Radiochemische Analyse kosmogener Nuklide: Rekonstruktion der Bestrahlungsgeschichte von Meteoriten

S. Merchel[1#], U. Herpers[1], T. Faestermann[2], K. Knie[2], G. Korschinek[2], P. W. Kubik[3], H.-A. Synal[3], M. Suter[4], S. Neumann[5], R. Michel[5]

[1]Abt. Nuklearchemie, Universität zu Köln, D; [2]Fakultät für Physik, TU München, D; [3]Paul-Scherrer-Institut, Zürich, CH; [4]Institut für Teilchenphysik, Zürich, CH; ZSR, Universität Hannover, D; [#]zur Zeit: MPI für Chemie, Mainz, D

Motivation

Kosmogene Nuklide werden durch Kernreaktionen der kosmischen Strahlung mit Materie produziert. Die kosmische Teilchenstrahlung wird nach ihrer Herkunft in zwei Komponenten unterteilt, in die solare und die galaktische kosmische Strahlung, die sich insbesondere in ihrer Zusammensetzung und Energieverteilung unterscheiden. Beide Strahlungsarten lösen in Meteoroiden Kernreaktionen aus, deren Produkte mit nuklearchemischen Analysetechniken nachgewiesen werden können. Die Konzentration eines Radionuklids in extraterrestrischer Materie spiegelt dabei den Zeitraum der Bestrahlung von einigen Halbwertszeiten wieder, wohingegen stabile Nuklide über die ganze Expositionsdauer angereichert werden. Die Analysenergebnisse geben demnach Auskunft über die "Geschichte" des jeweiligen Meteoriten.

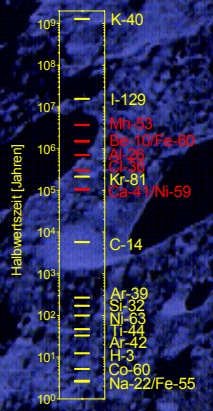

Abb. 1: Übersicht der Halbwertszeiten kosmogener Radionuklide ($t_{1/2}$ > 1 a).

"Aufgabe" der Chemie

Die langlebigen Radionuklide ^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{53}Mn, ^{59}Ni und ^{60}Fe (Abb. 1) wurden mittels ultrasensitiver Beschleunigermassenspektrometrie (AMS) nach radiochemischer Trennung bestimmt. Dabei stand die Separation der zu untersuchenden Nuklide, nach Möglichkeit aus einer einzigen Meteoritenprobe, von ihren störenden jeweiligen Isobaren im Vordergrund. Die ermittelten Radionuklidkonzentrationen liegen im Bereich von ppt bis ppq (entsprechend absoluten Mengen von 10^7-10^9 Atomen = pg-fg). Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Übersicht des von uns entwickelten Trennungsganges für Steinmeteorite. Details sind in der Dissertation von S. Merchel [MER98] beschrieben.

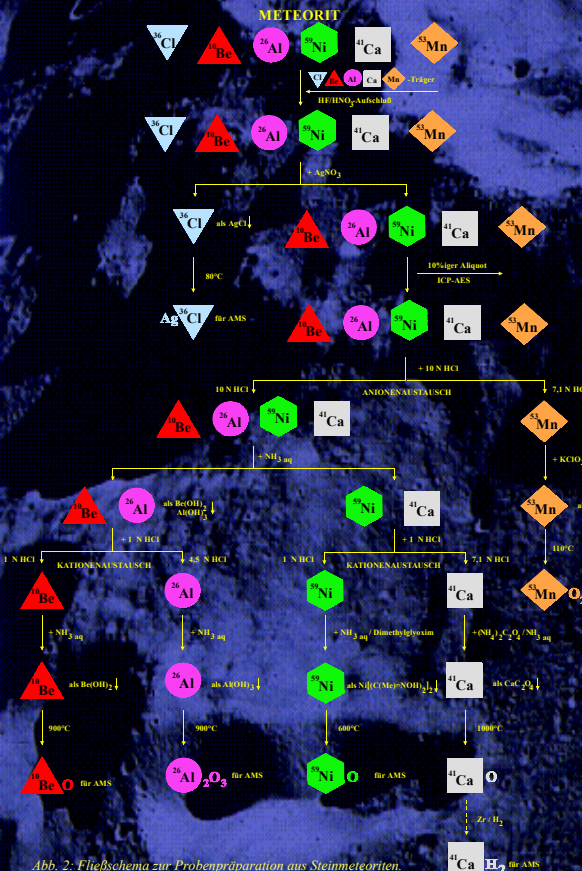

Abb. 2: Fließschema zur Probenpräparation aus Steinmeteoriten.

Diskussion der Daten

Die Produktion eines Nuklides in extraterrestrischer Materie ist von vielerlei Größen abhängig, z.B. der Intensität des primären Flusses der Strahlung, der chemischen Zusammensetzung, Form und Größe des "Targets" und den Wirkungsquerschnitten der Kernreaktionen, die zum Produkt führen. Insbesondere die Berücksichtigung der Sekundärteilchenfelder in einem solchen Dicktarget erfordert komplexe Monte-Carlo-Rechnungen von theoretischen tiefen- und größenabhängigen Produktionsraten. Abbildung 3 zeigt am Beispiel des Radionuklids ^{53}Mn die Produktionsratenanteile für Primär- und Sekundärteilchen, welche aus Dicktarget-Simulationsexperimenten [z.B. MIC93] berechnet wurden. Der Vergleich der experimentellen und theoretischen Daten ermöglicht nun die Rekonstruktion der Bestrahlungsparameter des untersuchten Objektes. Das Potential dieser Methode wird im folgenden exemplarisch durch die Diskussion der Radionukliddaten eines vom Mond stammenden Meteoriten aufgezeigt.

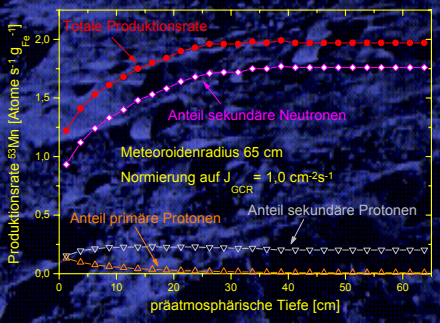

Abb. 3: Tiefenabhängige Produktionsraten kosmogener Nuklide am Beispiel von ^{53}Mn und einem Meteoroidenradius von 65 cm.

Der Mondmeteorit DG262

Dar al Gani 262 (DG262) wurde am 23. März 1997 in der libyschen Sahara im Rahmen einer Meteoritensuchexpedition gefunden (Abb. 4). Er ist der erste Meteorit lunaren Ursprungs der nördlichen Hemisphäre [BIS98]. Der Mond als Ursprung des Meteoriten ist eindeutig durch zahlreiche Daten belegt; wichtigste sind sicherlich die zur Erde bzw. zu den Mondproben identische Sauerstoff- und Stickstoffisotopien von DG262. Darüber hinaus gleichen die mineralogisch-petrographischen Charakteristika und Edelgaskonzentrationen den lunaren Proben der Apollo-Missionen. Seine mineralogische und chemische Zusammensetzung ähnelt den in der Antarktis gefundenen Mondmeteoriten QUE93069/94269.

Abb. 4: Der Mondmeteorit DG262 an seiner Fundstelle.

Die Schwierigkeit bei der Rekonstruktion der "Geschichte" eines Mondmeteoriten liegt darin, daß grundsätzlich von einer komplexen Bestrahlungsgeschichte ausgegangen werden muß. Formell wird sie in drei Stufen eingeteilt:

1. Bestrahlung auf dem Mond in einer bestimmten Abschirmtiefe unter 2π-Geometrie (t_{Mond})
2. Bestrahlung in einem kleinen Meteoroiden während des Transits zur Erde unter 4π-Geometrie ($t_{Transit}$)
3. Zeit zwischen Fall auf die Erde und Analyse: das terrestrische Alter (t_{terr})

Die gemessene Aktivität ($A_{Messung}$) eines Radionuklids der Zerfallskonstante λ_i ist abhängig von seiner Produktionsrate auf dem Mond (P_{Mond}) und während des Transits zur Erde ($P_{Transit}$). Beide sind Funktionen der elementaren Zusammensetzung und der Abschirmtiefe (d), wobei letztere zusätzlich auch noch mit dem Meteoroidenradius (R) variiert. Des weiteren kann sich die im All produzierte Aktivität durch den Zerfall der Radionuklide während der irdischen Aufenthaltsdauer (t_{terr}) verringern.

$$A_{Messung} = [P_{Mond}(d) \cdot (1 - e^{-\lambda t_{Mond}}) \cdot e^{-\lambda t_{Transit}} + P_{Transit}(R,d) \cdot (1 - e^{-\lambda t_{Transit}})] \cdot e^{-\lambda t_{terr}}$$

Diese Gleichung läßt sich unter einigen Annahmen vereinfachen: Grundsätzlich gehen wir davon aus, daß die Bestrahlungsdauer auf dem Mond (t_{Mond}) lang gegenüber den Halbwertszeiten der untersuchten Radionuklide ist. Demnach kann der erste Teil der Gleichung auf die Produktionsraten P_{Mond}, der Sättigungsproduktionsrate für eine konstante Abschirmtiefe (d) reduziert werden. Darüber hinaus kann aufgrund der Erosionsvorgänge in heißen Wüsten das terrestrische Alter von Meteoriten, die in der Sahara gefunden werden, als kurz im Vergleich zu den Halbwertszeiten von ^{26}Al, ^{10}Be und ^{53}Mn angenommen werden. So verbleiben als Unbekannte ein Zeitabschnitt, $t_{Transit}$, und zwei Produktionsraten, P_{Mond} und $P_{Transit}$, welche im weiteren abgeschätzt werden sollen.

Der Vergleich mit theoretischen 4π-Produktionsraten auf Basis der chemischen Zusammensetzung von DG262 zeigt, daß die hohe ^{53}Mn-Aktivität relativ zu den geringen ^{26}Al- und ^{10}Be-Aktivitäten (^{53}Mn vs. ^{26}Al: Abb. 5) hauptsächlich auf dem Mond produziert wurde bzw. $t_{Transit}$ gegenüber den Halbwertszeiten der Radionuklide gering sein muß. Aufgrund der unterschiedlichen Halbwertszeiten müßten nämlich bei einer Bestrahlung während des $t_{Transit}$ zuerst die kurzlebigeren Radionuklide ihre 4π-Sättigungsproduktionsraten erreichen und bei weiterer Bestrahlung erst ^{53}Mn.

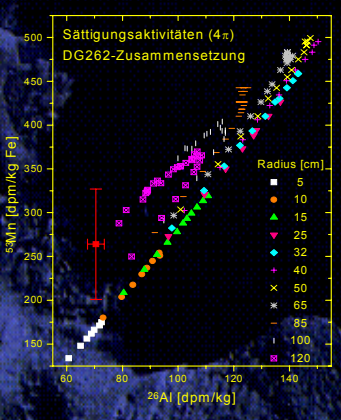

Abb. 5: Vergleich der experimentell bestimmten ^{26}Al- und ^{53}Mn-Aktivitäten im Mondmeteoriten DG262 mit theoretischen tiefen- und größenabhängigen 4π-GCR-Produktionsraten.

Für die Abschätzung der Produktionsrate P_{Mond} bzw. der Abschirmtiefe der analysierten Probe auf dem Mond kann aufgrund der Normierung der ^{53}Mn-Aktivitäten auf das Haupttargetelement Eisen die ermittelte Aktivität direkt mit dem von Imamuara et al. [IMA73] bestimmten Tiefenprofil des Apollo-15-Drill-Cores verglichen werden (Abb. 6). Da die Produktion von ^{10}Be und ^{26}Al allerdings stark von der chemischen Zusammensetzung der bestrahlten Probe abhängig ist, ist der Vergleich mit chemisch ähnlichen Proben aus einem Bohrkern der Apollo-16-Mission ratsam [NIS96]. Die Konzentrationen aller drei Radionuklide (Abb. 6) lassen demnach auf eine Abschirmtiefe von 55-85 g/cm^2 auf dem Regolithen schließen. Für die Meteoridenbestrahlung ($t_{Transit}$) kann ein Maximalwert von 0,15 Ma (bei einem Radius von 10 cm) abgeschätzt werden. Wahrscheinlich ist dieser Wert allerdings wesentlich geringer.

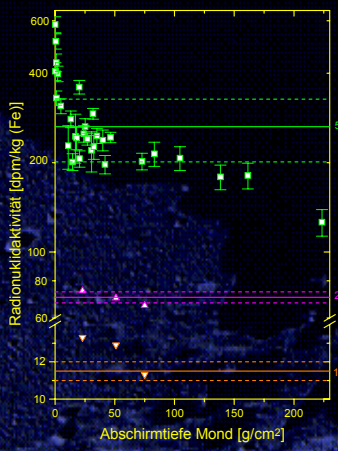

Abb. 6: Vergleich der experimentell bestimmten Radionuklidaktivitäten von DG262 mit Tiefenprofilen der Apollo-Drill-Cores [IMA73,NIS96].

Ein Hauptziel der Untersuchungen von Mondmeteoriten ist der mögliche Rückschluß auf die Zahl der für die gefundenen und analysierten Meteorite benötigten Impaktereignisse. So stellten Thalmann et al. [THA96] fest, daß 6-8 Einschläge auf dem Mond die auf der Erde gefundenen fünfzehn Mondmeteoritenfragmente (exklusive DG262) herausgeschlagen haben. Das heißt, neben der üblichen Suche nach (terrestrischen) "pairings" sprechen wir bei Mondmeteoriten auch von "ejection pairings" oder "joint launches", die natürlich nicht notwendigerweise benachbarte Fundstellen auf der Erde erfordern. Das Kriterium für dieses Phänomen erfordert eine identische Auswurfzeit, entsprechend der Summe aus 4π-Bestrahlungsalter und terrestrischem Alter. Eine Übersicht der Auswurfzeiten zusammen mit ihrem Ca/Ti-Verhältnis, welches den Hochland- bzw. Mare-Ursprung der Proben widerspiegelt, der bisher untersuchten Mondmeteorite findet sich in Abbildung 7. Ein "ejection pairing" von DG262 mit den antarktischen Funden QUE93069/94269 kann aufgrund der vorliegenden Daten demnach nicht ausgeschlossen werden.

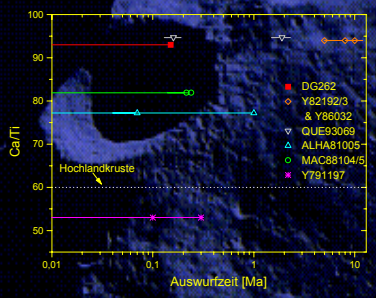

Abb. 7: Ca/Ti-Verhältnisse der Hochlandmeteorite gegen Auswurfzeit [BIS98,EUG91,MET96,NIS91/96,THA96,SPE95,VOG91].

Zusammenfassung

Die Analyse kosmogener langlebiger Radionuklide in Meteoritenproben ermöglicht unter Zuhilfenahme theoretischer Produktionsraten die Entschlüsselung der "Geschichten" der Meteorite. So können präatmosphärische Meteoroidengrößen, Abschirmparameter und Bestrahlungszeiträume rekonstruiert werden. Darüber hinaus sind Aussagen über eventuelle komplexe Bestrahlungsszenarien und "pairing" von Meteoritenfunden möglich. Die ermittelten Daten liefern außerdem den Nachweis der Konstanz der galaktischen kosmischen Strahlung innerhalb der letzten 5 Millionen Jahre.

Literatur

[BIS98] A. Bischoff et al., *Meteorit. Planet. Sci.* im Druck.
[EUG91] O. Eugster et al., *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (1991) 3139.
[IMA73] M. Imamura et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* 20 (1973) 107.
[MER98] S. Merchel, Dissertation, Universität zu Köln (1998).
[MET97] MetBase Version 3.1 for Windows (1997).
[MIC93] R. Michel et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 169 (1993) 13.
[NIS91] K. Nishizumi et al., *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (1991) 3149.
[NIS96] K. Nishizumi et al., *Meteorit. Planet. Sci.* 31 (1996) 893.
[SPE95] B. Spettel et al., *Meteoritics* 30 (1995) 581.
[THA96] Ch. Thalmann et al., *Meteorit. Planet. Sci.* 31 (1996) 857.
[VOG91] S. Vogt et al., *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (1991) 3157.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Schweizer Nationalfond für die Unterstützung dieser Arbeit.