

Soutenance de thèse du Service d'Astrophysique



L'ORIGINE DES PREMIERS SOLIDES DANS LE SYSTEME SOLAIRE : MODELISATION NUMERIQUE ET COMPARAISON AUX DONNEES CHONDRITQUES

Esther TAILLIFET

SAP

Mercredi 24 septembre – 14h00 - Salle Galilée – bât 713

Les plus vieux solides formés dans notre Système Solaire sont les inclusions réfractaires riches en calcium et en aluminium (CAIs) âgées de 4,567 milliards d'années. L'étude de ces solides extraordinaires issus des météorites chondritiques permet de remonter le temps et d'enquêter sur les premiers instants de la formation de notre Système Solaire dont ils ont été les témoins. Les CAIs sont des solides très variés en terme de morphologie, de taille et de texture. Pour autant, ces objets partagent bon nombre de caractéristiques comme leur âge très ancien et leur composition réfractaire suggérant qu'ils se seraient formés dans les mêmes conditions thermodynamiques et pendant la même période. La séquence de minéraux contenue dans les CAIs est proche de la séquence de condensation attendue lors du refroidissement d'un gaz de composition solaire à l'équilibre. Les analyses d'échantillons en laboratoire et les expériences visant à reproduire certaines de leurs propriétés ont permis de comprendre que ces objets ont été soumis à des processus à haute température mettant en jeu de la condensation, de l'évaporation et de la fusion partielle. Tant par les échelles de temps impliquées dans leur formation que par les conditions physiques nécessaires à la condensation des minéraux les plus réfractaires, il apparaît clair depuis quelques années que les CAIs se sont probablement formés durant les phases précoces de l'évolution du Système Solaire avant que le disque protoplanétaire ait fini sa formation.

Les disques protoplanétaires ionisés sont probablement turbulents en raison du développement de l'instabilité magnétorotationnelle. Le but de ma thèse a été d'étudier l'évolution dynamique des CAIs dans le disque protoplanétaire et en particulier le rôle du transport turbulent sur la diversité de leurs histoires thermiques. Pour cela, j'ai adopté une approche numérique en développant un modèle radial de formation du disque de gaz et du Soleil par effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire. Ce modèle permet ensuite de calculer les propriétés thermodynamiques verticales du disque de gaz. En couplant le modèle de disque 2D ainsi construit au code de transport lagrangien des poussières LIDT3D, j'ai pu étudier l'évolution des solides réfractaires dans leur environnement de formation. Ce travail a permis de montrer que le disque jeune en formation était probablement gravitationnellement instable dans certaines régions et contenait des zones non ionisées où la turbulence était absente (zones mortes). Ce travail a également montré que les conditions de pressions et de températures nécessaires à la formation des CAIs sont présentes très tôt durant l'évolution du système, 20 000 ans seulement après le début de l'effondrement du nuage parent. L'étude de l'évolution des poussières dans le jeune disque turbulent a permis de montrer que la diffusion turbulente des grains est à l'origine d'histoires thermiques variées et complexes. Ce modèle suggère que les CAIs se seraient formés en quelques centaines voire quelques milliers d'années durant les premiers 100 000 ans de l'évolution du Système Solaire par des processus impliquant de la condensation, de l'évaporation, de la fusion partielle et des processus de collages des grains. La diversité des CAIs semble contraindre le paramètre de turbulence des disques à $\alpha > 0,01$, valeur compatible avec les observations de disques protoplanétaires autour d'étoiles de faibles masses comparables au Soleil.

The oldest solids formed in the Solar System are the 4.567 billion years old calcium and aluminum rich inclusions (CAIs). The study of these chondritic solids allows to travel through time and investigate the mechanisms at the origin of the Solar System formation. The CAIs have common characteristics such as their age and their refractory composition that suggest they may have formed in the same region during the same period of time. However, they appear in a broad range of sizes, morphologies and textures difficult to reconcile with a formation model. The condensation sequence observed in CAIs is very similar to the condensation sequence expected from equilibrium calculations in a cooling gas of solar composition. Laboratory measurements on natural samples and experiment to reproduce their textures shows that CAIs were formed through high temperature processes such as condensation, evaporation and partial melting. The temperatures and timescales needed to form these objects suggest that they were formed during the early evolution of the solar system before the protoplanetary disk finished its formation.

The ionized protoplanetary disk probably was turbulent due to magnetorotational instability. In my PhD, I studied the dynamic of the CAIs in a protoplanetary disk focusing on the turbulent transport consequence on their thermal histories. To address this question, I chose a numerical approach and developed a radial model of the Sun and gas disk formation through gravitational collapse of a molecular cloud. This model allows to calculate the vertical thermodynamic of the gas disk. Coupling this 2D (radial-vertical) model of the disk with the Lagrangian dust transport code LIDT3D, I studied the evolution of the refractory solids in their formation environment. This work showed that the young forming disk was probably gravitationally unstable and that the turbulence was inefficient in some regions (dead-zones). This work also showed that the physical conditions needed for the CAIs formation existed very early during the evolution of the system, only 20 000 years after the molecular cloud started its collapse. Studying the evolution of the grains in this young turbulent environment, I showed that the turbulent diffusion of grains might be at the origin of the diversity and complexity of thermal histories. This model suggests that CAIs may have formed in a few hundred or thousand years during the first 100 000 years of the Solar System formation through condensation, evaporation, partial melting and grains sticking. The diversity of CAIs constrains the turbulent parameter to a value of 0.01 or higher. This value is in good agreement with the protoplanetary disks observations around low mass stars comparable to the Sun.