

La glace d'ammoniac est-elle stable à l'intérieur de Neptune ?

La molécule d'ammoniac (NH_3) est peu abondante sur Terre à l'état naturel, mais son rôle important dans l'industrie chimique, notamment pour la fabrication d'engrais, explique qu'elle soit produite massivement à plus de 100 Mt par an. Sa synthèse, via le procédé Haber, repose sur la réaction du diazote (N_2) et du dihydrogène (H_2) sous haute pression (15-25 MPa) et température (400-500°C). En effet, l'ammoniac occupant un volume plus faible que les réactifs, est plus stable que ces derniers à haute pression. On suppose également que l'ammoniac a été synthétisé à partir de N_2 et H_2 au sein de la nébuleuse planétaire du système solaire, et s'est condensé dans les régions les plus éloignées du Soleil où se sont formées les planètes géantes Neptune et Uranus. Ces deux planètes auraient donc une couche interne épaisse de glaces composées majoritairement d'eau, de méthane et d'ammoniac, soumise à des pressions et des températures très élevées (jusqu'à 700 GPa et 6000 K). La stabilité chimique de l'ammoniac et son état physique, solide ou liquide, sont des données inconnues dans ces conditions. Or, celles-ci sont indispensables pour modéliser les intérieurs planétaires et mieux comprendre les analyses faites par les sondes spatiales, notamment celles du champ magnétique très particulier de ces planètes. En utilisant de nouveaux outils développés pour l'étude des composés légers sous conditions extrêmes, l'équipe PHYSIX de l'IMPMC, en collaboration avec des chercheurs du CEA et de l'ESRF, a réussi à sonder la courbe de fusion de NH_3 et à étudier la stabilité de la molécule.

La courbe de fusion d'un composé délimite la frontière entre les phases solides et liquides. Sa détermination expérimentale requiert une sonde capable de distinguer les deux états. La diffraction des rayons X offre cette possibilité. Cependant cette technique est difficile à mettre en œuvre dans le cas des éléments légers, i.e. à faible nombre d'électrons Z, du fait de la faible intensité du signal qui est proportionnelle au carré de Z. Le volume d'échantillon très faible disponible à très haute pression, et le « bruit » généré par son environnement, compliquent d'autant plus l'expérience. Grâce aux nouvelles techniques mises en œuvre par l'équipe sur la ligne de lumière ID27 de l'ESRF, la mesure de la courbe de fusion de NH_3 a été étendue jusqu'à 40 GPa et 2300 K. Ces mesures révèlent une augmentation continue et sans accident de la température de fusion avec la pression, en accord qualitatif avec les simulations récentes de type ab initio. À l'opposé d'un travail précédent, elles démontrent également l'absence d'un maximum sur la courbe de fusion. Comme on peut le voir sur la figure 1, l'extrapolation de la courbe de fusion à des pressions légèrement supérieures croise les isentropes (ou profil pression-température) de Neptune et Uranus, ce qui suggère la possibilité d'avoir de l'ammoniac solide à l'intérieur de ces planètes.

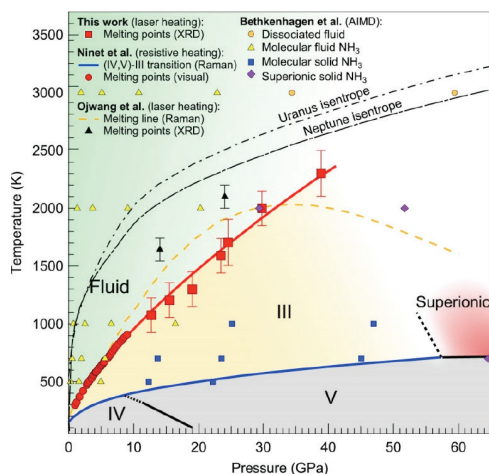


Figure 1
 Diagramme de phase de NH_3 . En vert : le domaine liquide. En gris : la zone de stabilité des deux phases moléculaires ordonnées (NH_3 -IV et NH_3 -V). La zone en jaune correspond à la phase moléculaire désordonnée dite « plastique » (NH_3 -III). La partie en rouge est le domaine de la phase superionique. La courbe de fusion déterminée au cours de ce travail est représentée par la courbe et les points rouges. Les courbes noires représentent les isentropes de Neptune et d'Uranus, c'est-à-dire le profil pression-température au sein de ces planètes.

Dans une deuxième étape, l'équipe a étudié la stabilité chimique de la molécule d'ammoniac dans les mêmes conditions de pression et de température. Pour cela, elle a utilisé la diffusion Raman car cette technique permet de distinguer les espèces chimiques présentes dans l'échantillon grâce à leurs vibrations caractéristiques. L'étude montre que la molécule d'ammoniac est stable dans la phase solide au moins jusqu'à 45 GPa, en revanche elle se dissocie partiellement en dihydrogène et en diazote dans la phase fluide. Cette dissociation est plus marquée en-dessous de 10 GPa et augmente avec la température, alors qu'au-delà de cette pression elle reste très limitée jusqu'à 3000 K.

Ce travail a donc permis de démontrer que la couche de glace de Neptune et Uranus pourrait contenir de l'ammoniac solide au-delà de 55-60 GPa, et que l'équilibre chimique entre NH_3 , N_2 et H_2 en phase fluide varie de façon complexe avec la pression et de la température. La mesure de la constante d'équilibre entre les trois espèces, bien que difficile d'accès dans ces conditions P-T, apparaît comme une donnée importante pour mieux contraindre la composition de l'intérieur de ces planètes. L'extension de la courbe de fusion à plus haute pression est également importante afin de sonder le domaine de stabilité du solide superionique, caractérisé par une forte diffusion protonique et une conductivité électrique élevée. La présence de cette glace superionique au sein de Neptune et Uranus permettrait en effet d'expliquer le champ magnétique particulier des deux géantes glacées.

Référence

« Melting curve and chemical stability of ammonia at high pressure: a combined x-ray diffraction and Raman study »

Jean-Antoine Queyroux, Sandra Ninet, Gunnar Weck, Gaston Garbarino, Thomas Plisson, Mohamed Mezouar, and Frédéric Datchi
 Physical Review B, 99, 134107 (2019)

Contact

frederic.datchi@sorbonne-universite.fr