

Titelblatt

Allende (Chihuahua, Mexiko), ein typischer **Chondrit** – Mitglied der häufigsten Meteoritenklasse. Chondrite sind eine chaotische Sammlung von Objekten, welche alle ihre sehr persönliche, eigene Geschichte haben. Die runden Objekte nennen wir „**Chondren**“. Diese sind etwa 1 mm groß und geben der Meteoritenklasse auch ihren Namen. Die meisten 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 individuellen 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 Daten und in den Isotopen der chemischen Elemente.

Mit freiem Auge erkennen wir eine Vielzahl solcher Objekte, 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 gegenüber dem Durchschnitt verändert (differenziert) sind (**Ca-Al-reiche Einschlüsse**) und nur aus Mineralien bestehen, welche bei sehr hohen Temperaturen ($> 1500\text{ °C}$) im solaren Nebel stabil sind. Andere Objekte bestehen aus den gängigsten Mineralien, wie Olivin (Mg_2SiO_4) und Pyroxen (MgSiO_3) 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 Nano-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. Bei aufmerksamer Betrachtung sind im hier gezeigten Bild hierarchische Aggregat-Strukturen erkennbar.

Länge: etwa 5 cm. Photo: Alice Schumacher, NHM Wien.

Jänner

Ungeschmolzener **Mikrometeorit**, durchgeschnitten und poliert. „Große“ Magnetit-Kugeln (bestehend aus Platten) und Haufen von kleinen Magnetit-Kügelchen sind in einer Matrix von wasserhaltigen Tonmineralien eingebettet.

Mikrometeoriten repräsentieren die Hauptmasse der außerirdischen Materie, welche von der Erde ständig aufgesammelt wird. Etwa 100 t fallen täglich auf uns herab, Meteoriten gibt's nur etwa 100 t pro Jahr. Mikrometeoriten sind chemisch und mineralogisch verwandt mit sehr seltenen Meteoriten, den Kohligen Chondriten vom Typ CM- und CI-Chondrit.

Mikrometeoriten können nur auf den saubersten Plätzen der Erde für die Untersuchung gesammelt werden: den Eiskappen der Erdpole und der Stratosphäre. Der hier gezeigte Mikrometeorit wurde aus dem antarktischen Eis von Michel Maurette, Orsay, in der Nähe der französischen Station Cap Prudhomme aufgesammelt. Dieses relativ große (~ 50 µm) interplanetare Staubteilchen schaffte es, ungeschmolzen durch die Erdatmosphäre zu kommen und stammt sehr wahrscheinlich aus einem Kometen – wie der Großteil des außerirdischen Staubes. Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme. Photo: Gero Kurat, Wien

Februar

Kosmisches Kügelchen, ebenfalls aufgesammelt aus dem antarktischen Eis von Michel Maurette, Orsay, ist das Produkt einer kompletten Aufschmelzung eines interplanetaren Staubteilchens beim Eintritt in die Erdatmosphäre, welcher ja mit sehr hoher Geschwindigkeit erfolgt (>12 km/s). Die Schmelze bildete einen Tropfen, welcher sehr rasch abkühlte und skelettartige Olivine kristallisierte. Zwischen den Skelettbalken befand sich ursprünglich Glas, welches jedoch durch Schmelzwässer im Eis herausgelöst wurde.

Elektronen-Raster-Mikroskop-Aufnahme. Photo: Cecile Engrand, Orsay

März

Nakhla (Ägypten), ein **Achondrit** (Steinmeteorit ohne chondritische Struktur, also ohne Chondren – siehe unten) ist ein Olivin-Pyroxenit (Gestein, welches überwiegend aus Pyroxen mit untergeordnet Olivin besteht) des **SNC-Meteoriten-Klans**. In diesem Falschfarbenbild sehen wir Pyroxene (Augite, grün), Olivine (gelb bis hellgrün) und feldspatreiche, feinkörnige Zwickelfüllung (rot). 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 Minerale 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 daher: Nakhla ist kein magmatisches Gestein, sondern muss eine andere Genese haben. Wahrscheinlich ist eine Entstehung direkt im solaren Nebel – und nicht auf dem Mars, wie ein weit verbreiteter Glaube vermeint. Dieses Gestein enthält auch Salze (Halogeniden, inklusive Kochsalz, Sulfate 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 seltenen Kohligen Chondriten hin – auch die C-, O- und N-Isotopen-Häufigkeiten unterstützen diese Verwandtschaft.

Bildlänge ist 6,3 mm. Photo: Elke Wäsch, Berlin.

April

Eine der zwei Klasse der **Stein-Eisen-Meteoriten** besteht aus meist sehr lockeren Aggregaten von großen Olivin-Kristallen, welche in einer Matrix von Metall eingebettet sind. Die **Pallasite**, benannt nach einem von Hr. Pallas in einer Reisebeschreibung aus Sibirien beschriebenen Meteoriten (heute Krasnojarsk genannt), scheinen eher sehr poröse Aggregate von Olivinen, welche in Metall fixiert wurden zu sein, als Proben aus dem Inneren von chemisch differenzierten Kleinplaneten. Der gängigen Schulmeinung nach sind Pallasite Proben der Grenzlage zwischen dem metallischen Kern und dem silikatischen Mantel solcher Planeten. Der große Unterschied in der Dichte der hier gemischten Partner, Olivin hat $3,2 \text{ g/cm}^3$ und FeNi-Metall hat $\sim 8 \text{ g/cm}^3$, macht dies allerdings nicht sehr wahrscheinlich – wie auch das hohe Alter der Komponenten und einiges Andere mehr.

Hier sehen wir eine dünne Platte des Pallasiten **Springwater**, Saskatchewan, Kanada, im Durchlicht. Sie ist etwa 3 cm lang, besteht aus großen gerundeten Olivinen (grün) in einer Matrix von Metall (schwarz). Die rote Farbe kommt von terrestrischem Rost. Photo: Gero Kurat, Wien.

Mai

Das oktaedritische Gefüge ist typisch für die meisten **Eisenmeteoriten**, welche auch **Oktaedrite** genannt werden. Wir sehen hier eine etwa 15 cm lange Platte des Eisenmeteoriten **Coopertown**, Tennessee, USA.. Diese wurde poliert und anschließend leicht geätzt, wodurch das Gefüge 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. Das Gefüge entstand möglicherweise durch den Zerfall eines bei hoher Temperatur stabilen gamma-Eisen-Kristalles, wobei das frisch gebildete alpha-Eisen sich nach den Oktaeder-Flächen des ursprünglichen gamma-Kristalles orientierte. Die Entstehung dieses Gefüges braucht viel Zeit, viele Millionen Jahre, und daher eine sehr langsame Abkühlung, kann also im Labor nicht reproduziert werden.

Photo: MPA, NHM Wien.

Juni

Vitrine zum Thema „Gestalt der Eisenmeteoriten“ im Saal V des Naturhistorischen Museums in Wien, mit einer Sammlung von Eisentrümmern des **Canyon Diablo** (Arizona, USA) **Eisenmeteoriten**. Vor etwa 50.000 Jahren kollidierte ein Eisen-Meteoroid von etwa 60 m Durchmesser mit der Erde und schlug einen Krater von 1,2 km Durchmesser. Im Krater selbst fand sich kein Rest der Impaktors aber rund um den Krater konnten einige Tonnen Eisenmeteoriten, eben der Canyon Diablo, gesammelt werden. Offensichtlich sind das die Reste des Impaktors, welcher das große Loch in Arizona geschlagen hat. Das Merkwürdige ist jedoch, dass die einzelnen Stücke keinerlei Verletzungen zeigen, wie wir sie erwarten würden, wären sie aus einem großen Stück herausgeschlagen worden. Diese Stücke können also nicht aus einem einzigen großen Stück herausgeschlagen worden sein. Dass sie zum Verband des Impaktors gehörten, ist außer Zweifel, aber wie die Teile ursprünglich angeordnet und verbunden waren, wissen wir nicht. Diese Frage wird nicht leicht zu beantworten sein, da die Hauptmasse des Impaktors verschwunden ist und wir nur mehr die metallischen Zwickelfüllungen haben. Alles, von Eis über Silikate bis zu organischen Verbindungen kommt in Frage. Rätselhaft.

Bildlänge ist ~1 m (im Spiegelbild sind Nives Widauer beim Photographieren und die Vitrine mit den großen Eisenmeteoriten an ihrem ursprünglichen Standort zu sehen).

Photo: Gero Kurat, Wien

Juli

Die Hauptmasse der **Steinmeteoriten** gehört zur Klasse der **Chondriten**. Diese werden so genannt, weil sie merkwürdige runde Körper enthalten, Kügelchen von etwa 1 mm Durchmesser, die wir **Chondren** nennen. Sie geben uns Zeugnis von einem oder mehreren Hochtemperatur-Ereignissen im solaren Urnebel, die zur Bildung von Schmelztröpfchen führten, welche in der Folge beim Abkühlen erstarrten. Eine relativ einfache Geschichte erzählt uns diese Balken-Olivin-Chondre aus dem kohligem Chondriten von **Allende** (Chihuahua, Mexiko, siehe auch Titelseite). Der Kern besteht aus sogenannten Balken-Olivinen, welche in Wirklichkeit Platten-Olivine sind, und Glas (gelb). Die Olivin-Platten sind parallel orientiert, sind eigentlich ein einziger Kristall, der beim raschen Abkühlen eines Schmelztröpfchens kristallisierte. In der Folge traf ein zweites, kleineres Tröpfchen rechts auf das große und kristallisierte ebenfalls Olivin mit derselben Kristallorientierung wie im ersten Tröpfchen. Anschließend kondensierte noch mehr Olivin auf die 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, da sie hauptsächlich chemischer Natur sind. Diese subtilen Veränderungen geben uns Auskunft über die Erlebnisse der einzelnen Bausteine nach ihrer Entstehung und vor dem Aggregieren zu dem Stein, den wir nun Allende nennen und im Labor untersuchen können.

Dünnschliff-Durchlicht-Aufnahme, die natürliche Größe der Chondre ist ~1 mm.

Photo: Gero Kurat, Wien

August

Dass die Bausteine der Chondriten aus einem sehr heißen solaren Urnebel stammen, in dem alle Materie im Dampfzustand vorlag, machen die nicht so seltenen Objekte wahrscheinlich, die wir **Ca-Al-reiche Objekte** nennen. Hier sehen wir ein solches Objekt aus dem Kohligen Chondriten **Allende** (Chihuahua, Mexiko – siehe auch Titelseite und Juli-Bild) 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 Mineralen 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 Melilithen (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 silikatische Flüssigkeit auf dieses Aggregat, hüllte es ein und kristallisierte Anorthit (weiß, ein Feldspat, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Al-reichen Augit (braun, ein Pyroxen, 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 er enthält auch 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, wie Olivin und Pyroxen! 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.

Photo: Gero Kurat, Wien

September

Stein-Eisen-Meteoriten bestehen aus etwa gleichen Teilen von Silikaten (dunkel) und Metall (hell) wie, zum Beispiel der **Mesosiderit Crab Orchard** (Tennessee, USA). Wir sehen hier ganz klar, dass die Silikate (dunkel) ein Netzwerk, ein Gerüst bilden. Wir sehen weiters, dass Silikate auch im Metall (hell) vorhanden sind, in dieses eingewachsen erscheinen. Das bedeutet natürlich, dass zum Wachsen Platz vorhanden gewesen sein musste und dass das Metall erst kam, als die Silikate schon längst da waren. Die Silikate bildeten zu Beginn also ein hoch-poröses und fragiles Aggregat! Das Metall bildet nur selten eigene Körper, füllt aber fast immer die Hohlräume zwischen den Silikaten aus. Sowohl das Aggregieren, als auch das Füllen der Porenräume muss sehr zart und ohne Gewalt erfolgt sein. Das spricht für einen schwerelosen und windstillen Zustand während der Entstehung und spricht natürlich auch gegen die weitverbreitete Kollisions-Theorie, welche besagt, dass die Mesosiderite in einer Hochgeschwindigkeits-Kollision eines Silikat- und eines Metallkörpers (mit der Größe von Asteroiden und mehr) gebildet wurden. Wir haben es also eher mit eukritischen (basaltische Meteoriten) 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 Kondensation 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 im reflektierten Licht, etwa 3 mm lang. Photo: Gero Kurat, Wien

Oktober

Manche Meteoriten enthalten rätselhafte Hohlräume, welche häufig nicht beachtet werden, unsere Phantasie aber sehr anregen können. Da war doch etwas und ist nicht mehr, also: was war das? Eine nicht einfach zu beantwortende Frage.

Das Bild zeigt eine Detailansicht einer Hohlkugel aus dem **Angriten D'Orbigny** (Buenos Aires, Argentinien). Die dichte Schale besteht aus Anorthit (weiß, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Olivin (zart gelb, Mg_2SiO_4). Sie schließt eine Entstehung der Hohlkugel als Blase in einer Silikatschmelze mit der chemischen Zusammensetzung des Angriten D'Orbigny aus, da alle Minerale, welche aus dieser Schmelze kristallisieren können, in der Schale vertreten sein sollten, aber nicht sind. Nur zwei der drei Minerale bauen die Schalen auf – der Augit fehlt. Wir müssen also schließen, dass Anorthit und Olivin auf eine feste Kugel aufgewachsen sind und anschließend das Kugel-Mineral instabil wurde und verschwand. Kugelförmige Kristalle bildet gerne der Oldhamit (CaS), ein nicht seltenes Mineral in den sogenannten Enstatit-Meteoriten und ein Mineral, welches schon bei hoher Temperatur aus einem Gas solarer Zusammensetzung kondensiert. Wenn es im Falle der D'Orbigny Hohlkugeln der Oldhamit (CaS) war, dann ist dieser im Laufe der Geschichte zu SO_2 und CaO verbrannt: $\text{CaS} + 3\text{O} = \text{SO}_2 + \text{CaO}$. Eine Konsequenz des im solaren Nebel ansteigenden Sauerstoff-Partialdruckes, der zu umfangreichen Oxidationen in den meisten Meteoriten führte.

Im Bild ist auch sehr schön zu sehen, dass die Anorthit-Olivin-Verwachsungen 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. Der unter Meteoritenforschern weit verbreitet Glaube, dass Meteoriten der Angrite-Klasse magmatische Gesteine (Silikat-Schmelz-Gesteine) von einem Kleinplaneten sind, kann also nicht stimmen kann. Diese Gesteine sind daher wahrscheinlich im solaren Nebel durch Kondensation entstanden. Anschließend haben sie noch auf ihren Reisen durch den solaren Nebel komplexe Umwandlungen erlebt.

Bildlänge ~6 mm. Photo: Gero Kurat, Wien.

November

Shergottite, die Basalte der **SNC Meteoriten** und die jüngsten bekannten Meteoriten (scheinbar nur 160 Millionen Jahre alt!), tragen Zeichen der Einwirkung starker Schockwellen. Dieser Basalt (Meteorit **Shergotty**, Indien) bestand ursprünglich aus Plagioklas (Feldspat, schwarz) und Pyroxen (farbig). Der Plagioklas wurde allerdings durch Schockwellen in eine optisch isotrope Phase umgewandelt (daher ist er im Bild schwarz), die wir „Maskelynit“ nennen, sozusagen ein Plagioklas-Glas. Die grauen Fleckchen sind Plagioklas-Kristallite; das Glas ist im Begriffe zu entglasen.

Shergottite und die übrigen SNC-Meteoriten (**S**hergotty-**N**akhla-**C**hassigny) werden auch „Marsmeteoriten“ genannt auf Grund eines weit verbreiteten Glaubens, dass sie vom Mars stammen. Von diesem sollen sie in einigen wenigen Einschlag-Ereignissen losgeschlagen worden sein und einige dieser Trümmer kollidierten in der Folge mit der Erde. Es gibt etliche Probleme mit dieser Theorie, eines davon ist die Tatsache, dass wir auf der Erde etwa gleich viele Meteoriten von unserem nächsten Nachbarn, dem Mond, finden, wie vom sehr weit entfernten Mars. Warum das so ist, wissen wir nicht. Ein zweites ist die Tatsache, dass der Mars von Sedimenten bedeckt ist, sich aber unter den SNC-Meteoriten kein einziges Sedimentgestein befindet. Bei den Mond-Meteoriten finden wir – wie erwartet – hauptsächlich Gesteine der Mondoberfläche, warum gibt es unter den „Marsmeteoriten“ keine einzige Probe der Planeten-Oberfläche?

Durchlichtbild mit gekreuzten Polarisatoren, etwa 1 mm lang. Photo: Gero Kurat, Wien.

Dezember

Große Augite (braun bis dunkelbraun) füllen einen ehemaligen Hohlraum im **Angriten D'Orbigny** (Buenos Aires, Argentinien), ein seltener **Achondrit**. 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.

Angrite sind sehr seltene Achondrite unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung, Gemenge von unterschiedlichen Proportionen von Olivin, Anorthit und Al-reichem Augit. Sowohl die mineralogische als auch die chemische Zusammensetzung ist ähnlich jener der Ca-Al-reichen Einschlüsse in Chondriten. Es ist wahrscheinlich, dass die Angrite einfach Ca-Al-reiche Riesen sind, eigene Körper bildeten und daher nicht als Chondriten-Bausteine dienen konnten.

Dünnschliff-Bild im Durchlicht, etwa 3 mm lang. Photo: Gero Kurat, Wien