

Anomalies nucléosynthétiques du néodyme et du samarium dans les météorites, traceurs de l'origine et de l'évolution du système solaire interne

Paul Frossard

Mots clefs :

anomalies nucléosynthétiques ; météorites ; achondrites ; chondrites ; ^{142}Nd ; néodyme ; disque protoplanétaire ; planétésimaux

Keywords:

Nucleosynthetic anomalies; meteorites; achondrites; chondrites; ^{142}Nd ; neodymium; samarium; protoplanetary disk; planetesimals

Résumé

Les planètes se sont formées par l'accrétion de matériaux présents dans le disque protoplanétaire lors des premiers millions d'années après la formation initiale du système solaire. Les météorites sont des vestiges du disque protoplanétaire et nous renseignent ainsi sur sa composition et son évolution. L'étude de la composition isotopique en Nd des chondrites a montré un décalage avec la Terre, en particulier pour le rapport $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ associé à la désintégration éteinte du ^{146}Sm en ^{142}Nd ($t_{1/2} = 103 \text{ Ma}$). Ce décalage peut être dû à un fractionnement précoce du rapport Sm/Nd sur Terre ou à des anomalies nucléosynthétiques des matériaux dans le système solaire, tel qu'il a été observé pour de nombreux éléments comme Cr et Mo. Les travaux de cette thèse permettent de définir la contribution des anomalies nucléosynthétiques sur les compositions isotopiques en Nd des matériaux du système solaire interne dont la Terre fait partie.

Deux approches sont adoptées et se basent sur le développement de protocoles analytiques spécifiques. L'hétérogénéité des compositions nucléosynthétiques est étudiée avec les chondrites dont les composants reflètent les matériaux du disque protoplanétaire. Leur distribution temporelle et spatiale est examinée avec l'analyse des achondrites qui échantillonnent les premiers planétésimaux ainsi que les planètes.

Le lessivage progressif (ou step-leaching) de chondrites à enstatite et ordinaire, représentants du système solaire interne, montre qu'un seul composant anormal, le SiC présolaire, produit la variabilité de composition isotopique en Nd et Sm. Les compositions isotopiques en $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de la Terre et des chondrites en roche totale se trouvent dans l'alignement des leachates et sont donc liées à des hétérogénéités dans le disque protoplanétaire. La composition isotopique en Cr des mêmes échantillons contraste avec les compositions isotopiques en Nd et Sm et suggère l'existence de deux pôles aux compositions anormales, l'un riche en ^{54}Cr et l'autre pauvre en ^{54}Cr . Les variations de composition isotopique en Cr très faibles mesurées dans les chondrites à enstatite reflètent les conditions très réductrices de ces échantillons qui ont altéré les phases porteuses des anomalies.

Les achondrites appartenant à des corps parents différents présentent des anomalies nucléosynthétiques similaires, qui contrastent cependant avec celles des corps planétaires et des chondrites. La comparaison des anomalies nucléosynthétiques avec de la fugacité en oxygène (f_{O_2}) des achondrites et des corps planétaires suggère que leur composition isotopique en Nd n'est pas distribuée selon la distance héliocentrique dont la f_{O_2} est un proxy. En revanche, elle peut être expliquée avec un traitement thermique tardif des matériaux du disque protoplanétaire.

Les roches à la surface des premiers planétésimaux sont principalement de composition basaltique. Cependant, l'existence d'une croûte anorthositique, sur un planétésimal du système solaire interne est proposée suite à la mesure de très forts enrichissements en Eu et en Sr dans les minéraux de l'achondrite non-groupée NWA 8486 (appariée avec NWA 7325). Les croûtes anorthositiques sont des produits d'océans magmatiques qui pourraient avoir été courants sur les planétésimaux. Leur absence dans les collections de météorites pose question sur leur devenir et les conséquences sur la composition élémentaire des planétésimaux différenciés.

Abstract

Planets formed in a protoplanetary disc during the first million years of the solar system by accretion of various materials. Meteorites are the remnants of these early stages of the solar system and provide us information on its composition and evolution. The study of Nd isotope composition in meteorites showed that Earth may have a distinct composition in $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio, which is affected by the extinct decay of ^{146}Sm to ^{142}Nd ($t_{1/2} = 103 \text{ Ma}$). This offset has been suggested as either an early fractionation of Sm and Nd on Earth or nucleosynthetic anomalies as evidenced for many other elements including Cr and Mo. The aim of this thesis was to constrain the contribution of nucleosynthetic components on the Nd isotope composition of inner solar system materials.

First, the heterogeneity of nucleosynthetic anomalies in the protoplanetary disc is assessed using chondritic components. Once the source of this heterogeneity is understood, the temporal and spatial distribution is studied with samples from the first differentiated planetesimals, achondrites.

Leaching experiments on enstatite and ordinary chondrites show that a single anomalous component, presolar SiC, is the source of the heterogeneous Nd and Sm isotope composition in chondrites. Earth's and chondrites' $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ compositions fall on the trend of leachates, which supports a nucleosynthetic origin of the offset. The Cr isotope composition of the same leachates contrasts with their Nd and Sm compositions. At least two anomalous endmembers are needed to explain the variation in the ordinary chondrite leachates. For the enstatite chondrites, the reduced conditions in which they formed likely erased the heterogeneity at the mineral scale.

Achondrites from various parent bodies display a similar Nd isotope composition that is different from other inner solar system materials such as planets and chondrites. By comparing the Nd isotope compositions with the oxygen fugacity, as a proxy for the heliocentric distance of accretion, both achondrites and planetary bodies show that nucleosynthetic anomalies are not distributed radially within the protoplanetary disc. Instead, Nd isotope compositions are best explained by late thermal processing of materials in the disc.

The meteorite records imply that planetesimal crusts are overwhelmingly basaltic in composition. However, the measurement of significant enrichments in Eu and Sr in minerals of the ungrouped achondrite NWA 8486 (paired with NWA 7325) are proposed as evidence that an anorthositic crust had formed on the parent body of this meteorite. Anorthositic crusts are produced during magma ocean crystallization and may have been common on early planetesimals. Their absence in the meteorite collections is therefore questioning their fate and consequences for the elemental composition of differentiated planetary bodies.