



Doctoral Thesis

High-precision strontium isotope measurements on meteorites implications for the origin and timing of volatile depletion in the inner solar system

Author(s):

Hans, Ulrik

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009900697> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20897

**HIGH-PRECISION STRONTIUM ISOTOPE
MEASUREMENTS ON METEORITES: IMPLICATIONS
FOR THE ORIGIN AND TIMING OF VOLATILE
DEPLETION IN THE INNER SOLAR SYSTEM**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

For the degree of
Doctor of Sciences

Presented by
Ulrik Hans

M.Sc. Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Born 31.08.1979
Citizen of the
Federal Republic of Germany

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Rainer Wieler
Prof. Dr. Maria Schönbachler
Prof. Dr. Thorsten Kleine
Prof. Dr. Bernard Bourdon
Prof. Dr. Herbert Palme

Zurich, 2013

Summary

A marked depletion in moderately volatile elements (*i.e.*, elements predicted to condense from gas of solar composition at temperatures between ~ 1250 and ~ 650 K) is a characteristic feature of many planetary objects in the inner solar system. The origin of this volatile depletion is poorly understood, however. In this study, the ^{87}Rb - ^{87}Sr decay system is used to constrain the timing and origin of volatile depletion in some of the earliest protoplanets of the solar system. To define the timing of volatile depletion with sufficient precision, it was necessary to develop new techniques for high-precision Sr isotope measurements. Using the ThermoFisher Triton thermal ionization mass spectrometer (TIMS) external reproducibilities of ± 4.5 ppm (2σ) and ± 29 ppm (2σ) for the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios were obtained over the course of this study. Precise Sr isotope measurements on eucrites, angrites and Ca-Al-rich inclusions (CAI) show that eucrites and angrites are characterized by a common initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, which is about 60 ppm higher than the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtained for CAI. This difference in initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ corresponds to model timescales for volatile loss of several millions of years. However, all investigated CAI are characterized by elevated $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios compared to angrites and eucrites. This most probably reflects an excess of *r*-process Sr in the CAI, in which case the nucleosynthetic Sr isotope anomalies in the CAI require an upward correction of their measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. After this correction CAI have an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ indistinguishable from those of eucrites and angrites, implying a very early volatile depletion within less than ~ 1 Ma after CAI formation. The volatile-depleted nature of differentiated protoplanets thus most likely reflects their rapid accretion from volatile-poor dust in an incompletely condensed solar nebula.

To complement the $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data for eucrites, angrites and CAI, precise $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ measurements were also performed on terrestrial samples and chondrites as well as on acid leachates from the primitive chondrite Murchison. Most of the acid leachates and the insoluble residue of Murchison show large variations in $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, indicating that distinct, isotopically diverse nucleosynthetic components existed in the solar nebula. Among the chondrite bulk samples, only the CV chondrites show clearly resolved $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ anomalies, which are attributed to the presence of CAI in this group of chon-

drites. All other bulk meteorites – with the possible exception of Murchison - show uniform, terrestrial $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Thus, despite the Sr isotopic heterogeneity among the components of primitive chondrites, the solar nebula was homogeneous at the bulk meteorite and planetary scale. This indicates efficient and large-scale mixing and homogenization of the distinct nucleosynthetic Sr isotope components prior to the onset of planetary accretion, and contrasts with the evidence for isotopic heterogeneities reported at the bulk meteorite scale for some other elements.

Zusammenfassung

Eine charakteristische Eigenschaft vieler planetarer Objekte im inneren Sonnensystem ist deren deutliche Verarmung an moderat volatilen Elementen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Elemente bei Temperaturen zwischen ~ 1250 und ~ 650 K aus einem Gas mit solarer Zusammensetzung kondensieren. Der Ursprung dieser Volatilverarmung ist bis heute jedoch nur unzureichend erklärt. In der vorliegenden Arbeit wird das ^{87}Rb - ^{87}Sr Zerfallssystem benutzt, um den Zeitpunkt und den Ursprung volatiler Verarmung in einigen der frühesten Protoplaneten des Sonnensystems zu bestimmen.

Um den Zeitpunkt volatiler Verarmung mit ausreichender Präzision definieren zu können, war es zunächst notwendig, eine neue Technik für hoch präzise Sr Isotopen Messungen zu entwickeln. Im Verlauf der vorliegenden Studie haben wir mit der ThermoFisher Triton (thermoionisches Massenspektrometer TIMS) externe Reproduzierbarkeiten von ± 4.5 ppm (2σ) und ± 29 ppm (2σ) für das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ und das $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ erreicht. Präzise Sr Isotopen Messungen an Eukriten, Angriten und Ca-Al-reichen Einschlüssen (CAI) zeigen, dass Eukrite und Angrite ein gleiches Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ haben, welches etwa 60 ppm höher ist als das von uns bestimmte Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ für CAI. Aus den verschiedenen Initialen für $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ergibt sich eine modellhafte Zeitskala für den Volatilverlust von mehreren Millionen Jahre. Im Vergleich zu Eukriten und Angriten zeigen jedoch alle untersuchten CAI ein erhöhtes $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Dies spiegelt vermutlich einen Exzess im r -Prozess Sr in CAI wider, woraufhin für die nukleosynthetische Sr Isotopen Anomalien in CAI eine Aufwärtskorrektur für das gemessene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durchgeführt werden muss. Nach dieser Korrektur haben CAI ein $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Initial, welches nicht unterscheidbar ist von dem der Eukrite und Angrite. Dies impliziert eine sehr frühe Volatilverarmung innerhalb weniger als ~ 1 Ma nach der CAI Entstehung. Die volatilverarmte Beschaffenheit von differenzierten Protoplaneten ergibt sich wahrscheinlich aus der schnellen Akkretion von volatilarmem Staub aus einem nicht vollständig kondensierten solaren Nebel. Für die Ergänzung des $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Datensatzes für Eukrite, Angrite und CAI, wurden präzise $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Messungen von terrestrischen Proben und Chondriten wie auch von Lösungsschritten des primitiven Chondriten Murchison durchgeführt.

Die meisten Lösungsschritte und das unlösliche Residuum von Murchison zeigen grose Unterschiede im $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, was eindeutig darauf hinweist, dass viele nukleosynthetische Komponenten mit unterschiedlichen Isotopen im solaren Nebel existiert haben. Innerhalb der chondritischen Gesamtgesteinsproben, zeigen nur die CV Chondrite eindeutig auflösbare $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Anomalien, welche sich durch die Häufigkeit von CAI in dieser Gruppe von Chondriten erklären lassen. Alle anderen Gesamtgesteins-Meteoritenproben, mit der möglichen Ausnahme von Murchison, zeigen ein terrestrisches $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Dementsprechend zeigt sich, dass der solare Nebel trotz der Heterogenitäten der Sr Isotopen in Komponenten von primitiven Chondriten homogen ist. Dies deutet auf ein effizientes und ausgedehntes mischen und homogenisieren der verschiedenen nukleosynthetischen Sr Isotopen Komponenten hin, bevor die planetare Akkretion begonnen hat. Diese Aussage steht im Gegensatz zu den Belegen isotopischer Heterogenitäten für andere Elemente, die durch andere Studien zu Gesamtgesteins-Meteoritenproben publiziert wurden.