

Frank Brenker

Kosmochemische Untersuchung von Asteroiden - Ein direkter Blick in die Kinderstube unseres Sonnensystems

Probennahmen und Rücktransporte von anderen Himmelskörpern waren lange ein sehr seltenes Ereignis und auf den Erdmond begrenzt. Im Jahr 2006 gelang es der NASA dann erstmalig nach dem Ende des Apollo-Programms wieder eine extraterrestrische Probe zu nehmen. Es war das erste Mal, dass Proben von einem Kometen sicher zur Erde gebracht wurden. Seitdem hat geradezu ein Goldrausch eingesetzt und mehrere Weltraumorganisationen setzen gebündelt Kräfte ein, Proben von unterschiedlichen Himmelskörpern auf die Erde zu bringen, um diese dort in Laboren detailliert zu untersuchen. Erfolgreich gelang dies der japanischen Weltraumorganisation JAXA gleich zweimal. Mit den beiden Hayabusa-Missionen wurden erstmalig zwei sehr unterschiedliche Asteroiden beprobt. Während Hayabusa 1 noch lediglich eine reine Technik-Demonstration und Erprobung war, wurde mit Hayabusa 2 ein wissenschaftlich wichtiger wasser- und kohlenstoffreicher Asteroid angesteuert [1]. Fast zeitgleich schickte auch die NASA mit der OSIRIS-REx Mission eine Sonde zur Probennahme eines solchen als sehr ursprünglich geltenden und für das Verständnis unseres Sonnensystems wichtigen C-Klasse Asteroiden [2].

Die Beprobung der C-Klasse Asteroiden gelang in beiden Missionen, und die Proben wurden sicher zur Erde zurückgebracht (Abbildung 1). C-Klasse Asteroiden sind für einige der zentralen Fragen der Kosmochemie von immenser Bedeutung. In beiden konnten durch Messungen der jeweiligen Raumsonden hohe Wasser- und Kohlenstoff-Konzentrationen nachgewiesen werden [3]. Durch ihren hohen Wassergehalt sind sie bestens geeignet den Ursprung des Wassers auf unserer Erde zu klären. Die Existenz von ausgedehnten Wassermassen auf der Erde ist durch die sogenannte heiße Akkretion, also die Aufheizung durch die enorme Energie, die bei dem Zusammenstoß der Planetesimalen, die letztendlich die Erde formten, keineswegs selbstverständlich. Es ist vielmehr wahrscheinlich, dass zunächst große Mengen an leicht flüchtigen Bestandteilen ins Weltall entweichen konnten. Es ist daher nötig eine späte wasserreiche Komponente auf die Erde zu bringen. Hier sind

Kometen und/oder Asteroiden die wahrscheinlichste Quelle. Ob C-Klasse Asteroiden hier eine wichtige Rolle spielten, sollte durch den Probenrücktransport geklärt werden.

Eine weitere, wahrscheinlich noch wichtigere Frage, die die Missionen klären sollten, ist die nach dem Ursprung des Lebens [2]. Zwar erwartet niemand die Existenz von Lebensformen auf diesen mit eher lebensfeindlichen Bedingungen versehenen Himmelskörpern, aber Untersuchungen an Meteoriten der Klassen CM und CI zeigen eine ungewöhnlich hohe Diversität und Komplexität der organischen Substanz bis hin zu Aminosäuren, wie sie sich auch in unserer DNA finden lassen. In manchen der Untersuchungen der organischen Bestandteile dieser Meteorite wurde gar ein Vorherrschen links drehender Aminosäuren beobachtet. Die Bausteine für Leben scheinen sich also schon früh auf Asteroiden zu entwickeln. Zudem weisen Vergleiche von Infrarot-Spektren zwischen Meteoriten-Funden auf der Erde und Asteroiden darauf hin, dass C-Klasse Asteroiden die wahrscheinlichsten Herkunftsorte von Meteoriten des CM und CI-Typs sind [1, 2].

Obwohl wir also bereits mehrere Kilogramm Material auf der Erde haben, lohnt sich der aufwendige, mehrjährige und kostenintensive Flug dennoch. Da vor allem die Frage nach dem Ursprung des Lebens eine so hohe Bedeutung hat, ist es immens wichtig hier eine unumstößliche Antwort auf der Basis einwandfreier Daten zu erhalten. Dies ist aber mit der Untersu-



Abb. 1: Probencontainer der Hayabusa 2 Mission © JAXA

Prof. Dr. Frank E. Brenker
Schwiete Cosmochemistry Laboratory
J.W. Goethe Universität Frankfurt
Altenhoferallee 1, 60438 Frankfurt
f.brenker@em.uni-frankfurt.de
<https://www.uni-frankfurt.de/68156549/NanoGeoscience>

DOI-Nr.: 10.26125/axax-6722

chung von Meteoriten alleine nicht möglich. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre werden diese Asteroidenbruchstücke enorm erhitzt, was zum Verlust von bis zu 90% der ursprünglichen Masse führt. Die heiße Oberfläche der Meteorite reagiert trotz der kurzen Zeit bis zum Aufschlag mit der wasser- und sauerstoffhaltigen Atmosphäre. Gerade organische Verbindungen sind sehr temperaturempfindlich und können daher sehr leicht umgeformt werden. Liegt der Meteorit dann auf der Erde, können Jahre oder gar Jahrzehnte vergehen, bis dieser gefunden wird. In einigen seltenen Fällen werden Meteorite schon kurz nach dem Fall aufgefunden. Untersuchungen zeigen jedoch, dass Umformungen, gerade der organischen Bestandteile unter den feuchten Bedingungen auf der Erde, schon innerhalb weniger Stunden auftreten. Ein ungestörter Blick in die ursprünglichen Prozesse auf dem Asteroiden ist damit kaum noch möglich.

Letztendlich stellen Asteroiden eine potentielle Gefahr für die dicht besiedelte Erde dar, insbesondere wenn sie sich, wie der von der NASA beprobte Asteroid Bennu, auf einem potentiellen Kollisionskurs befinden. Um eine erfolgreiche Abwehr vorzubereiten, ist die genaue Kenntnis des Aufbaus von Asteroiden enorm wichtig [2].

Kosmochemische Untersuchung

Unsere Arbeitsgruppe im Schwiete Cosmochemistry Laboratory der Goethe Universität ist Mitglied der Erstuntersuchungsteams sowohl der Hayabusa 2 Mission der JAXA als auch der OSIRIS-REx Mission der NASA. Wir untersuchen diese Asteroiden-Proben mittels eines Transmissionselektronenmikroskops (TEM) und an einer Synchrotron-Strahlquelle. Letztere hat den entscheidenden Vorteil, dass es sich um eine weitgehend zerstörungsfreie Untersuchungsmethode handelt. Hierbei nutzen wir, zusammen mit der Arbeitsgruppe um den Chemiker Prof. Vincze der Universität Gent, zwei der leistungsfähigsten Synchrotron-Quellen der Welt, die European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble und das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. An beiden Quellen nutzen wir die Synchrotronstrahl-induzierte Fluoreszenz-Analyse (SR-XRF), um die chemische Zusammensetzung hoch ortsaufgelöst und in 3D zu erfassen. Damit sind wir in der Lage, die exakte chemische Zusammensetzung und ihre Verteilung innerhalb der Partikel zu bestimmen. In einem späteren Untersuchungsschritt mittels TEM werden dann strukturelle Details der Mineralphasen ermittelt. Hierdurch lassen sich genauere physikalisch-chemische Randbedingungen ihrer Bildung und Entwicklung herauslesen. Nun lassen sich mit diesen beiden Techniken weder Isotope messen noch organische Bestandteile charakterisieren, was die Frage aufwirft inwiefern diese Untersuchungen geeignet sind, die oben vorgestellten zentralen Fragen des Projekts zu beantworten. Tatsächlich sind unsere Untersuchungen absolut zentral, um dieses Ziel zu erreichen, denn um diese wichtigen Fragen zu klären, ist es unerlässlich, die vollständige Geschichte des Ursprungs und der Entwicklung des Asteroiden zu verstehen. Wenn also, wie im vorliegenden Fall des Asteroiden Ryugu (Hayabusa 2 Mission), komplexe Aminosäuren nachgewiesen werden, ist es ebenso wichtig zu verstehen, unter welchen Randbedingungen diese entstehen. Dieser Rekonstruktion der physikalisch-chemischen Entwicklung kommt unsere Hauptaufgabe zu.

Untersuchungen mittels Synchrotron-Strahlung

Die Analysen des Forschungsteams der Hayabusa 2 Mission unter Beteiligung unserer Arbeitsgruppe zeigen, dass der beprobte Asteroid Ryugu aus Material besteht, welches dem Typ der CI-Meteorite ähnelt, die in ihrer chemischen Zusammensetzung der Sonne äußerst nahe kommen [4]. Von diesen CI-Meteoriten wurde bisher auf der Erde nur selten Material gefunden. Außerdem bestätigen diese Analysen die Annahme, dass Ryugu von einem Mutterasteroiden stammt, der sich einst im äußeren Bereich des Solaren Nebels bildete.

Bedingt durch die niedrigen Temperaturen bei der Entstehung des CI-Materials in der Frühzeit des Sonnensystems erwartete man kaum Materialtransport innerhalb des Asteroiden und damit auch kaum eine Chance für die Anreicherung spezifischer Elemente. Durch unsere detaillierten Untersuchungen mittels SR-XRF Tomographie in einem der Körner des Asteroiden konnte eine feine Ader aus Magnetit – einem Eisenoxid – und Apatit, einem kalzium- und phosphathaltigen Mineral, nachgewiesen werden (Abbildung 2) [5]. Die Bildung von Adern weist auf Materialtransport durch ein Fluid oder einer Gasphase hin. Die Existenz zahlreicher Ca-reicher Minerale deutet hierbei eindeutig in Richtung eines Fluids, da sich nur hier ausreichend Kalzium lösen und transportieren ließe. Die Messung der Isotopie von Sauerstoff von Ca-reichen Mineralen und Eisenoxiden in den Asteroidenproben durch andere Wissenschaftler-Gruppen [4] ergaben eine niedrige Bildungstemperatur von unter 40 Grad Celsius. Damit konnte direkt der Prozess der wässrigen Alteration bei vergleichsweise niedrigen Bildungstemperaturen festgestellt werden.

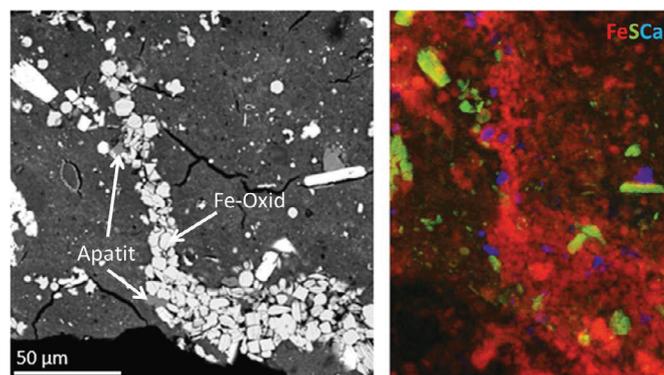


Abb. 2: (links) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Rückstreuungselektronen und (rechts) Fehlfarbenbild der chemischen Kartierung der Ader mittels SR-XRF an der Beamline P06 am DESY [5].

Die Quantifizierung der SR-XRF Messungen der apatithaltigen Bereiche der Proben zeigt eine Anreicherung der Elemente der Seltenen Erden. Die Werte weisen eine Erhöhung der Seltenen Erden (*rare earth elements*, REE) in dem Kalzium-Phosphaten des Asteroiden von über 100-fach verglichen mit der mittleren Konzentration des Sonnensystems auf. Dieser sehr effektive Anreicherungsprozess innerhalb des Asteroiden entlang von Adern ist umso erstaunlicher, als Eisen-Oxid-Phosphat-Vorkommen auf der Erde zu den wichtigsten Eisen- und REE-Lagerstättentypen zählen. Auf der Erde sind diese allerdings an sehr hohe Bildungstemperaturen gebunden. Innerhalb der Phosphat-Mineralen sind alle Elemente der Seltenen Erden im

gleichen Maße angereichert. Dieses homogene Muster der Verteilung der Seltenen Erden liefert einen weiteren Hinweis darauf, dass Ryugu ein chemisch sehr ursprünglicher Asteroid ist und damit bestens geeignet ist die Prozesse der Kinderstube unseres Sonnensystems zu entschlüsseln [5].

Referenzen

- [1] Sei-ichiro Watanabe et al. Hayabusa2 Arrives at the Carbonaceous Asteroid 162173 Ryugu-A Spinning Top-Shaped Rubble Pile. *Science* 2019 **364**, 268–272.
- [2] Dante Lauretta et al. OSIRIS-REx: Sample Return from Asteroid (101955) Bennu. *Space Science Reviews* 2017 **212**, 925–984.
- [3] Victoria Hamilton et al. Evidence for Widespread Hydrated Minerals on Asteroid (101955) Bennu. *Nature Astronomy* 2019 **3**, 332–340.
- [4] Tomoki Nakamura et al. Formation and Evolution of Carbonaceous Asteroid Ryugu: Direct Evidence from Returned Samples. *Science* 2022 **379**, 1–14.
- [5] Benjamin Bazi, Pieter Tack, Miles Lindner, Bart Vekemans, Ella De Pauw, Beverley Tkalcic and Frank E. Brenker. Trace-Element Analysis of Mineral Grains in Ryugu Rock Fragment Thin Sections by Synchrotron Based Confocal X-Ray Fluorescence. *Earth, Planets and Space* 2022, **74**, 1–17.

Prof. Dr. Frank E. Brenker

Frank Brenker studierte Geologie, bzw. Erdwissenschaften an der TU Darmstadt und der ETH Zürich. Ihm wurde im Jahr 2005 die erste Heisenberg-Professur in einer Naturwissenschaft verliehen. Seit Januar 2007 ist er ordentlicher Professor für „Extraterrestrische und planetare Prozesse auf der Nanoskala“ im Institut für Geowissenschaften der Goethe Universität Frankfurt. Er ist Direktor des „Schwiete Cosmochemistry Laboratory“ und des „Frankfurt Center of Electron Microscopy – FCEM“. Er war und ist Mitglied der Voruntersuchungsteams in unterschiedlichen Weltraummissionen an Proben die zur Erde zurückgebracht wurden. So erhielt er sehr früh Zugriff auf Proben des Kometen Wild 2, interstellare Körner (beides Stardust-Mission der NASA), der Asteroiden Ryugu (Hayabusa 2 - Mission der JAXA) und Bennu (OSIRIS-REx - Mission der NASA). Er ist spezialisiert auf Untersuchungen mittels Transmissionselektronenmikroskopie – TEM und Synchrotron-Strahlung.



TELESCOPES

The following provides short descriptions of a small selection of telescopes.

The James Webb Space Telescope (JWST)



Fig. 1: The Pillars of Creation as seen by the James Webb Space Telescope (Source: <https://www.nasa.gov/universe/nasas-webb-takes-star-filled-portrait-of-pillars-of-creation/>; Credits: NASA, ESA, CSA, STScI; Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI)).

After approximately 20 years of construction, the James Webb Space Telescope (JWST), the successor of the Hubble telescope, was launched to orbit the Sun in December 2021, by NASA. JWST was designed as a space observatory with the aim to study stellar objects in their early stages of formation, approximately 13 billion years ago, when our cosmos was as young as 400 million years old, using infrared radiation with wavelengths spanning from 0.6 to 28 μm . Recently, a large number of carbon-bearing molecules was discovered in the protoplanetary disk of a young, low-mass star (ISO-Chal 147), making it the richest hydrocarbon inventory seen to date in such a disk. Such observations aim at bridging the gap between the properties of exoplanets as a function of their planetary disk's chemical inventories, as well as answering questions around the formation and evolution of the cosmos. (text: Eva Gougoula, DESY)

For the latest news on what JWST is observing, you can visit: <https://science.nasa.gov/mission/webb/what-is-webb-observing/>



Fig. 2: The deepest and sharpest infrared image of the distant universe to date, galaxy cluster SMACS 0723, is one of the first images generated by JWST as part of the James Webb Space Telescope Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES). (Source: <https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-038>; Credits: NASA, ESA, CSA, STScI).