

DISS. ETH NO. 28523

TITANIUM ISOTOPE SYSTEMATICS OF THE EARTH'S MANTLE AND
THE UREILITE PARENT BODY

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MERISLAVA ANGUELOVA

MSc in Earth Sciences, Heidelberg University
born on 09.05.1989

accepted on the recommendation of
Prof. Maria Schönbacher (examiner)
Dr. Manuela Fehr (co-examiner)
Prof. Nicolas Greber (co-examiner)
Prof. Tim Elliott (co-examiner)

2022

Abstract

The Titanium (Ti) isotope system provides a powerful tool for studying the evolution of the Solar System and planetary differentiation. While mass-independent, nucleosynthetic, Ti isotope variations can be used to establish genetic relationships between Solar System materials, mass-dependent Ti isotopes are an emerging tool for tracing magmatic processes. The present thesis focuses primarily on the mass-dependent Ti isotope systematics of planetary mantle rocks and terrestrial low-degree mantle melts to (i) better constrain the Ti isotope composition of the Earth's mantle, being the largest terrestrial Ti reservoir, and (ii) to study planetary differentiation at reducing conditions. The Ti isotope composition of the Earth's mantle is a crucial baseline to use mass-dependent Ti isotope data in the context of planet formation models, and also for the use of Ti isotope data as a tracer for magmatic processes.

This thesis presents a comprehensive Ti isotope data set for well-characterised orogenic peridotites and primitive ultrapotassic rocks (Chapter 2). The peridotites originate from a continuous mantle section exposed in the Horoman massif (Japan), comprising fertile to melt-depleted and metasomatically overprinted samples. The Ti isotope compositions of the peridotites significantly deviate from those of komatiites and basalts and display enrichments in both light and heavy Ti isotopes. Per mille-level Ti isotope variations were produced by metasomatism by crustal-derived metasomatic agents in a subduction zone setting. Considerable Ti isotope deviations from mantle-derived magmas are also recorded in ultrapotassic rocks, which represent the melting products of a mantle source that contains recycled continental crust material. These results demonstrate that metasomatism and crustal recycling can generate significant Ti isotope heterogeneity in the upper mantle.

This thesis includes the first Ti isotope study of kimberlites, which represent low-degree melts of deep mantle sources (Chapter 3). The investigated samples encompass a wide spatial and temporal distribution, comprising kimberlites from major cratons worldwide with emplacement ages from ~1.15 Ga to recent, and further include evolved varieties. The kimberlites reveal more variable Ti isotope compositions than primitive basalts, which range from basalt-like compositions to enrichments in heavy Ti isotopes. Significant inter-province Ti isotope variations are contrasted by homogeneous intra-province Ti isotope compositions. Several processes are discussed that may have affected the Ti isotope compositions of the kimberlites, including mineral-melt Ti isotope fractionation during fractional crystallisation and low-degree partial melting, assimilation of enriched subcontinental lithospheric mantle and mantle source heterogeneity. Multiple processes are considered to have contributed to the Ti isotope variability observed in kimberlites, reflecting the complex nature of kimberlite rocks and their parental melts.

Mass-independent and mass-dependent Ti isotope data of ureilites are also presented (Chapter 4). Ureilites are ultramafic achondrites derived from the mantle of a differentiated carbon-rich planetesimal, which retained primordial chemical and isotopic heterogeneities.

The selected samples comprise unbrecciated ureilites of different petrographic types (olivine-pigeonite, olivine-orthopyroxene and augite-bearing ureilites as well as a pyroxenite) and cover nearly the entire range of olivine core compositions known for unbrecciated ureilites. All ureilites are characterised by mass-independent ^{50}Ti deficits relative to terrestrial samples and display resolvable ^{50}Ti isotope variations. These variations likely reflect primordial heterogeneities and corroborate recent evidence from other isotope systems (e.g. ^{54}Cr). The results suggest that the ureilite parent body (UPB) accreted from at least two compositionally distinct reservoirs. Ureilites display fractionated mass-dependent Ti isotope compositions relative to terrestrial basalts and most achondrites. The majority of the samples reveal distinctly lighter Ti isotope compositions than other Solar System objects. The observed enrichments in light Ti isotopes likely result from Ti isotope fractionation during partial melting and fractional crystallisation in the UPB mantle and show that at low oxygen fugacities as prevailed on the UPB, phases other than Ti-bearing oxides, such as pyroxenes, may give rise to resolvable mineral-melt Ti isotope fractionation.

Kurzfassung

Das Titan (Ti) -Isotopensystem ist ein hervorragendes Werkzeug, um die Entwicklung des Sonnensystems zu studieren und Prozesse der planetaren Differentiation besser zu verstehen. Mittels der Analyse massenunabhängiger, nukleosynthetischer Isotopenvariationen an verschiedenen Meteoritentypen lassen sich genetische Beziehungen zwischen einzelnen Bausteinen unseres Sonnensystems herstellen. Die massenabhängige Fraktionierung kann hingegen wertvolle Einblicke in magmatische Prozesse liefern. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Systematik massenabhängiger Ti-Isotopenfraktionierung an Mantelgesteinen sowie sich daraus ableitenden, niedriggradigen partiellen Schmelzen. Ziel der Untersuchungen ist es, die Ti-Isotopenzusammensetzung des Silikatmantels der Erde, als größtes irdisches Ti-Reservoir, besser zu bestimmen. Die Ti-Isotopenzusammensetzung des Erdmantels dient als wichtiger Referenzwert im Zusammenhang mit Modellen zur Planetenentstehung oder magmatischen Differentiationsprozessen, weshalb eine genaue Kenntnis darüber von großer Relevanz ist. Zudem werden extraterrestrische Mantelgesteine studiert, um planetare Differentiationsprozesse bei reduzierten Bedingungen zu untersuchen.

Diese Arbeit präsentiert einen umfangreichen Ti-Isotopen-Datensatz für orogene Peridotite und primitive ultrapotassische Gesteine (Kapitel 2). Die gut charakterisierten Mantelproben entstammen einem kontinuierlichen Profil des Horoman-Peridotitmassivs (Japan). Für diese systematische Studie wurden fertile und schmelzverarmte Mantelproben, sowie metasomatisch überprägtes Material untersucht. Die Ti-Isotopenzusammensetzungen der Peridotite zeigen signifikante Abweichungen von der Zusammensetzung von Mantelmagmen wie Basalten und Komatiiten, wobei sich sowohl leichte wie auch schwere Ti-Isotopensignaturen feststellen lassen. Titan-Isotopenvariationen im Promillebereich sind auf Anreicherungsprozesse durch Subduktion von kontinentalem Material zurückzuführen. Deutliche Abweichungen in der Ti-Isotopenzusammensetzung im Vergleich zu anderen Mantelmagmen lassen sich auch für ultrapotassische Gesteine beobachten, welche als Schmelzprodukt einer Mantelquelle interpretiert werden, die durch kontinentales Krustenmaterial kontaminiert wurde. Diese Ergebnisse belegen, dass Metasomatose und Anreicherung im Zusammenhang mit Subduktionsprozessen signifikante Ti-Isotopenheterogenitäten im oberen Erdmantel erzeugen können.

Die vorliegende Arbeit präsentiert erstmals Ti-Isotopendaten von Kimberliten, welche niedriggradige Schmelzen aus tiefen Mantelbereichen darstellen (Kapitel 3). Die ausgewählten Kimberlitproben weisen eine große räumliche und zeitliche Verteilung auf. Sie entstammen nahezu aller großen Kratone der Erde und decken mit ihren Bildungsaltern die letzten ~1.15 Ga der Erdgeschichte ab. Neben überwiegend primitiven Proben wurden auch differenzierte Vertreter untersucht. Die Ti-Isotopenzusammensetzungen der Kimberlite zeigen deutliche Variationen, und umfassen typische Werte von Basalten bis hin zu deutlich an schweren Ti-Isotopen angereicherten Zusammensetzungen.

Systematische Unterschiede lassen sich zwischen einzelnen Kimberlitprovinzen feststellen, während innerhalb von Provinzen gleichbleibende Werte zu verzeichnen sind. Es werden verschiedene Prozesse diskutiert, welche die Ti-Isotopenzusammensetzung der Kimberlite beeinflusst haben können. Diese umfassen Mineral-Schmelz-Fraktionierung durch fraktionierte Kristallisation und niedriggradiges, partielles Schmelzen, Assimilation von angereichertem, subkontinentalem lithosphärischem Mantel sowie Heterogenität der Mantelquelle. Es ist davon auszugehen, dass mehrere Prozesse zur beobachteten Variabilität in der Ti-Isotopenzusammensetzung der Kimberlite beigetragen haben, was die Komplexität in der Kimberlitgenese widerspiegelt.

In Kapitel 4 werden massenunabhängige (nukleosynthetische) und massenabhängige Ti-Isotopendaten von Ureiliten präsentiert. Bei Ureiliten handelt es sich um ultramafische Achondrite, welche aus dem Mantel eines differenzierten, Kohlenstoff-reichen Asteroiden entstammen, in dem primordiale Variationen in der chemischen und isotopischen Zusammensetzung erhalten sind. Die ausgewählten Proben umfassen verschiedene petrographische Typen unbekannter Ureilite (Olivin-Pigeonit-, Olivin-Orthopyroxen- und Augit-haltige Ureilite, sowie ein Pyroxenit). Die Proben decken nahezu die gesamte chemische Bandbreite ab, die für Olivin-Kernzusammensetzungen unbekannter Ureilite bekannt ist. Alle untersuchten Ureilite sind durch massenunabhängige Defizite an ^{50}Ti relativ zu irdischen Gesteinen gekennzeichnet und zeigen messtechnisch auflösbare Variationen. Es ist davon auszugehen, dass diese Variationen auf primordiale Heterogenitäten zurückzuführen sind und stehen damit im Einklang mit neueren Erkenntnissen anderer Isotopensysteme (z.B. ^{54}Cr). Es wird angenommen, dass der Ureilit-Mutterkörper aus mindestens zwei unterschiedlichen Reservoiren akkretioniert wurde. Zudem zeigen Ureilite von terrestrischen Basalten und den meisten Achondriten abweichende massenabhängige Ti-Isotopenzusammensetzungen. Die Mehrzahl der untersuchten Proben ist durch deutlich leichtere Ti-Isotopenzusammensetzungen im Vergleich zu anderen Körpern des Sonnensystems gekennzeichnet. Die beobachtete Anreicherung an leichten Ti-Isotopen lässt sich auf Ti-Isotopenfraktionierung bei partiellen Schmelzprozessen sowie fraktionierter Kristallisation zurückführen. Dies zeigt, dass bei niedrigen Sauerstoff fugazitäten, wie sie im Mantel des Ureilit-Mutterkörpers vorgeherrscht haben, Silikatminerale wie Pyroxene zu messbaren Ti-Isotopenfraktionierungen geführt haben.