
 - C**hassignite: Olivin
- 3 Angrite: Augit, Anorthit
- 4 Aubrite: Enstatit
- 5 Brachinaite: Olivin
- 6 Ureilite: Olivin, Pyroxen
- 7 Winonaite: Olivin, Pyroxen

Mondmeteoriten

- 1 Anorthositische Brekzien
- 2 Regolith-Brekzien
- 3 Mare-Basalte

Stein-Eisen-Meteoriten

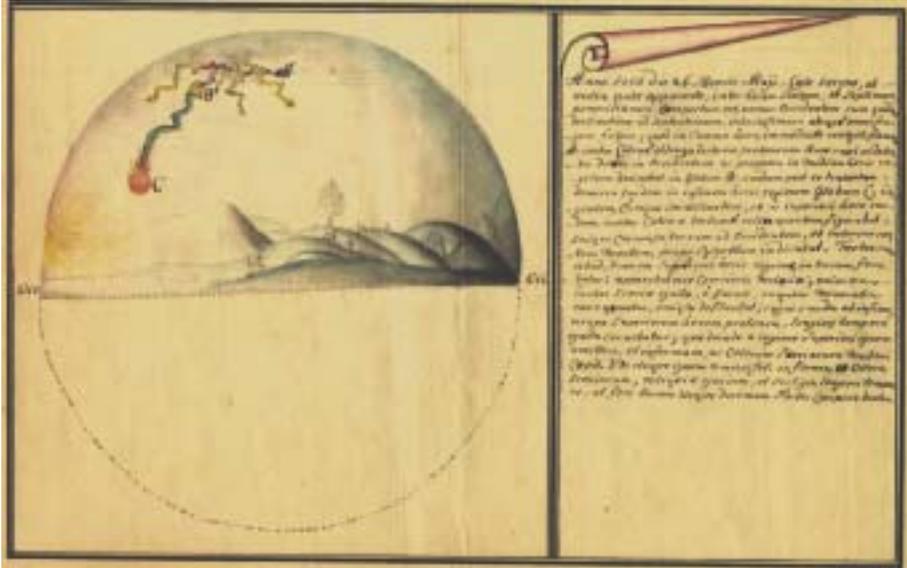
- 1 Mesosiderite: HED-Meteoriten-Silikate und Metall
- 2 Pallasite: Metall, Olivin (Steinbach: Metall, Pyroxen, Tridymit)

Eisen-Meteoriten

- 1 Ataxite: strukturlos, Taenit
- 2 Hexaedrite: Kamazit-Einkristalle
- 3 Oktaedrite: Widmanstätten'sche Figuren aus Kamazit und Taenit;
Kamazit-Lamellen-Dicke: sehr fein, fein, grob, sehr grob.
- 4 Anomale Eisen

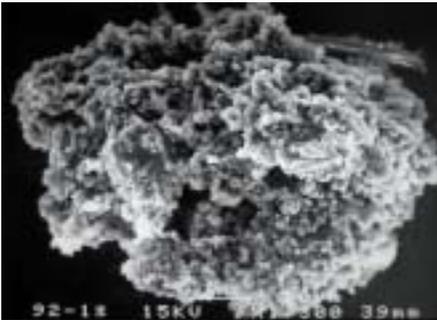
Meteoriten im Bild

1



Der Meteoritenfall von Hraschina (Agram, Kroatien) vom 26. Mai, 1751. Darstellung aus dem Bericht des Bischofs Kukuljevic an den kaiserlichen Hof. Die Zeichnung zeigt korrekt den Feuerball mit dem Rauchsweif, welcher durch die Winde in der hohen Atmosphäre eine Zickzack-Form annahm.

2a



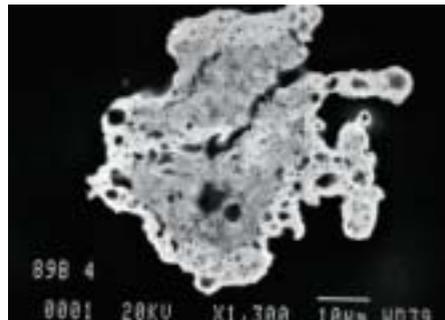
2c



2b



2d



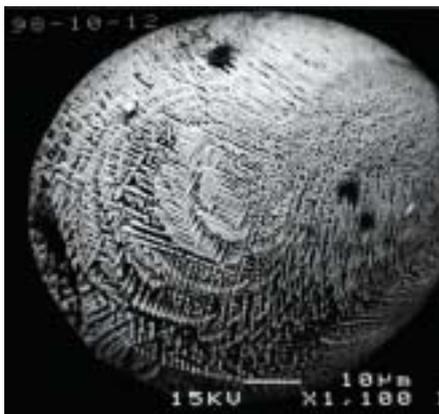
2a) Mikrometeorit aus dem antarktischen Eis, aufgesammelt von Michel Maurette, Paris, in der Nähe der französischen Station Cap Prudhomme. Dieses relativ große (~ 50 µm) interplanetare Staubteilchen schaffte es, ungeschmolzen durch die Erdatmosphäre zu kommen. Es besteht aus einer porösen Ansammlung von Mineralkörnern (schön sichtbar sind Magnetit-Kügelchen) und stammt sehr wahrscheinlich aus einem Kometen. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

2b) Teilweise geschmolzener Mikrometeorit, ebenfalls aus dem Eis nahe Cap Prudhomme. Die ursprünglichen Mineralien sind zum Teil geschmolzen, zum Teil nur entwässert (Tonmineralien), das Teilchen hat eine rundliche Form angenommen und ist mit einer dünnen Haut von dichtem Magnetit überzogen. Der Magnetit wurde während der Reise durch die Atmosphäre von dem aus dem Inneren des Partikelchens entweichenden Eisen (zerfallende Sulfide, Sulfate und Carbonate) gebildet. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

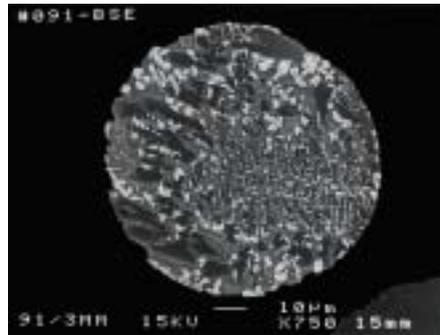
2c) Ungeschmolzener Mikrometeorit, durchgeschritten und poliert. Große Magnetit-Kugeln (bestehend aus Platten) und Haufen von kleinen Magnetit-Kügelchen sind in einer Matrix von wasserhaltigen Tonmineralien eingebettet. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

2d) Teilweise geschmolzener Mikrometeorit, durchgeschritten und poliert. Der Kern des Teilchens enthält einen «großen» Enstatit (Mitte links) und feinkörnige, zum Teil entwässerte Tonmineralien. Der Kern ist von einer blasigen Teilschmelze umgeben. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

3a



3b



3a) Kosmisches Kügelchen, das Produkt einer kompletten Aufschmelzung eines interplanetaren Staubteilchens. Die Schmelze bildete einen Tropfen, welcher sehr rasch abkühlte und skelettartige Olivine kristallisierte. Zwischen den Skelettbalken befand sich ursprünglich Glas, welches jedoch durch Schmelzwasser im Eis herausgelöst wurde. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

3b) Kosmisches Kügelchen, durchgeschritten und poliert. Wir sehen Olivine (dunkelgrau) und Magnetite (weiß) in einer glasigen Matrix (grau). Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme.

4



Krater in der Aluminium-Hülle des Langzeit-Experiment-Satelliten LDEF (Long Duration Exposure Facility) der NASA, verursacht durch eine Hochgeschwindigkeits-Kollision mit einem Mikrometeoroiden. Das Staubteilchen hatte einen Durchmesser von etwa 20 µm und traf den Satelliten mit einer Geschwindigkeit von etwa 15 km/s. In der Folge verdampfte der Mikrometeoroid explosionsartig und schuf den Krater mit > 1 mm Durchmesser. Ein Teil des Dampfes kondensierte am Kra-

terrand. Die chemische Analyse solcher Kondensate von vielen LDEF-Kratern zeigte, dass die meisten interplanetaren Staubpartikel eine chondritische Zusammensetzung haben – ganz ähnlich jener der Mikrometeorite aus dem antarktischen Eis. Der LDEF-Satellit, welcher viel länger als geplant im erdnahen Weltraum dem Bombardement durch Mikrometeorite ausgesetzt war (er konnte nach dem Unglück des Space Shuttles «Columbia» nicht auf die Erde zurückgeholt werden), erlaubte auch erstmals eine quantitative Messung des Staubflusses (Mikrometeoroid-Fluss) im erdnahen Raum: 40 000 t pro Jahr oder etwa 100 t pro Tag! Zum Vergleich: Meteorite (Körper mit über 1cm Durchmesser) bringen nur etwa 100 t pro Jahr.

5



Der Meteorit von Prambachkirchen, Oberösterreich, ein gewöhnlicher Chondrit (Masse etwa 2,1 kg, Durchmesser etwa 10 cm). Die konische Form stammt vom Durchmarsch durch die Erdatmosphäre, den der Stein ohne eigene Drehbewegung erlebte – ein so genannter «orientierter Fall». Der Fall erfolgte mit dem Konus (links) voraus, der auch die Bremsenergie abbauen musste und daher schmolz. Die Schmelze wurde durch die Luft nach hinten (und in eine Rauchfahne) gedrückt. Der hintere Teil des Meteoriten hat daher eine wesentlich dickere Schmelzkruste als der vordere. Die fixe Orientierung des Steines während des Fluges führte auch zu einer kuriosen Bahn: der Landeanflug erfolgte in einer 180-Grad Kurve, ein nicht alltägliches Ereignis.

6



Historische Photographie der Frontseite des orientierten Falles des Cabin Creek Eisenmeteoriten (Arkansas, USA); Masse: 47,4 kg; Höhe: ca. 44 cm. Die sehr schönen Regmaglypten (Daumenabdruck-ähnliche Vertiefungen) wurden beim Abbrengen in der Atmosphäre gebildet. Diese entstehen durch lokale Turbulenzen der Luft beim Durchfliegen mit Überschallgeschwindigkeit und führen zu bevorzugter lokaler Aufschmelzung des Projektils.

7



Eine schwarze Schmelzkruste bedeckt den Meteoriten von Nakhla (SNC-Meteorit). Der hellgrau-grüne Stein (sichtbar, wo die Kruste fehlt) wurde beim Durchmarsch durch die Erdatmosphäre oberflächlich geschmolzen. Die Schmelze zeigt eine Fließstruktur und ist zu einer schwarzen, zum Teil glasigen Kruste erstarrt.

8



Herr Dr. Wolfgang Schnabel, Geologe der Geologischen Bundesanstalt in Wien, mit dem von ihm 1977 gefundenen Meteoriten von Ybbsitz, einem gewöhnlichen Chondriten mit etwa 15 kg. Dies ist der vorletzte Meteorit, welcher in Österreich gefunden wurde, und weltweit einer der ganz wenigen, welche von einem Geologen beim Kartieren gefunden wurde.

9



Gewöhnlicher Chondrit Sayh al Umaymir 001 (SAU 001), gefunden 2000 im Oman (etwa 10 cm Durchmesser). Mehrere zigtausende Meteoriten wurden bisher in den heißen und kalten Wüsten der Erde gesammelt und noch mehr warten darauf, geborgen zu werden. Darunter befinden sich auch viele seltene und auch bis dahin unbekannte Typen. So wurde der erste Mondmeteorit 1979 – 10 Jahre nach der ersten Mondlandung durch Apollo 11 – in der Antarktis gefunden.

SAU 001 ist ein sehr schöner und typischer Chondrit, der nur leicht angewittert ist (Braunfärbung durch Eisenoxide). In diesem polierten Anschnitt sehen wir eine Vielzahl von runden Objekten, die Chondren, und einige wenige größere, unregelmäßig geformte

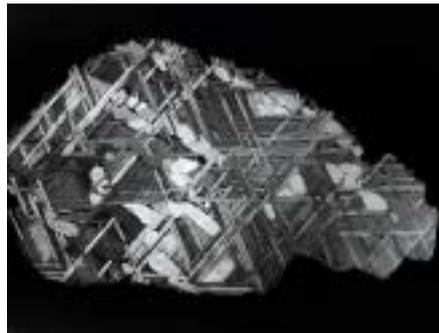
Objekte (wir nennen sie gerne «Einschlüsse»). Jedes dieser Objekte hat seine eigene Zusammensetzung, mineralogisch, chemisch und auch isotopisch. Der ganze Stein hat eine chemische Zusammensetzung vergleichbar jener der Sonne (und auch der Erde). Bei genauem Hinsehen kann man auch den Vorgang des Aggregierens der Bausteine zu immer größeren Einheiten erkennen – für gute Karten dieser Aggregate gibt es eine Belohnung! Bitte an Gero Kurat schicken.

10



Der Pallasit Springwater, Saskatchewan, Kanada. Dünne Platte im Durchlicht, etwa 3 cm lang, besteht aus großen gerundeten Olivinen (grün) in einer Matrix von Metall (schwarz). Die rote Farbe kommt vom Rost.

11



Das oktaedrische Gefüge des Eisenmeteoriten Coopertown (Tennessee, USA). Die etwa 15 cm lange Platte wurde poliert und anschließend leicht geätzt, wodurch das Gefüge deutlich sichtbar wird. Wir sehen hauptsächlich Kamazit-Lamellen (Ni-armes Alpha-Eisen mit etwa 5 Gew.% Ni), welche nach den Flächen eines Oktaeders (Achtflächner) angeordnet sind. Daher nennt man diese Eisen «Oktaedrite».

Das Gefüge entstand durch den Zerfall eines bei hoher Temperatur stabilen Gamma-Eisen-Kristalls, wobei das frisch gebildete Alpha-Eisen sich nach den Oktaeder-Flächen des ursprünglichen Gamma-Kristalls orientierte. Die Entstehung dieses Gefüges braucht viel Zeit, Millionen von Jahren, und sehr langsame Abkühlung, kann also im Labor nicht reproduziert werden.

12



Chondrite sind eine chaotische Sammlung von Objekten, welche alle ihre sehr persönliche, eigene Geschichte haben. Hier sehen wir einen Dünnschliff (Platte von etwa 30 µm Dicke) des Chondriten Tieschitz (Mähren, Tschechien), eine dichtgepackte Ansammlung verschiedener Objekte. Die runden Objekte nennen wir «Chondren». Sie geben diesen Meteoriten auch ihren Namen.

Die meisten der Chondren waren wohl ursprünglich Schmelztröpfchen, welche in der Folge rasch abgekühlt wurden. Sie dokumentieren also, dass es in der Frühzeit im solaren Nebel sehr warme, ja heiße Gegenden gegeben hat. Die meisten Objekte haben diese gesehen und alle haben auch kühle Gegenden besucht – jedes Objekt war also individuell auf Reisen im solaren Nebel und kann uns seine persönlichen Erlebnisse erzählen. Viele solcher Detailgeschichten erlauben es uns, eine Vorstellung von den Zuständen im frühen solaren Nebel zu erhalten. Das allgemeine Chaos ist durch die in diesem Bild vorhandene Ansammlung von Individualisten wohl ganz gut dokumentiert – es äußert sich noch in den chemischen und isotopischen Daten.

13



Eine relativ einfache Geschichte erzählt uns diese Balken-Olivin-Chondre aus dem Chondriten von Allende (Chihuahua, Mexiko). Der Kern besteht aus so genannten Balken-Olivinen, welche in Wirklichkeit Platten-Olivine sind, und Glas. Die Olivin-Platten sind subparallel orientiert, sind eigentlich ein Kristall, der sich beim raschen Abkühlen eines Schmelztröpfchens gebildet hat. In der Folge traf ein zweites, kleineres Tröpfchen rechts auf das große kristallisierte Olivin mit derselben Kristallorientierung wie im Kern. Anschließend kondensierte noch mehr Olivin auf der Oberfläche, kristallisierte dort ebenfalls größtenteils in derselben vorgegebenen Orientierung und bildete eine dichte Schale. Damit war diese Doppelchondre geschaffen – weitere Veränderungen sind nicht sichtbar, können aber durch detaillierte Analysen im Mikrobereich sichtbar gemacht werden. Sie geben uns Auskunft über die Erlebnisse nach der Entstehung und vor dem Aggregieren zu dem Stein, den wir nun zur Untersuchung im Labor haben.

14



Ein Ca-Al-reiches Objekt aus dem Kohligen Chondriten Allende (Chihuahua, Mexiko) im Dünnschliff, gesehen im einfachen Durchlicht (Bildlänge etwa 3 mm). Die Ca-Al-reichen Objekte sind besonders interessant, da

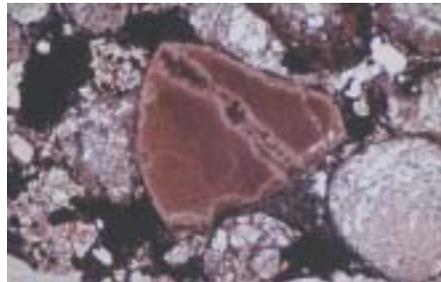
sie die ersten Kondensate aus dem heißen solaren Nebel sind und daher auch nur aus Mineralien bestehen, welche bei sehr hohen Temperaturen stabil sind. Dieses Objekt erzählt uns einen etwas komplexeren Werdegang als die meisten anderen. Der Kern besteht hauptsächlich aus großen Meliliten (weiß, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), welche viele kleine Spinelle (graue Haufen, MgAl_2O_4) einschließen. Dieser Kern bildete sich offensichtlich durch Aggregieren von Spinellen, welche die Keimbildung für die Melilithe erlaubten und in der Folge von diesen eingeschlossen wurden. Anschließend kondensierte eine Ca-Al-reiche Schmelze auf diesem Aggregat und kristallisierte Anorthit (weiß, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Al-reichen Augit (braun, CaMgAlSiO_6). Auch einige kleine Tropfen einer ähnlich zusammengesetzten Flüssigkeit wurden gesammelt und kristallisierten rasch zu ähnlichen Mineralien (Mitte rechts und Mitte oben). Nach der Fertigstellung sammelte das Objekt, welches nicht unähnlich einer Chondre ist, auch noch sehr feinkörnigen Staub und umgab sich mit einem Staubmantel, bevor es in den Stein Allende eingebaut wurde. Dieser Staub enthält nicht nur Silikate und Sulfide, sondern auch organische Stoffe und präsolare Körner, also eine Sammlung von Staubkörnern aus dem präsolaren Urnebel. Dieses Objekt erinnert sich also an die Hochtemperatur-Geschichte des solaren Nebels und an die Tieftemperatur-Geschichte knapp vor dem Aggregieren, aber es erinnert sich überhaupt nicht an das wichtigste Ereignis im solaren Nebel: die Kondensation der Hauptbestandteile! Es ist wahrscheinlich, dass dieses Objekt zu dieser Zeit auf Reisen in einem anderen Teil des solaren Nebels war und erst zurückkehrte, nachdem schon alles fertig war. Wo es sich aufhielt, verrät uns das gute Stück leider nicht – oder wir können die Botschaft einfach noch nicht lesen.

15



Die chemische Zusammensetzung der Schmelztröpfchen und ihre thermische Geschichte können eine unendliche Zahl von Gefüge-Varianten erzeugen. In dieser Chondre aus dem Chondriten Tieschitz (Mähren, Tschechien) finden wir sich durchdringende Olivinplattchen in einer Matrix aus faserigem Pyroxen und Glas. Diese Chondre hat nach ihrem Erstarren noch einige kleine Schmelztröpfchen gesammelt, welche an der Oberfläche zu faserigem Pyroxen erstarrten (siehe bei 1, 6 und 10 Uhr). Durchlichtbild, 5 mm lang.

16



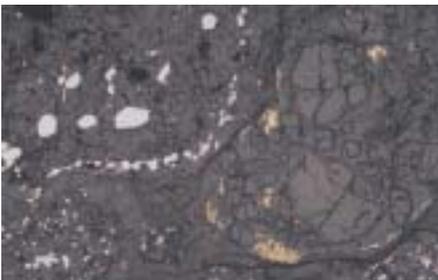
Nicht sehr friedliche Verhältnisse werden durch zahlreiche Chondren-Bruchstücke dokumentiert. Dieses Bruchstück einer sehr feinkörnigen Pyroxen-Chondre stammt von einer sehr großen Chondre, welche aus einem sehr großen Schmelztröpfchen entstand (die linke Seite des dreieckigen Fragments ist die originale Oberfläche der Chondre, ihr Radius war offensichtlich sehr groß). Das Fragment wurde auch noch von Fluiden attackiert, welche zu Veränderungen der Mineralogie und Chemie an der Oberfläche und auch entlang eines Risses führte. Objekte wie dieses dokumentieren Prozesse in fluidreicher Umgebung, wobei hauptsächlich Dämpfe, aber auch Flüssigkeiten (Wasser?) am Werke waren. Dies passierte, bevor das Objekt in den Chondriten eingebaut wurde – und dieser ist staubtrocken, zeigt keine Spur von Wasser. Das Fragment muss demnach auf seinen Reisen feuchte Gegenden besucht haben, hat darunter etwas gelitten und hat die trockene Region erreicht, in der es zur Zusammenfügung des Steines kam, den wir nun als Chondriten Tieschitz (Mähren, Tschechien) kennen. Durchlichtbild, 3 mm lang.

17



Eine recht komplexe Geschichte erzählt uns auch diese kleine Chondre aus dem Kohligen Chondriten Ornans (Doubs, Frankreich). Es begann mit einem Schmelztröpfchen, welches Olivin kristallisierte und so schnell abkühlte, dass der Rest der Schmelze zu Glas erstarrte. Dieses Olivin-Glas-Gemisch ist im Kern der Chondre erhalten geblieben. Die großen Olivine, welche den Kern umgaben, sind von SiO_2 -reichen Dämpfen angegriffen worden und wurden zum größten Teil in Pyroxen umgewandelt ($\text{Olivin} + \text{Kieselsäure} = \text{Pyroxen}$, oder: $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 = 2\text{MgSiO}_3$). Nachdem diese Attacken beendet waren, wurde wiederum Olivin, diesmal sehr feinkörnig, auf der Oberfläche abgelagert – unsere Chondre hat offensichtlich den Ort gewechselt, hier herrscht wieder Mangel an SiO_2 ! Letztendlich besuchte unser gutes Stück eine staubreiche Gegend und wurde da in einen Staubmantel gehüllt. Dieser sehr feinkörnige Staub enthält wohl hauptsächlich Staub des solaren Nebels, aber auch kleine Mengen von Staub aus der interstellaren Molekülwolke, aus der der solare Nebel entstand. Hier finden sich Sternenstaub und originale, unveränderte Kohlenwasserstoff-Moleküle aus dem interstellaren Raum, Materie, welche viel älter als unser Sonnensystem ist. Durchlichtbild, ca. 0,5 mm lang.

18



Verschiedene Objekte in Chondriten dokumentieren häufig sehr verschiedene Erlebnisse. In diesem Bild eines polierten Schliffes des Kohligen Chondriten Renazzo (Emiglia Romagna, Italien) sind neben einander zwei Objekte zu sehen, welche offensichtlich völlig verschiedene Gegenden des solaren Nebels besucht haben. Das Objekt links besteht aus Silikaten (grau), in welche NiFe Metall (weiß) eingebettet ist. Die Silikate sind fast völlig frei von Fe, das heißt, alles Fe ist im Metall, das Objekt dokumentiert stark reduzierende (= sauerstoffarme) Bildungsbedingungen. Das Objekt rechts besteht ebenfalls aus Silikaten (grau) in welche Sulfide (gelb) eingebettet sind. Die Silikate sind Fe-reich und Metall fehlt hier zur Gänze. Dieses gute Stück dokumentiert oxidierende (sauerstoffreiche) und schwefelreiche Bildungsbedingungen. Die beiden Objekte haben auf ihren Reisen also völlig verschiedene Bedingungen erlebt, haben sich danach getroffen, um gemeinsam in Chondriten Renazzo ihr Grab zu finden. Bild im reflektierten Licht, etwa 1,5 mm lang.

19



Ein typischer Kohliger Chondrit vom CM-Typ (Cochabamba, Bolivien). Die frisch gebrochene Fläche ist anthrazitfarben von den kohligen Bestandteilen, hauptsächlich Kerogene, Riesenmoleküle unbekannter Zusammensetzung (variable Gehalte an H-C-O-N) in der feinkörnigen Chondriten-Matrix. Heller grau sind die Silikatobjekte, welche etwa 50 Vol.% des Chondriten ausmachen. Einige Chondren sind an ihrer runden Oberfläche erkennbar. Bei genauerem Hinsehen sind dunkle und hellere Gesteinspartien zu erkennen. Der Chondrit besteht also nicht aus einem einheitlichen Gestein, sondern ist aus vielen verschiedenen Gesteinen zu-

sammengesetzt. Trotzdem hat jede kleine Probe von einigen Zehntel Gramm die gleiche chemische Zusammensetzung – auch die gleiche wie die Sonne (ohne H und die Edelgase). Stücklänge ist etwa 5 cm.

20



Viele Objekte mancher kohligler Chondrite haben im solaren Nebel Metamorphosen erlebt, welche ihre Ursprünge fast völlig unsichtbar werden lassen. Dieses Objekt im kohliglen Chondriten Nogoya (Argentinien) besteht aus Tonmineralien, grünem Cronstedtit (ein Eisen-Silikat), Wolken von schwarzem Magnetit und einigen Kristallen von braunem, Cr-haltigem Al-Spinell. Letzterer ist der einzige Überlebende der ursprünglichen Mineralien und zeigt uns an, dass diese Objekt ein silikatreiches Objekt war – ähnlich jenen, die wir aus anderen Chondriten kennen. Seine Reise in eine feuchte Gegend des solaren Nebels führte zu fatalen Veränderungen durch extreme Anpassung an die Umgebung: alle ursprünglich wasserfreien Silikate wurden in wasserhaltige umgewandelt und nur der Spinell widerstand den Attacken. Das Objekt blieb auch gleich in der wasserreichen Gegend und wurde im wasserreichen Chondriten Nogoya begeben. Durchlichtbild, etwa 0,3 mm lang.

21



Wasserhaltige Minerale sind in Meteoriten sehr beweglich. Hier sehen wir Ausblühungen von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) auf einer Bruchfläche des kohliglen Chondriten Nogoya (Argentinien). Beim Lagern der Meteoriten tritt Feuchtigkeit aus dem Inneren des Steines aus und nimmt auf dem Wege gelöstes Sulfat mit. An der Oberfläche verdunstet das Wasser und scheidet das mitgeführte Sulfat aus. Diese Sulfate sind zum Teil mobilisierte Originalsulfate, zum Teil jedoch wahrscheinlich auch Neubildungen durch Oxidation in der irdischen Atmosphäre. Rasterelektronenbild, etwa 0,3 mm lang.

22



Schnitt durch ein präsolares Graphitkorn aus dem Meteoriten Murchison (Australien). Im Zentrum befindet sich ein Titanitridkorn (TiN), welches für den Graphit als Kristallisationskeim diente. Der Graphit wuchs radial und bildete schalenförmige Anwachszonen, ein typisches Wachstum aus der Gasphase. Wegen des schalenförmigen Aufbaus wird er auch Zwiebel-Graphit genannt. Die Art des Wachstums, die Zusammensetzung

und die Isotopen-Zusammensetzung von C, O, Ti und N (welche allesamt nicht-solar sind) machen es wahrscheinlich, dass dieses Korn in der Sternatmosphäre eines Roten Riesen entstand – lange bevor die Sonne gebildet wurde. Durchlichtelektronenbild, < 1 µm Durchmesser.

23



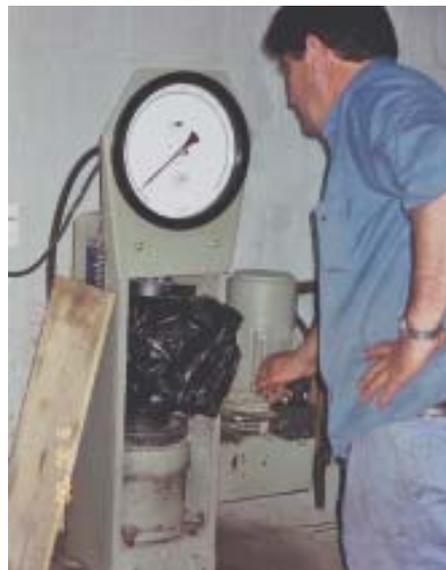
Der Rote Riese Betelgeuse (Alpha Orionis) fotografiert vom Hubble Space Teleskop. Dies ist das erste Bild eines Sternes, in dem dessen Größe direkt sichtbar ist. Betelgeuse ist ein sonnenähnlicher Stern, der im Sterben liegt und sich ausgedehnt hat. Der Durchmesser beträgt mehr als 7 Astronomische Einheiten (1 AE = Entfernung Erde-Sonne). Wenn unsere Sonne sich in etwa 5000 Millionen Jahren zum Sterben bereitmachen wird, wird sie alle inneren Planeten bis einschließlich Jupiter in sich aufnehmen. Die gewaltige Atmosphäre ist relativ kühl und kondensiert Staub, der vom Sternenwind in den interstellaren Raum abgeblasen wird. Dieser Staub wird bei der Entstehung eines neuen Sternes aus interstellaren Wolken zum größten Teil zerstört, nur ein sehr kleiner Teil überlebt und wird in die neu gebildeten Gesteine eingebaut. Daher finden wir auch nur wenige winzige Reste in den Meteoriten.

24



Der größte Angrit, den wir kennen: D'Orbigny (Buenos Aires, Argentinien). Den etwa 16 kg schweren Stein halte ich (Gero Kurat) im Garten des Besitzers, bevor wir ihn mit Hilfe von hydraulischen Pressen in einer Betonfabrik in Buenos Aires in viele Stücke zerlegten. Zu sehen ist die Kopfseite des Meteoriten, mit der er durch die Erdatmosphäre reiste. Die vom Mittelsteg weg gerichteten Regmaglypten entstanden durch das Abschmelzen in der Atmosphäre (siehe auch Abbildung 6). Die wissenschaftliche Untersuchung dieses seltenen Meteoritentypen hat uns völlig neue Wege zur Entstehung der Meteoriten aufgezeigt.

25



Die gute hydraulische Presse in Buenos Aires, üblicherweise zur Prüfung der Druckfestigkeit von Betonproben benutzt, welche uns half, D'Orbigny zu zerlegen und zu zwingen, seine Geheimnisse preiszugeben.

26



Die Bruchstücke von D'Orbigny zur Protokollierung und visuellen Beschreibung vor dem Haus des Besitzers aufgelegt und ich (Gero Kurat) bei der Arbeit. Diese Bruchstücke machten erstmals sichtbar, was niemals zuvor gesehen wurde und haben unsere Modelle zur Entstehung der Meteoriten nachhaltig verändert.

27



Detailansicht einer Hohlkugel aus dem Angriten D'Orbigny. Die dichte Schale besteht aus Anorthit (weiß, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Olivin (gelb, Mg_2SiO_4). Sie schließt eine Entstehung der Hohlkugel als Blase in einer Silikatschmelze aus, da alle Mineralien, welche aus dieser Schmelze kristallisieren können, in der Schale vertreten sein sollten, aber nicht sind. Nur zwei der drei Mineralien bauen die Schalen auf. Wir müssen also schließen, dass Anorthit und Olivin auf eine feste Kugel aufgewachsen sind und anschließend das Kugel-Mineral instabil wurde und verschwand. Wenn es Oldhamit war,

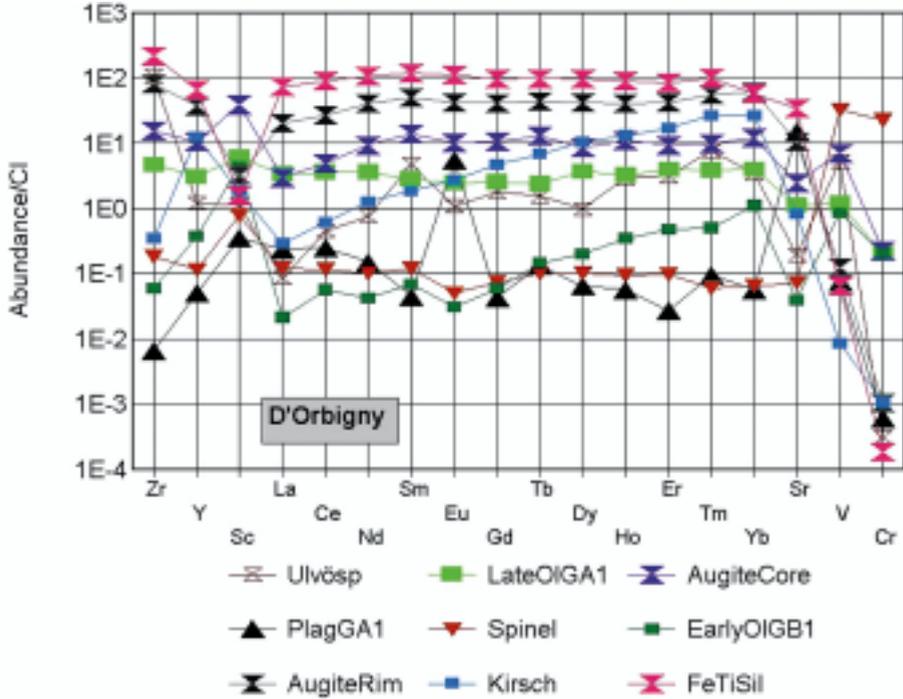
dann ist dieser zu SO_2 und CaO verbrannt: $\text{CaS} + 3\text{O} = \text{SO}_2 + \text{CaO}$.

Im Bild ist auch sehr schön zu sehen, dass die Anorthit-Olivin-Verwachsungen auch bäumchenartig von der Kugel weg gerichtet gewachsen sind. Sie haben ein sehr poröses Netzwerk gebildet, lange bevor der Augit kristallisierte und die Zwischenräume teilweise füllte. Wir konnten zeigen, dass der allgemeinen Glaube, dass Angrite magmatische Gesteine von einem Kleinplaneten sind, nicht stimmen kann und dass diese Gesteine wahrscheinlich im solaren Nebel durch Kondensation entstanden sind. Anschließend haben sie noch auf ihren Reisen durch den solaren Nebel komplexe Umwandlungen erlebt.

28



Große Augite (braun bis dunkelbraun) füllen einen ehemaligen Hohlraum im Angriten D'Orbigny. Der Hohlraum ist von Anorthit (weiß)-Olivin (hellbraun)-Verwachsungen umgeben, die zuerst da waren und welche durch gleichzeitiges Wachstum der beiden Phasen entstanden. Die Augite haben eine einheitliche chemische Zusammensetzung, dokumentiert durch die einheitliche Farbe. Sie sind überwachsen mit einem reinen Eisen-Augit (dunkelbraun), der als letzte Phase kristallisierte. Durchlichtbild, etwa 3 mm lang.



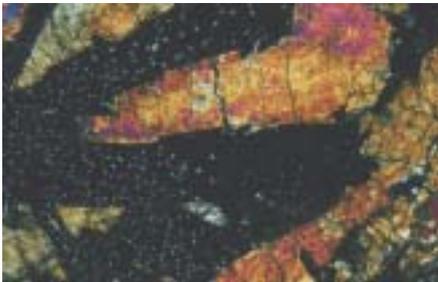
Spurenelement-Häufigkeiten in den einzelnen Phasen von Meteoriten können mittels einer Ionen-Sonde im Mikrobereich gemessen werden. Die Verteilung der Spurenelemente zwischen den Mineralien ist von den physikalisch-chemischen Bedingungen während der Bildung abhängig. Alle Gesteine haben ein derartiges Gedächtnis, das wir mit Hilfe von ausgeklügelten Instrumenten anzapfen können. Hier sehen wir die Spurenelement-Häufigkeiten in den wichtigsten Mineralien des Angrite D'Orbigny. Um die Daten leichter lesbar zu machen, werden die gemessenen Konzentrationen mit den Konzentrationen im solaren Nebel (= Sonne, = CI-Chondrit) verglichen. Dazu genügt eine einfache Division, z.B. $\text{KonzCa}(\text{Mineral})/\text{KonzCa}(\text{CI-Chondrit})$. Die so erhaltene Zahl wird «normierte Häufigkeit» genannt und sagt uns, wie viel mal häufiger ein Element in der Probe im Vergleich zu CI-Chondriten ist. In der Graphik sind die Elemente auf der x-Achse nach zunehmender kosmochemischer Flüchtigkeit angeordnet (Cr ist viel flüchtiger als Zr). Die y-Achse gibt die normierten Häufigkeiten. Wir sehen, dass die Spurenelementhäufigkeiten über einen weiten Bereich variieren (Achtung, die y-Achse hat

eine logarithmische Skala!). Am reichsten an Spurenelementen sind ein neues Fe-Ti-Silikat und der Eisen-Augit (ca. $100 \times \text{CI}$, bzw. $50 \times \text{CI}$) und am ärmsten sind Anorthit (PlagGA1) und Spinell (ca. $0,05 \times \text{CI}$ bzw. $0,1 \times \text{CI}$). Wir sehen, dass die meisten spurenelementreichen Minerale ein flaches Häufigkeitsmuster der Seltenen-Erden-Elemente (SEE, La - Yb) haben, womit sie uns signalisieren, dass sie aus einem Milieu stammen, welches primitive Häufigkeiten dieser Elemente hatte. Das kann z.B. der solare Nebel gewesen sein. Ohne auf Details eingehen zu wollen, sehen wir recht einfach auch eine zweite wichtige Botschaft: das SEE-Muster des Anorthits hat eine starke Anomalie im Eu-Gehalt. Kristallisiert ein solcher Anorthit aus einer Schmelze, so wird diese an dem Element Europium (Eu) stark verarmt, was zur Folge hat, dass alle Mineralien, welche später kristallisieren, eine negative Eu-Anomalie haben. Dies kann man in irdischen und lunaren Gesteinen häufig beobachten. Hier im Falle des Angriten D'Orbigny trifft das allerdings nicht zu: die späten Mineralien, Fe-Ti-Silikat und Eisen-Augit, haben keine Eu-Anomalie! Das kann nur bedeuten, dass die spät kristalli-

sierten Mineralien eine eigene Quelle für die Spurenelemente hatten und dass diese Quelle auch solare relative Häufigkeiten der SEE hatte! Der scheinbar magmatische Stein D'Orbigny hat offensichtlich keinen magmatischen Ursprung – eine sehr wichtige Erkenntnis.

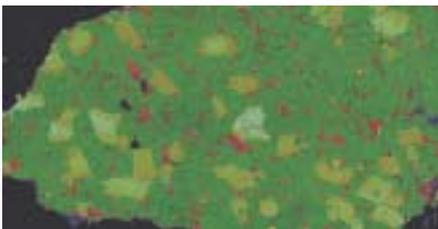
Abkürzungen: Ulvösp = Ulvöspinell; LateOLGA1 = spät kristallisierter Olivin; Augite-Core = Augit Kern; PlagGA1 = Anorthit (Plagioklas); EarlyOLGB1 = früh kristallisierter Olivin; AugiteRim = Augit Rand (= Eisen-Augit); Kirsch = Kirschsteinit; FeTiSil = Eisen-Titan-Silikat.

30



Shergottite, die Basalte der SNC Meteoriten (scheinbar nur 160 Millionen Jahre alt!), tragen Zeichen der Einwirkung starker Schockwellen. Dieser Basalt (Meteorit Shergotty, Indien) bestand ursprünglich aus Plagioklas (Feldspat) und Pyroxen (farbig). Der Plagioklas wurde allerdings durch Schockwellen in eine optisch isotrope Phase umgewandelt (im Bild schwarz), die wir «Maskelunit» nennen, sozusagen ein Plagioklas-Glas. Die grauen Fleckchen sind Plagioklas-Kristallite, das Glas ist im Begriff zu entglasen. Durchlichtbild mit gekreuzten Polarisatoren, etwa 1 mm lang.

31



Nakhla, ein Pyroxenit der SNC-Meteoriten, besteht aus großen Augiten (grün), Olivinen (gelb bis hellgrün) und feldspatreicher,

feinkörniger Zwickelfüllung (Falschfarben-Bild!). Die Augite sind einheitlich zusammengesetzt, die Olivine jedoch nicht (Farbänderungen entsprechen Änderungen der chemischen Zusammensetzung). Da die Olivine offensichtlich Räume zwischen den Pyroxenen füllen, müssen sie nach letzteren entstanden sein. Dies widerspricht der weit verbreiteten Ansicht, dass Nakhla ein Kumulat-Gestein eines basaltischen Magmas sei, denn das basaltische Magma scheidet zuerst Olivin aus und dann erst Pyroxen. Wenn diese Mineralien auf den Boden der Magmakammer sinken, sollten die Olivine ihre magmatische Tracht (gut kristallisierte Kristalle) behalten. Auch sollten sie eine einheitliche Zusammensetzung oder einen chemischen Zonarbau parallel zur Kristalloberfläche haben – auch das ist nicht der Fall. Die Botschaft ist: Nakhla ist kein magmatisches Kumulat-Gestein, sondern eine andere Genese haben. Wahrscheinlich ist eine Entstehung direkt im solaren Nebel – und nicht auf dem Mars, wie ein weit verbreiteter Irrglaube vermeint.

Dieses Gestein enthält jedoch auch Halogeniden, Sulphate und Karbonate. Andere Gesteine des SNC-Klans enthalten zusätzlich auch organische Verbindungen. Dies gab Anlass zu wilden Spekulationen, auch von vielen prominenten Meteoritenforschern: mögliche Lebensspuren vom Mars!? Tatsächlich weisen die Salze und organischen Verbindungen eher auf eine Verwandtschaft der SNC-Meteoriten mit den kohligem Chondriten hin – auch die C-, O- und N-Isotopen-Häufigkeiten unterstützen diese Verwandtschaft.

32a



32b



Ein ganz seltener Meteorit: der Olivinit der SNC-Meteorite, Chassigny. (a) Das Gestein. (b) Dünnschliff im Durchlicht mit gekreuzten Polarisatoren. Wir sehen eine dichte Packung von Olivinen, welche im Begriff sind, ihre Korngrenzen zu ordnen – ein Prozess, der zur Minimierung der Oberflächenenergie führt und häufig in irdischen metamorphen Gesteinen zu beobachten ist. Bildlänge ist etwa 3 mm.

Weitverbreitet ist der Glaube, dass dieser Stein vom Mars stammt und ein Stück des Mars-Mantels ist! Dieser Glaube hält allerdings einer genaueren Betrachtung nicht stand und unsere Untersuchungen ergaben, dass wir es mit einer Aggregation von Olivinen zu tun haben, welche niemals eine Lava gesehen haben, sondern wahrscheinlich aus der Dampfphase gewachsen sind. Sie sind reich an Einschlüssen, von denen jeder einzelne anders als der andere ist – eine Unmöglichkeit für einen magmatischen Olivin.

33



Ein Meteorit vom Mond in der Libyschen Sahara: Dar al Gani 400 (DAG 400). Dieser 1,4 kg schwere Stein stammt vom Mond-Hochland – eine Regolith-Brekzie, reich an Feldspat. Vor den Mondmissionen der USA (Apollo) und der Sowjetunion (Luna) gab es viele, zum Teil sehr alte Theorien, die besagten, dass

bestimmte oder sogar alle Meteorite vom Mond stammen könnten. Da jedoch kein einziges Stück eines mit den Mondgesteinen vergleichbaren Gesteines in den Meteoritensammlungen gefunden wurden, musste in einer theoretischen Abhandlungen gezeigt werden, dass Steine vom Mond nicht auf die Erde fallen können. Im Jahre 1982 jedoch wurde ein solcher Stein von einer US-amerikanischen Expedition in der Antarktis gefunden und schnell als Mondgestein identifiziert (ALHA 81005, eine Hochland-Brekzie). Schon 1979 fand eine japanische Expedition einen merkwürdigen Stein, welcher später ebenfalls als Mondgestein erkannt wurde (Yamato 791197, ebenfalls eine Hochland-Brekzie). Seither wurden etwa 30 Mondmeteorite in kalten und heißen Wüsten gefunden.

34



Mondhochlandgestein im Dünnschliff. Die helle Farbe der Mondhochländer wird durch den hohen Gehalt an Feldspäten (Plagioklas, Anorthit) verursacht. Es findet sich da auch ein extremes Gestein, welches praktisch nur aus Anorthit besteht und Anorthosit genannt wird. Im Bild haben wir den berühmten und sehr alten Anorthosit 15415, eine Probe, welche von der Apollo-15-Mannschaft aufgesammelt wurde. Die Streifen sind Zwillingskristalle («polysynthetische Zwillinge»), wie sie typisch für alle Plagioklase sind. Eingeschlossen in die Plagioklase sind winzige Fe-Mg-Silikate (gelb, weiß). Durchlichtbild mit gekreuzten Polarisatoren, etwa 3 mm lang.

35a



Mesosiderite sind sehr merkwürdige Gesteine. Wir sehen hier in einer Platte des Meteoriten Mincy (USA) eine Sammlung von Silikatgestein- und Mineraltrümmern (grau) in einer Matrix bestehend aus Silikaten (grau) und Metall (weiß). Das gängige Entstehungsmodell sieht einen Zusammenstoß von zwei Planetesimalen, einer bestehend aus Eukrit-Basalten und der andere aus Metall, für die Entstehung der Mesosiderite vor. Das Metall wurde dabei geschmolzen und hat sich mit den Silikat-Trümmern innig vermischt. Stücklänge etwa 6 cm.

35b



Bei näherem Hinsehen erweist sich, dass das Metall nur selten eigene Körper bildet und fast immer nur Hohlräume zwischen den Silikaten ausfüllt. Wir sehen hier (Mesosiderit Crab Orchard) ganz klar, dass die Silikate (grau) ein Netzwerk bilden. Wir sehen weiter, dass Silikate auch in die Porenräume eingewachsen sind. Das bedeutet natürlich, dass das Metall erst kam, als die Silikate schon längst da waren – als hochporöses und fragiles Aggregat! Da die Porenräume um die großen Silikatbrocken nicht

anders sind als weit weg davon (siehe oben), ist die Aggregation sehr zart, ohne Gewalt erfolgt. Das spricht für einen schwerelosen Zustand während der Entstehung und spricht natürlich gegen die weitverbreitete Kollisions-Theorie. Wir haben es also mit eukritischen Silikat-Aggregaten zu tun, welche sich im schwerelosen Raum bildeten. Anschließend wurden die Porenräume mit Metall gefüllt, und zwar fugenlos! Kein Porenraum blieb frei! Das kann natürlich auch nicht mit einer Metall-Schmelze gemacht werden, sie würde die delikaten Aggregate zerstören, sondern nur mittels Ausscheidung aus einem Gas. Nur ein Gas kann alle Winkel erreichen und alle Ecken ausfüllen.

Die besten Bedingungen, sowohl für die Aggregatbildung als auch für die Ablagerung von Metall in den Hohlräumen bietet natürlich wieder der solare Urnebel und nicht ein Kleinplanet. Bild einer polierten Fläche, etwa 3 mm lang.

36



Historische Ansicht des Meteoritensaales (Saal V) des Naturhistorischen Museums in Wien. Wir blicken Richtung Saal IV und sehen an der linken Wand die Sammlung großer Eisenplatten, rechts einen Teil der Gesteinsammlung und die Neßfeld'sche Planetenmaschine. Die Pultvitrinen im Zentrum beherbergen die Systematische Meteoritensammlung und haben mikroskopische Aufnahmen von Meteoriten als Mittelwand. Etwa 1970.

37



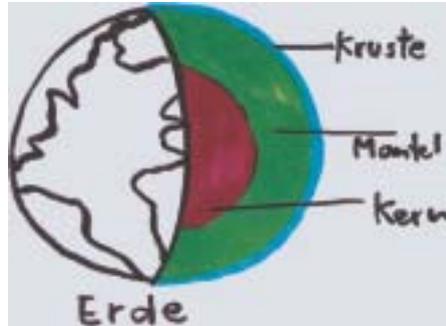
Neben Silikatgesteinen kommen in den Eisenmeteoriten auch isoliert Silikat-Mineralien vor, wie hier ein reines SiO_2 -Mineral (im Mendall County Eisenmeteoriten), ein Cristobalit, eine kubische SiO_2 -Modifikation. Dieser schöne Kristall, ein kleiner Würfel (0,075 mm Kantenlänge) mit gerundeten Kanten, muss so gewachsen sein, wie wir ihn heute vorfinden und muss schon fertig gewesen sein, als das Metall gebildet wurde. Da er offensichtlich ein Einzelgänger ist und frei schwebend unterwegs war, muss er auch so gebildet worden sein. Dafür bietet sich der solare Urnebel an. Allerdings gibt es dann ein größeres Problem, und zwar: Die solare Materie hat ein Defizit an Si, gemessen an der Häufigkeit der anderen Elemente, was dazu führt, dass SiO_2 -arme Minerale, wie der Olivin sehr häufig sind. Um reines SiO_2 aus der Gasphase ausscheiden zu können, muss deren Zusammensetzung entsprechend verändert werden, was durch Ausscheiden der anderen Elemente bewerkstelligt werden kann. Dieser Einzelgänger ist also Zeuge eines schon fraktionierten solaren Nebels. Dieser und auch andere Einzelgänger (wie Chromit, Daubreelit und Schreibersit, z.B.) sind Zeugen extremer chemischer Fraktionierungsprozesse im solaren Nebel. Diese sind sehr wohl vergleichbar mit ähnlichen Prozessen, welche in der Erde (Mantel und Kruste) ablaufen und unter anderem zur Bildung von Lagerstätten führen, ohne welche unsere heutige Zivilisation nicht möglich wäre. Mikroskopische Aufnahme im reflektierten Licht mit gekreuzten Polarisatoren.

38



Durch Auflösen des Metalls in Salpetersäure kann man die Silikate und andere Minerale, welche in den Eisen eingeschlossen sind isolieren. Hier sehen wir aus Kendall County auf diese Art gewonnene Cristobalit Würfel und einen Würfel, der auch Oktaederflächen zeigt (Kubooktaeder), neben unregelmäßigen Stücken von Enstatit (hell) und Chromit (schwarz). Mikroskopische Aufnahme im Durchlicht, Bildlänge etwa 0,8 mm.

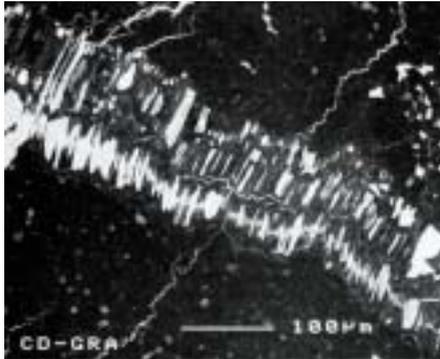
39



Schematischer Aufbau chemisch differenzierter planetarer Körper, z.B. der Erde. Körper, welche sich durch Zusammenballung solarer Materie bilden und dabei vollständig schmelzen, bilden einen Metall-Kern (etwa $\frac{1}{3}$ der Gesamtmasse) und einen Silikat-Mantel (etwa $\frac{2}{3}$ der Gesamtmasse). Große Körper, wie die Planeten Erde, Venus und Mars bilden auch eine dünne Kruste (etwa 0,5% der Gesamtmasse) aus, welche aus Teilschmelzen aus dem Mantel besteht (Basalte, Andesite). Wenn die differenzierten Meteoriten von differenzierten Planetesimalen stammen sollten, müßten sie auch in diesen Häufigkeiten vorkommen, nämlich $\frac{1}{3}$ Eisen und $\frac{2}{3}$ Peridotite und 0,5% Basalte. Was wir

in den Sammlungen haben, sind jedoch $\frac{1}{3}$ Eisen und $\frac{2}{3}$ basaltähnliche Gesteine und deren Verwandte – ein klarer Hinweis darauf, dass diese Meteoriten eine andere Entstehung haben müssen.

40



Einige Einschlüsse in Eisenmeteoriten erinnern sich offensichtlich direkt an den Zerfall von Verbindungen, wie z.B. Carbonylen, welche vor der Bildung der Eisen existierten. In Graphiteinschlüssen finden sich beide Zerfallsprodukte nebeneinander: Graphit (C) und Metall (FeNi). Und die Art und Weise, wie diese Phasen miteinander vorkommen, bezeugt auch, dass sie aus der Gasphase gewachsen sind. Hier sehen wir eine Ader in einem Graphit-Gestein aus dem Eisenmeteoriten Canyon Diablo, welche quer durch das Bild läuft. Sie besteht aus Graphit (schwarz) und Metall (hell). Der Graphit bildet Pakete, welche senkrecht zur Gang-Wand stehen und welche mit Metall verwachsen sind. Die beiden Produkte des Zerfalls von Fe,Ni-Carbonylen sind also nebeneinander erhalten. Um diesen Gang zu füllen, mussten die Stoffe in Dampf-Form herbeigeführt worden sein. Eine Schmelze mit dieser Zusammensetzung würde extrem hohe Temperaturen benötigen. Die Bildung bei relativ niedriger Temperatur wird durch die inhomogene Zusammensetzung des Metalls wahrscheinlich gemacht. Raster-Elektronen-Bild einer polierten Oberfläche.

41



Allende, CV3, ein typischer Chondrit. Mit freiem Auge erkennen wir eine Vielzahl von Objekten, welche offensichtlich Individuen sind. In einer dichten Packung von etwa gleich großen, gut sortierten Chondren finden sich auch große, unregelmäßige Objekte. Besonders auffallend sind die großen weißen Einschlüsse, welche chemisch besonders stark differenziert sind (Ca-Al-reiche Einschlüsse) und nur aus Mineralien bestehen, welche bei sehr hohen Temperaturen im solaren Nebel stabil sind. Andere Objekte bestehen aus den gängigsten Mineralien, wie Olivin und Pyroxen und die schwarze Matrix zwischen den Objekten besteht aus Fe-reichen Silikaten und enthält große Mengen an organischen Molekülen und auch präsolaren Körnern, darunter auch Diamanten. Dieses Stück, wie jeder andere Chondrit auch, dokumentiert, dass die Materie im solaren Nebel prozessiert worden ist mit dem Ergebnis, dass viele verschiedene Objekte erzeugt wurden. Alle diese Produkte und auch noch Staub, welcher nicht prozessiert wurde, aggregierten und bildeten den Stein, welchen wir nun Allende nennen. Trotz der sehr unterschiedlichen Zusammensetzung der Bausteine haben die Aggregate (=Chondrite) immer eine Zusammensetzung, welche jener der Sonne ähnelt.

Länge: etwa 10 cm.

Auch hier sind bei näherem Hinsehen, hierarchische Aggregat-Strukturen sichtbar. Für gute Karten dieser Strukturen gibt es eine Belohnung. Bitte an Gero Kurat senden, Angebot gilt bis 2010.

42



Kometen sind faszinierende Objekte. Sie bestehen aus Eis (Wasser, CO₂ und CO), Steintrümmern und Staub. Sie sind sozusagen die Mistkübel des Sonnensystems, haben sich in großer Entfernung von der Sonne gebildet und alles aufgesammelt, was es da zum Sammeln gab: Steine, Staub, Eis und organische Moleküle. Ein Teil der Materie wurde im solaren Nebel prozessiert, der andere muss wohl aus der ursprünglichen interstellaren Molekülstaubwolke stammen, aus dem unser Sonnensystem entstanden ist. Kometen sollten daher auch reich an präsolaren Materie sein. Kometen bewohnen die sehr sonnenfernen Gegenden des Sonnensystems und siedeln nach heutigem Wissen in zwei prinzipiellen Regionen: dem Edgeworth-Kuiper-Gürtel und der Oort'schen Wolke.

Kometen werden durch die großen äußeren Planeten, wie Jupiter und Saturn, oder durch Annäherungen anderer Sterne an das Sonnensystem aus ihrer Bahn geworfen und fallen in das Innere des Sonnensystems, Richtung Sonne. Auf ihrem Weg kommen sie auch in die Nähe der Erdbahn und kreuzen diese auch manchmal. Mit der Annäherung an die Sonne beginnt das Eis der Kometen zu sublimieren. Der Komet gibt Gase und Staub ab, diese sind auch als Kometenschweife sichtbar. Der Staub kollidiert zum Teil mit der Erde – die Mikrometeoriten stammen hauptsächlich von den Kometen. Machen Kometen die Reise in das Innere des Sonnensystems mehrfach, werden sie kleiner und erhalten eine gerundete Oberfläche. Frisch importierte Kometen, wie der Komet Wild-2 in diesem Bild, (etwa 5 km im Durchmesser) sehen ganz anders aus. Wir sehen viele Krater, welche sehr frisch aussehen und sehr steile Kraterwände haben. Diese Oberfläche war dem Bombardement von

anderen Körpern ausgesetzt und das wahrscheinlich vor sehr, sehr langer Zeit. Die «Stardust»-Sonde der NASA hat diese Aufnahme gemacht. Sie hat auch Proben vom abgeblasenen Staub gesammelt – im Januar 2006 sollen die Proben die Erde erreichen. Dann werden wir wissen, woraus der Staubanteil eines Kometen besteht.

43



Unsere Proben für das ESA «Stone»-Experiment sind hier auf dem Hitzeschild der russischen Foton-12-Kapsel montiert. Der Basalt vom Pauliberg (Burgenland) ist schwarz, der künstliche Marsboden und der Dolomit von Lagazuoi (Italien) sind weiß. Die Kapsel wird exakt mit dieser Seite in die Erdatmosphäre eindringen und unsere Proben werden der Reibungs-Hitze ausgesetzt werden.

44



Die Foton-12-Kapsel nach der Landung in der Steppe bei Orenburg, Russland, am 24. 9. 1999. Wir sehen die kräftigen Spuren des heißen Rittes durch die Erdatmosphäre. Die Kapsel ist an der Frontseite stark angebrannt und Schmelze wurde über die Vorderseite geblasen. Es bildeten sich auch sehr

schöne Regmaglypten aus – die Frontseite ist damit übersät – wie bei richtigen Meteoriten, siehe z.B. die Bilder von Cabin Creek (Abb. 6) und D’Orbigny (Abb. 24). Ein russischer Kollege versucht, die Probenhalter mit den Proben abzulösen, der Autor schaut zu – und viele andere Personen auch, ein Maureridyll.

45



Die spärlichen Reste unsere Proben auf der Foton-12-Kapsel in der Steppe des südlichen Urals. Leider fehlte der Pauliberg Basalt vollständig, inklusive Halter (oberste Position, weißes Klebemittel ist sichtbar). Links davon sind die Reste des künstlichen Marsbodens sichtbar. Die mobilisierten Basaltfragmente haben eine tiefe Rinne in den Halter und den angrenzenden Hitzeschild gegraben. Die unterste Probe ist der Dolomit vom Lagazuoi, der mit etwa 1/3 seiner ursprünglichen Masse überlebte. Erstaunlich ist die hohe Präzision der Raumschiffer: der tatsächliche atmosphärische Wiedereintrittspunkt der Kapsel liegt nur wenige Zentimeter neben dem geplanten (in der Mitte zwischen oberer und unterer Probenposition). Auch hier sind die Regmaglypten sehr schön zu sehen.

46



Das geglückte Experiment mußte im Labor der TsSKB in Samara, Russland, natürlich auch begossen werden. Auf dem Etikett der Foton-12-Vodkaflasche sind auch alle Experimente aufgelistet – fast alle verliefen sehr erfolgreich.

47



Vitrine «Gestalt der Eisenmeteoriten» im Saal V des Naturhistorischen Museums in Wien, mit einer Sammlung von Eisentrümmern des Canyon Diablo Meteoriten. Die einzelnen Stücke zeigen keinerlei Verletzungen, können also nicht aus einem einzigen großen Stück herausgeschlagen worden sein. Wie die Teile ursprünglich angeordnet und verbunden waren, wissen wir nicht.

48



Wolfe Creek Krater in Australien, ein junger (< 300 000 Jahre), kleiner (880 m Durchmesser), gut erhaltener Einschlagkrater in Quarzit, in dessen Umgebung auch Reste des Impaktors (etwa 50 000 t), eines Eisenmeteoriten, gefunden wurden.

49



Moldavit aus Böhmen, Tschechien. Eine glasig erstarrte Schmelze des Bodens, wie er vor etwa 15 Millionen Jahren in der Gegend des Nördlinger Ries (Bayern), existierte. Die Schmelze wurde durch den Einschlag eines großen außerirdischen Körpers gebildet und über 400 km nach Osten geschleudert, wo sie in einem Gürtel, reichend von Sachsen bis Niederösterreich und Mähren, als Glasregen niederging. Am Ort der Entstehung der Schmelze klafft nun ein Loch mit etwa 20 km Durchmesser, das Nördlinger Ries, ein Einschlagkrater. Die jetzige äußere Form dieser Gläser entstand durch Ätzung im Boden. Das Stück hat einen Durchmesser von etwa 3 cm.

Glossar

- Achondrit** Ein Steinmeteorit ohne Chondren und ohne chondritischem Gefüge. Einige Achondrite sind irdischen Laven recht ähnlich und es wird daher angenommen, dass sie von einem großen Asteroiden stammen (Vesta-HED-Meteoriten) oder gar von einem Planeten (Mars-SNC-Meteoriten).
- Allende** Pueblito de Allende, Chihuahua, Mexiko, Kohliger Chondrit (CV3), gefallen um 1.05 Uhr am 8. Februar 1969. Einer der bestuntersuchten Meteoriten!
- Andesit** Vulkanisches Gestein, welches durch Aufschmelzen der ozeanischen Kruste in Subduktionszonen der Erde entsteht und welches die kontinentale Erdkruste aufbaut. Andesit besteht hauptsächlich aus Plagioklas mit etwas Biotit, Hornblende oder Pyroxen.
- Angrit** Meteorit (Pyroxenit), hauptsächlich bestehend aus Augit, selten.
- Anorthit** Calcium-Feldspat (Plagioklas), $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.
- Aphel** Der sonnenfernste Punkt der Umlaufbahn eines Körpers des Sonnensystems. Alle Körper bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne.
- Apollo Asteroiden** Asteroiden auf Bahnen mit Halbachsen über einer Astronomischen Einheit und einer Perihel-Entfernung von weniger als 1,017 Astronomischen Einheiten.
- Asteroiden** Kleinplaneten oder Planetoiden mit Durchmesser von weniger als einem bis etwa 685 Kilometer (Ceres), welche sich hauptsächlich auf Bahnen zwischen jenen von Mars und Jupiter bewegen. Die meisten sind viel kleiner als Ceres und nur 200 - von vielen Tausenden - haben einen Durchmesser von mehr als 100 Kilometer.
- Ataxit** Ein Eisenmeteorit ohne Widmanstätten'sche Figuren («gefügelos»). Die meisten sind nickelreich und bestehen hauptsächlich aus Taenit.
- Astronomische Einheit (AE)** Der mittlere Abstand des Mittelpunktes der Erde zum Zentrum der Sonne (149 500 000 Kilometer).
- Aubrit** Ein Enstatit-Achondrit, ein Gestein, welches fast ausschließlich aus Enstatit besteht (Pyroxenit). Dieser ist häufig sehr grobkörnig (bis 10 cm). Aubrite enthalten auch eine Reihe exotischer Minerale, welche nur unter sehr reduzierenden (sauerstoffarmen) Bedingungen stabil sind, wie Oldhamit, Osbornit und Sinoit.
- Augit** Ein häufiges Mineral der Pyroxen-Gruppe mit der angenäherten Formel $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$.
- Bakterien** Meist einzellige Mikroorganismen, welche sich durch Zellteilung vermehren. Bakterien sind auch für höhere Lebewesen, auch für den Menschen, wichtige Gehilfen, z. B. beim Verdauen der Nahrung. Sie sind aber auch die Ursache vieler Krankheiten.
- Basalt** Ein vulkanisches Gestein, hauptsächlich bestehend aus Olivin, Pyroxen und Plagioklas.
- Brekzie** Ein Gestein, bestehend aus Bruchstücken anderer Gesteine, welche mittels eines feinkörnigen Bindemittels verfestigt sind (verfestigter Schutt). Auf der Erde entstanden Brekzien u. a. durch Gletscher-Aktivitäten («Höttinger Brekzie») oder durch tektonische Aktivitäten, auf dem Mond wurden sie durch Einschläge außerplanetarer Körper gebildet (Impakt-Brekzien - auch auf der Erde bekannt).
- Ca-Al-reiche Einschlüsse** Objekte verschiedener Größe und Form, bestehend aus Ca-Al-reichen Mineralen - so genannte refraktäre Mineralien, welche bei hohen Temperaturen stabil sind und daher als erste Phasen aus dem heißen solaren Nebel ausgeschieden werden («Frühkondensate»).
- Cabin Creek** Arkansas, USA, Eisenmeteoriten (mittlerer Oktaedrit), gefallen um 15.00 Uhr am 27. März 1886.
- Canyon Diablo** Arizona, USA, Eisenmeteorit (grober Oktaedrit), mehr als 20 000 Fragmente des Meteoroiden, welcher vor etwa 50 000 Jahren den Meteor Crater (Barringer Crater, etwa 1,2 km Durchmesser) schuf.
- Carbonyl** Das CO-Molekül in organischen oder anorganischen Verbindungen von Metallen mit CO, z. B. $\text{Fe}(\text{CO})_5$, das stabilste Eisen-Carbonyl.
- Chassignit** Ein Achondrit der SNC-Meteoriten, welcher hauptsächlich aus Olivin besteht («Dunit»).
- Chassigny** Haute-Marne, Frankreich, «Dunit» (olivinreiches Gestein) des SNC-Meteoriten-Klans, gefallen um 8.00 Uhr am 3. Oktober 1815.
- Chondrit** Steinmeteorit, welcher Chondren enthält und eine chemische Zusammensetzung hat, welche jener des kondensierbaren Anteils der Sonnenmaterie entspricht. Die «gewöhnlichen Chondrite» sind die bei weitem häufigsten Meteoriten.
- Chondre** Kügelchen mit einem Durchmesser von etwa einem Millimeter oder weniger. Chondren sind Hauptbestandteil vieler Chondrite (daher der Name). Sie sind offensichtlich ehemalige Schmelztröpfchen, welche rasch abkühlten und meist feinkörnig kristallisierten. Manche enthalten auch Glas, womit sie eine sehr rasche Abkühlung anzeigen.

Chromit Ein Spinell mit der Formel FeCr_2O_4 .

Cochabamba Bolivien? Kohliger Chondrit (CM2), Fallumstände unbekannt.

Cohenit Ein Eisen-Nickel-Carbid, $(\text{Fe,Ni})_3\text{C}$, welches häufig in Eisenmeteoriten vorkommt, aber nur selten in Chondriten.

Coopertown Tennessee, USA, Eisenmeteorit (grober Oktaedrit), gefunden 1860.

Crab Orchard Tennessee, USA, Mesosiderit, gefunden 1887.

Cristobalit Hochtemperatur-Modifikation des SiO_2 , kristallisiert kubisch (die Si-Atome sind nach der Diamant-Struktur angeordnet) und ersetzt bei Temperaturen über 1470 Grad Celsius den uns sehr gut bekannten Quarz.

Daubreelit Ein Schwefel-Spinell mit der Formel FeCr_2S_4 (siehe Chromit).

Deuterium Das schwere Wasserstoff-Isotop ^2H oder D, mit der doppelten Masse des gewöhnlichen Wasserstoffs, ^1H . Sein Anteil am irdischen Wasserstoff beträgt nur 0,015 Prozent – im Kosmos ist D noch seltener.

Differenziert Im Zusammenhang mit Objekten des Sonnensystems bedeutet dies, dass sich dieser Körper in Regionen verschiedener chemischer Zusammensetzung geteilt hat, wie z.B. die Erde, welche aus einem metallischen Kern, silikatischem Mantel und einer silikatischen Kruste besteht. Das war nicht immer so, sondern passierte in der Frühgeschichte der Entwicklung der Erde.

Diogenit Ein Achondrit des HED-Klans, der hauptsächlich aus Orthopyroxen (Pyroxenit) besteht.

D'Orbigny Buenos Aires, Argentinien, Angrit, gefunden 1979. Der größte bekannte Angrit (16,55 kg).

Dunit Ein Gestein, welches hauptsächlich aus Olivin besteht.

Edgeworth-Kuiper-Gürtel Ein Gürtel um die Bahnebene der Planeten außerhalb der Umlaufbahn von Neptun, bewohnt von Kometen. Pluto ist wahrscheinlich auch einer der Bewohner, ein besonders großer, und auch Charon, Plutos Begleiter. Ansonsten finden sich viele dunkle bis rötliche Körper mit einigen Kilometern Durchmesser.

Einschluss Ein in einem Körper eingeschlossener Fremdkörper. Einschlüsse gibt es in Mineralien (z.B. Glas-Einschlüsse) und in Gesteinen (Fremdobjekte oder Objekte, deren Entstehung ungeklärt ist, z.B. Calcium-Aluminium-reiche Einschlüsse in Chondriten und Mikrometeoriten).

Elektron Elementarteilchen mit einer Masse, welche $1/1836$ der Masse eines Wasserstoffatoms entspricht und welches eine elektrische Ladung von -1 trägt. Elektronen umkreisen die positiv geladenen Kerne der Elemente in großem Abstand. Die Anzahl der Elektronen eines Elementes ist gleich der Anzahl der Protonen in dessen Kern (Ladungsausgleich).

Elektronen-Rastermikroskop Mit einem feinfokussierten Elektronenstrahl wird die Oberfläche eines Festkörpers abgetastet. Die von der Oberfläche ausgesandten Elektronen – schnelle reflektierte Primärelektronen und langsame Sekundärelektronen – können separat gezählt werden und geben eine Abbildung der Oberfläche und/oder ihrer chemischen Eigenschaften.

Elektronen-Sonde Kurzname für «Elektronenstrahl-Mikrosonde» (EMS), ein Gerät, welches Haupt- und Nebenelement-Mikroanalysen von Festkörpern erlaubt. Dabei wird ein feingebündelter Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche geschossen, erzeugt in der Probe Röntgenstrahlung, welche mittels Röntgenspektrometern analysiert wird.

Endotherme Reaktion Eine chemische Reaktion, welche Energie (Wärme) verbraucht, z.B. die Spaltung von Wasser in der elektrolytischen Reaktion $2\text{H}_2\text{O} + \text{E} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Bei der Wiedervereinigung wird hingegen Energie wieder freigesetzt (exotherme Reaktion).

Enstatit Das magnesiumreiche Endglied (MgSiO_3) der Mischreihe Enstatit-Ferrosilit der calciumarmen Pyroxene. Das Hauptmineral der Enstatit-Meteoriten, Enstatit-Chondriten und Aubriten, und auch häufiger Bestandteil von Kohligen Chondriten und Mikrometeoriten.

ESA European Space Agency mit Hauptquartier in Paris.

Eukrit Ein Achondrit des HED-Klans mit basaltischer Zusammensetzung, bestehend aus Plagioklas und Klinopyroxen. Das Gefüge ist häufig ähnlich irdischen Doleriten (nicht Basalten, wie meist behauptet) und daher wird auch angenommen, dass die Eukrite (wie der gesamte HED-Klan) vulkanischen Ursprungs sind und vom Asteroiden Vesta stammen.

Exotherme Reaktion Eine chemische Reaktion, bei der Energie (Wärme) freigesetzt wird, z.B. beim Verbrennen von Kohle: $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{E}$.

Extremophil Extreme physiko-chemische Bedingungen liebend, z.B. extremophile Lebewesen, welche sehr tiefe (unter 0°C) oder sehr hohe Temperaturen (über 70°C) bevorzugen

oder eine Salzsole als Lebensvoraussetzung («halophil») brauchen, was für die meisten Lebewesen absolut tödlich ist.

Feldspat Ein häufiges gesteinsbildendes Aluminium-Silikat. Wir unterscheiden Alkalifeldspäte, Natrium-Kalium-Feldspäte – z. B. Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) – und Plagioklase – Mischkristalle zwischen Albit und Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Anorthit ist unter den Frühkondensaten des solaren Nebels und in den Achondriten verbreitet, Albit in den gewöhnlichen Chondriten. Alkalifeldspäte sind in Meteoriten sehr selten, da Meteoriten kaliumarm sind.

Feuerball Ein sehr heller Meteor, verursacht durch einen außerirdischen Körper von Zentimeter- bis Meter-Größe. Jeder Meteorit fällt mit einer Feuerball-Erscheinung.

Geozentrisch Mit der Erde als Zentrum (z. B. einer Umlaufbahn).

Glorieta Mountain New Mexico, USA, Pallasit (auch mittlerer Oktaedrit), gefunden 1884.

Graphit Alpha-Kohlenstoff, die bei niedrigem Druck stabile Form des kristallinen Kohlenstoffes (z. B. auf der Erdoberfläche). Die Hochdruck-Modifikation ist der Diamant. Graphit ist häufig in den Ureiliten, Mesosideriten und Eisenmeteoriten, seltener in den Chondriten enthalten und fehlt in vielen Achondriten. Ein kleiner Teil des Graphits in Chondriten ist präsolare Herkunft und stammt von längst vergangenen Roten Riesen Sternen (Sternenstaub).

HED-Meteoriten Der Meteoriten-Klan, bestehend aus Howarditen, Eukriten und Diogeniten, von dem angenommen wird, dass er vom Asteroiden Vesta stammt.

Heliozentrisch Mit der Sonne als Zentrum (z. B. einer Umlaufbahn).

Hexaedrit Eisenmeteorit, welcher aus einem Einkristall des nickelarmen Kamazits besteht. Dieser spaltet sich einfach entlang der Würfel Flächen (= Hexaeder, ein Sechsfächner), daher der Name.

Howardit Ein Achondrit des HED-Klans, der aus Mineral- und Gesteinsbruchstücken von Eukriten und Diogeniten besteht.

Kraschina Agram, Kroatien, Eisenmeteorit (mittlerer Oktaedrit), gefallen um 18.00 Uhr am 26. Mai 1751.

Hydrid Eine Verbindung eines Elementes mit Wasserstoff.

Impaktkrater Krater, welcher durch den Hochgeschwindigkeits-Einschlag eines Himmelskörpers gebildet wurde. Ein Teil der sehr hohen kinetischen Energie des einschlagenden Körpers wird in Schockwellen und Wärme umgesetzt und führt zur Explosion des Projektils und eines Teils der getroffenen Materie, dessen Produkte der Krater und Auswurfgesteine (Impaktbrekzien) sind.

Inklination Im Sonnensystem bedeutet es den Winkel zwischen der Umlaufbahn eines Objektes und der Ebene der Erdumlaufbahn (Ekliptik).

Ionen-Sonde Kurzbezeichnung für ein komplexes Gerät namens «Sekundär-Ionen-Massenspektrometer» (SIMS), welches Haupt- und Spurenelement-Analysen von Festkörpern im Mikrobereich erlaubt. Dabei werden mittels eines gebündelten Primärionenstrahles Atome aus der Oberfläche der Probe geschlagen und in einem Massenspektrometer analysiert.

Isotop Ein Atom eines bestimmten chemischen Elementes mit definierter Anzahl von Protonen und Neutronen. Zum Beispiel besteht der Atomkern des häufigsten Sauerstoff-Isotops ^{16}O aus 8 Protonen (welche die chemischen Eigenschaften bestimmen) und 8 Neutronen ($8 + 8 = 16$), jener von ^{18}O aus 8 Protonen und 10 Neutronen.

Kamazit Alpha-Nickel-Eisen mit wenig (bis zu 7,5 Gew.%) Nickel. Hauptmineral der Eisenmeteoriten, Stein-Eisen-Meteoriten und Chondriten.

Kendall County Texas, USA, Eisenmeteorit, chemisch und strukturell anomal, gefunden 1887.

Klinopyroxen Pyroxen mit niedriger, monokliner, Symmetrie. Umgangssprachlich benennt das Wort auch den Ca-reichen Pyroxen, $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$, welcher immer monoklin kristallisiert – im Gegensatz zu den Ca-armen Pyroxenen, welche auch eine höhere Symmetrie (orthorhombisch) annehmen können, was von den Bildungsbedingungen abhängt.

Kometen Kleine Objekte des Sonnensystems (einige Kilometer Durchmesser), hauptsächlich bestehend aus Eis (Wasser, Kohlendioxid u. a. m.) mit etwas Staub (Silikate und organische Verbindungen), werden daher auch als «schmutzige Schneebälle» bezeichnet. Sie gehören dem äußeren Sonnensystem an und bevölkern den «nahen» Edgeworth-Kuiper-Gürtel (gerade außerhalb der Umlaufbahn von Pluto) und die «ferne» Oort'sche Wolke, eine das Sonnensystem einhüllende Kugelschale mit einem Radius von bis zu 200 000 Astronomischen Einheiten. Kometen, welche in das innere Sonnensystem abgelenkt werden, bewegen sich auf extrem elliptischen, ja sogar parabolischen Bahnen, werden in Sonnen-

nähe erwärmt, wodurch das Eis sublimiert und den Staub freisetzt. Beides bildet die «Koma», welche den Kometenkern umgibt und vom Sonnenwind weggeblasen wird. Daher entwickeln Kometen zwei mächtige Schweife («Schweifsterne»), einen bestehend aus Gasen, der immer von der Sonne weg orientiert ist, und einen zweiten aus Staub, der als gekrümmter Schweif sichtbar ist. Nur etwa 4 Prozent aller bekannten Kometen sind periodisch wiederkehrend (wie z.B. Halley). Kometen sind die wichtigsten Lieferanten von Staub für das innere Sonnensystem und die Hauptmasse der außerirdischen Materie, welche täglich auf die Erde fällt, stammt von ihnen. Bewegt sich die Erde durch eine Kometenstaub-Bahn, haben wir das Vergnügen, Sternschnuppen-Schauer zu erleben (z.B. die Perseiden – Staub vom Kometen Swift-Tuttle).

Korund Aluminium-Oxyd (Al_2O_3), ein seltenes Mineral in Chondriten. Meist sind es Frühkondensate des solaren Nebels, aber auch präsolare Korunde finden sich in kohligem Chondriten (Sternenstaub).

Kryokonit Dunkler Schlamm, welcher sich in der Schmelzzone der grönländischen Eisdecke bildet. Er besteht aus Kokons von Siderobakterien, welche Staub einhüllen und festhalten. Kryokonit ist eine wichtige Quelle für kosmischen Staub.

Magmatisch Von einem Magma stammend. Magmatische Gesteine sind solche, die aus einer Silikatschmelze gebildet wurden (Basalt, Gabbro, Granit, etc.).

Magnetit Eisenspinell, $FeFe_2O_4$.

Maskelynit Durch Schockwellen verglaste Plagioklas (z.B. in Shergottiten).

Matrix Grundmasse, welche andere Komponenten zusammenhält. In magmatischen Gesteinen ist es die feinkörnige Restschmelze (wie auch in Chondriten) und in sedimentären Gesteinen, wie Brekzien, das feinkörnige Bindemittel (wie auch in Chondriten).

Meteor Eine Lichterscheinung in der Atmosphäre, verursacht durch Reibungswärme von sich sehr schnell bewegenden Objekten (Meteoroiden, Satellitenteile) in der Luft. Die große kinetische Energie der außerirdischen Objekte, welche mit 12–80 Kilometer pro Sekunde in die Erdatmosphäre eindringen, wird dabei in Wärme umgewandelt, der Körper abgebremst.

Meteorit Die Restmasse eines Meteoroiden, welche auf der Erdoberfläche landet, nachdem er beim Eintritt in die Erdatmosphäre einen Meteor (Feuerball) erzeugte. Steinige Meteoroiden verlieren bis zu 95 Prozent ihrer Masse auf der feurigen Reise durch die Atmosphäre, eiserne meist weniger als 20 Prozent.

Meteoroid Ein Objekt im interplanetaren Raum mit Kurs auf die Erde, wo es einen Meteor und vielleicht auch einen Meteoriten (Mikrometeoriten) produzieren wird. Diese Körper sind üblicherweise kleiner als ein Asteroid und größer als ein Molekül (etwa 0,000 000 010 – 1000 m).

Meteoroidenstrom Ein Strom von festen Partikeln, welche von einem Mutterkörper (meist ein Komet) freigesetzt wurden und auf ähnlichen Umlaufbahnen die Sonne umlaufen.

Meteorschauer Mehrere Meteore die sich in etwa gleicher Richtung bewegen. Meteore eines Schauers scheinen von einem Punkt am Himmel ihren Ursprung zu nehmen, dem Radianten.

Mikrometeorit Ein kleiner Meteoroid, der den Eintritt in die Erdatmosphäre überlebte. Mikrometeoriten sind kleiner als ein Millimeter und tragen die Hauptmasse der auf die Erde fallenden außerirdischen Materie. Rund 100 Tonnen von etwa 0,2 Millimeter kleinen Partikeln stoßen täglich mit der Erde zusammen. Sie sind Hauptteil des interplanetaren Staubes, welcher hauptsächlich von Kometen stammt. Mikrometeoriten werden am besten im Eis der Polkappen gesammelt (Arktis und Antarktis), ihre kleineren Brüder, die stratosphärischen interplanetaren Staub-Partikel mit weniger als 0,05 Millimeter Durchmesser, können auch mittels hoch fliegender Flugzeuge und Ballone in der Stratosphäre gesammelt werden.

Mincy Missouri, USA, Mesosiderit, gefunden 1857.

Moissanit Silizium-Carbid (SiC), sehr seltenes Mineral in Chondriten und meist von präsolare Herkunft (Sternenstaub von längst verstorbenen Roten Riesen Sternen).

Moldavit Tektit des zentraleuropäischen Streufeldes (Tschechien, Sachsen, Österreich) – aus dem Nördlinger Ries (Bayern) stammend und vor etwa 15 Millionen Jahren entstanden.

Murchison Victoria, Australien, kohliges Chondrit (CM2), gefallen um 10.58 Uhr am 28. September 1969. Einer der bestuntersuchten Meteoriten!

Nakha El Nakha, El Bahariya, Ägypten, Pyroxenit des SNC Meteoriten-Klans, gefallen um 9.00 Uhr am 28. Juni 1911.

Nakhlit Achondrit des SNC-Meteoritenklans, hauptsächlich bestehend aus Augit (Klinopyroxen) mit etwas Olivin.

NASA National Aeronautics and Space Administration mit Hauptquartier in Washington D.C., USA.

Neutron Ein Kernbaustein, der in den Kernen aller Atome vorkommt, ausgenommen dem gewöhnlichen Wasserstoff, ^1H . Es hat keine elektrische Ladung (daher der Name) und eine Masse ähnlich jener des Protons.

Nogoya Entre Ríos, Argentinien, Kohliger Chondrit (CM2), gefallen am Abend des 30. Juni 1879.

Oktaedrit Ein Eisenmeteorit mit Widmannstätten-Gefüge. Platten von Kamazit (Alpha-Nickel-Eisen) sind nach den Oktaederflächen des ursprünglichen Gamma-Nickel-Eisen-Kristalles, der bei hohen Temperaturen existierte, orientiert. Das Gefüge hat sich beim extrem langsamen Abkühlen des Metalls (wenige Grad Celsius pro Million Jahre!) gebildet und ist – verständlicherweise – im Labor nicht nachzuahmen.

Oldhamit Calcium-Sulfid (CaS), ein verbreitetes Mineral in Enstatit-Meteoriten. Calcium ist ein stark lithophiles Element und verbindet sich auf der Erde immer mit dem Sauerstoff. Großer Sauerstoff-Mangel zwingt das Calcium, Verbindungen mit Schwefel einzugehen. Das Mineral gibt es auf der Erde nicht, es ist hier auch nicht stabil sondern oxidiert zu Calcium-Oxid und Schwefeldioxid.

Olivin Mischkristalle von Forsterit (Mg_2SiO_4) und Fayalit (Fe_2SiO_4), das bei weitem häufigste Mineral der Meteoriten. Besonders schön ausgebildet in den Pallasiten und sehr häufig in Ureiliten, in Chassigniten und in Chondriten.

Oort'sche Wolke Eine Kometen-Wolke, welche eine Hügelschale bildet, das Sonnensystem einhüllt und wahrscheinlich einen Radius von 200 000 Astronomischen Einheiten hat – die äußere Grenze des Sonnensystems, 200 000-mal weiter von der Sonne entfernt als wir. Möglicherweise gibt es mehr als eine Billion (10^{12}) Kometen in dieser Wolke, alle typischerweise einige Kilometer im Durchmesser.

Organometallische Verbindungen Organische Moleküle, in denen ein Metallatom direkt mit einem Kohlenstoffatom verbunden ist. Solche Verbindungen werden zur Darstellung reiner Metalle oder zur Züchtung von reinen Kristallen als Transportmittel für die Metalle in der Gasphase benutzt. Im frühen Sonnensystem waren solche Verbindungen wahrscheinlich auch verbreitet und halfen, z.B. bei der Bildung der Eisenmeteoriten mit.

Ornans Doubs, Frankreich, Kohliger Chondrit (CO3), gefallen um 19.15 Uhr am 11. Juli 1868.

Orthopyroxen Ein Magnesium-Eisen Silikat, Mischkristall von Enstatit (MgSiO_3) und Ferrosilit (FeSiO_3). Sehr verbreitet in den meisten Meteoriten.

Osbornit Titanium-Nitrid (TiN), ein seltenes, aber charakteristisches Mineral der Enstatit-Meteoriten und sehr seltener präsolarer Sternenstaub in Kohligen Chondriten.

Pallasit Ein Stein-Eisen-Meteorit, bestehend aus einem sehr losen Aggregat von meist großen (Zentimeter) Olivin-Kristallen in einer Nickel-Eisen-Matrix. Das Metall der Pallasiten ist mit jenem der Oktaedriten verwandt.

Panspermia Theorie, welche den Ursprung des Lebens im Weltall vermutet, von wo es durch kosmischen Staub oder Meteoriten auf die Erde gebracht wurde. Auch Pandemien (z.B. Grippe-Epidemien) werden auf diese Weise erklärt – heute nicht sehr populär.

Perihel Der sonnennächste Punkt der Umlaufbahn eines Körpers des Sonnensystems. Alle Körper bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne.

Petrologie Die Wissenschaft, die sich mit der Entstehung und Entwicklung der Gesteine beschäftigt.

Plagioklas Ein Natrium-Calcium-Aluminium-Silikat der Feldspat-Familie, Mischkristalle von Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Hauptmineral der basaltischen Achondriten und häufiger Nebengemengteil der Chondriten und anderer Meteoriten.

Planet Ein nicht-leuchtender Himmelskörper, welcher einen Stern umläuft.

Planetesimal Ein kleiner Körper, welcher im solaren Nebel gebildet wurde und als Baustein für größere Körper diente.

Plessit Feinkörnige Verwachsung von Kamazit und Taenit, welche die Zwickel zwischen den großen Kamazit-Platten der Oktaedrite füllt.

Plutonisch Ein plutonisches Gestein ist ein magmatisches Gestein, welches tief (Kilometer) unter der Oberfläche eines planetaren Körpers erstarrte (Tiefengestein). Typische Vertreter sind Gabbro und Granit.

Poynting-Robertson-Effekt Die Sonnenstrahlung bewirkt einen Verlust des Drehmoments kleiner Körper (unter 1 cm), weshalb sie langsam auf Spiralbahnen in die Sonne fallen. Auf diesem Wege kreuzen sie auch die Erdbahn und werden von der Erde aufgesammelt (siehe Mikrometeoriten). Sehr kleine Partikel (unter 0,001 mm) werden durch den Strahlungsdruck der Sonne aus dem inneren Sonnensystem vertrieben.

Prambachkirchen Oberösterreich, Gewöhnlicher Chondrit (L6), gefallen um 21.55 Uhr am 5. November 1932.

Präsolare Entstanden oder existent bevor die Sonne und das Sonnensystem gebildet wurden.

Proton Der Kern des gewöhnlichen Wasserstoffs, H^+ . Positiv geladener Kernbaustein aller Elemente (zusammen mit Neutronen), deren Ordnungszahl der Anzahl der Protonen im Kern entspricht.

Pyroxene Komplexe Silikat-Gruppe mit einer Vielzahl an Mineralien mit der generellen chemischen Formel ABC_2O_6 , wobei Position A Calcium und Natrium, Position B Magnesium, Eisen, Mangan und Aluminium und Position C Silizium und Aluminium aufnehmen. Pyroxene sind in Meteoriten weit verbreitet und sind Hauptminerale in vielen Achondriten und Chondriten.

Radiant Der astronomische Himmelspunkt, von dem die Meteore eines Schauers scheinbar ihren Ursprung nehmen.

Redox Kurzform für Reduktion-Oxidation. In einer Redox-Reaktion wird ein Elektron von einem Element an ein anderes transferiert, wobei der Geber oxidiert (aus Na wird Na^+) und der Nehmer reduziert wird (aus Cl wird Cl^-).

Regmaglypt Vertiefungen auf der Oberfläche von Meteoriten, welche an Daumeneindrücke erinnern. Sie entstehen beim Abschmelzen während des Abbremsens in der Atmosphäre und werden von lokalen kleinen Luftwirbeln verursacht.

Regolith Der Schutt, welcher die Oberfläche von Himmelskörpern bedeckt. Er entsteht durch wiederholte Einschläge von anderen Himmelskörpern (Impakt-Aktern) und besteht aus Gesteins- und Mineralfragmenten und Impakt-Gläsern.

Renazzo Emilia Romagna, Italien, Kohliger Chondrit (CR2), gefallen um 20.30 Uhr am 15. Januar 1824.

Sahel Umayyir 001 (SAU 001), Gewöhnlicher Chondrit (L4/5), gefunden 2000 im Oman.

Schmelzkruste Die geschmolzene äußere Kruste eines Meteoriten, welche während der feurigen Reise durch die Atmosphäre (Feuerball) gebildet wurde. Alle frisch gefallenen Meteoriten haben eine Schmelzkruste und sind an dieser relativ leicht als Meteoriten zu erkennen.

Schreibersit Eisen-Nickel-Phosphid, $(Fe,Ni)_3P$, ein häufiges Mineral der Eisenmeteoriten, seltener in Chondriten und Ureiliten.

Serpentin Magnesium-Eisen-Silikat-Mineralgruppe mit der allgemeinen chemischen Formel $(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$, «wasserhaltig» und häufig in CI, CM und CR Kohligen Chondriten. Serpentine entstehen auf der Erde hauptsächlich aus olivinreichen Gesteinen (Peridotiten) durch Reaktion mit Wasser («Serpentinisierung»). Daher ist der Glaube weit verbreitet, dass auch die meteoritischen Serpentine auf eine ähnliche Art und Weise in Kleinplaneten entstanden sind. Es gibt allerdings viele Hinweise darauf, dass die Serpentine der Chondriten Produkte des abgekühlten (unter $300^\circ C$) solaren Nebels sind.

Shergottit Ein basaltischer Achondrit des SNC-Klans, bestehend aus Klinopyroxen und Maskelynit. Letzterer ist ein ehemaliger Plagioklas, welcher – wahrscheinlich durch Schockwellen – isotropisiert wurde, also aus dem kristallinen Zustand in den glasigen Zustand überführt wurde, ohne die Gestalt zu ändern, welche noch immer jene des ursprünglichen Plagioklases ist.

Shergotty Bihar, Indien, basaltischer SNC Meteorit, gefallen um 9.00 Uhr am 25. August 1865.

Siderophil Ein siderophiles Element liebt den metallischen Zustand («eisenliebend») – im Gegensatz zu den lithophilen Elementen, welche den oxidierten Zustand vorziehen («steinliebend»). Typische siderophile Elemente sind die Edelmetalle wie Platin, Iridium und Gold.

Sikhote-Alin Wladiwostok, Russland, Eisenmeteorit, sehr grober Oktaedrit, gefallen um 10.38 Uhr am 12. Februar 1947.

Silikat Salz der Kieselsäure. Silikate sind die wichtigsten und häufigsten Mineralien der Erde und der inneren Planeten unseres Sonnensystems, der Steinmeteoriten und der Mikrometeoriten. Die Erde besteht zu $\frac{2}{3}$ aus Silikaten (die allerdings unter extrem hohem Druck im tiefen Erdinneren zu Oxiden zerfallen).

Smektit Tonmineral der Smektit-Gruppe, komplexe Silikate, welche Wasser aufnehmen und wieder abgeben können, wichtige Wasserspeicher landwirtschaftlicher Böden.

Solarer Nebel Jener Teil einer sehr viel größeren interstellaren Gas-Molekül-Wolke, aus der das Sonnensystem entstand.

Springwater Saskatchewan, Kanada, Pallasit, gefunden 1931.

Suevit Auswurfbrekzie eines Impakts, bestehend aus Gesteins- und Mineralfragmenten und Glasfladen in glasreicher Matrix.

Supernova Explodierender Stern, dessen Leben damit beendet ist. Die meisten schweren Elemente wurden in Supernovae erzeugt, ohne sie gäbe es keine Steine und auch kein Leben.

Taenit Gamma-Nickel-Eisen mit hohem Nickel-Gehalt (10–60 Gew.%), welches in Eisenmeteoriten und auch in Chondriten verbreitet ist.

Tektit Natürliches Glas, welches durch den Einschlag eines außerirdischen Objektes auf der Erde durch Aufschmelzen des Bodens und Auswurf über weite Strecken entstand. So stammen die Moldavite (Gläser aus Tschechien, Mähren, Sachsen und Österreich) vom Einschlag-Krater Nördlinger Ries (Bayern) der vor rund 15 Millionen Jahren gebildet wurde.

Tieschitz Mähren, Tschechien, Gewöhnlicher Chondrit (H3), gefallen um 13.45 Uhr am 15. Juli 1878.

Tridymit Hochtemperatur-Modifikation von SiO_2 , hexagonal, Verwandter des Quarz.

Troilit Das meist reine Eisen-Sulfid FeS , verbreitet in den meisten Meteoriten, aber selten auf der Erde.

Ureilit Achondrit, hauptsächlich bestehend aus Olivin und etwas Pyroxen. Ureilite scheinen Verwandte der kohligen Chondrite zu sein, enthalten immer etwas Graphit und häufig auch Diamanten, welche wahrscheinlich im solaren Nebel gebildet wurden.

Vulkanisch Ein vulkanisches Gestein ist ein magmatisches Gestein, welches durch Ausfließen und Erstarren von Lava auf der Oberfläche eines Planeten entstand.

Wasserfrei Ohne Wasser oder Hydroxyl-Ionen, $(\text{OH})^-$. Die meisten Meteoriten-Mineralien sind wasserfrei, ausgenommen z.B. Tonminerale und Serpentin in kohligen Chondriten.

Wasserstoff Das einfachste und leichteste chemische Element mit der Atom-Masse 1, ^1H (Hydrogen, der Kern besteht nur aus einem Proton). Es ist das bei weitem häufigste Element des Universums, aller Sterne und auch der Sonne (etwa 90% der Sonnenmasse).

Widmanstätten'sche Figuren Das typische Gefüge der häufigsten Eisenmeteoriten, der Oktaedriten. Dieses Gefüge entstand möglicherweise während der Abkühlung von über 800 Grad Celsius, wobei sich Kamazit aus dem ursprünglichen Hochtemperatur-Taenit entmischte. Der Kamazit orientierte sich dabei nach den Oktaederflächen des Taenit.

Ybbsitz, Niederösterreich, Gewöhnlicher Chondrit (H4), gefunden 1977.

Zodiakallicht Ein schwacher Lichtschein sichtbar kurz nach Sonnenuntergang am westlichen und kurz vor Sonnenaufgang am östlichen Himmel. Die Erscheinung wird durch Streuung des Sonnenlichtes an interplanetaren Staubteilchen verursacht, welche sich in der Ekliptik angesammelt haben.