

> l'aluminium 26. Lorsque celui-ci se désintègre, il libère un peu d'énergie, la même qui a servi de source de chaleur pour les planétésimaux. Or si l'on suppose que la chaleur produite par l'aluminium 26 a suffi pour que le planétésimal fonde naturellement depuis l'intérieur, les conséquences sont nombreuses pour l'évolution du corps.

Le métal liquide contenu dans le planétésimal se serait alors séparé du reste de la roche, aurait migré vers le centre du corps (car le métal est plus dense que la roche) et y aurait formé un noyau liquide. Celui-ci, mû par la rotation du caillou spatial, aurait engendré une dynamo magnétique. Entre-temps, les températures glaciales de l'espace environnant auraient refroidi l'extérieur du planétésimal. Et des roches et des poussières froides issues du disque primitif du Système solaire auraient continué à s'ajouter à cette écorce non fondue.

DAVANTAGE D'ALUMINIUM RADIOACTIF

Ainsi, les premières briques du Système solaire, les planétésimaux, auraient contenu plus d'énergie qu'on ne le supposait dans le scénario classique de formation des planètes. Ce processus était-il à revoir? A-t-il été beaucoup plus rapide qu'on ne le pensait, de sorte que l'aluminium 26 était encore présent en abondance dans les planétésimaux? Dans ce cas, cet isotope radioactif a constitué une source de chaleur importante, bien plus que si ces corps s'étaient formés en un temps plus long.

Les manuels décrivent encore souvent la formation du Système solaire comme un processus calme et ordonné qui a débuté il y a 4,567 milliards d'années. L'histoire commence avec un nuage de gaz et de poussière en rotation qui s'est aplati en un disque autour d'une jeune étoile en phase de croissance. Ce mélange de gaz et de poussière a formé une multitude de petits agglomérats dont la taille a peu à peu augmenté jusqu'à atteindre des dizaines ou des centaines de kilomètres de diamètre. En s'entrechoquant, ces planétésimaux se sont agrégés et ont donné naissance à des corps plus imposants, à peu près de la taille de Mars, nommés embryons planétaires.

C'est seulement à partir de cette étape que la température dans ces planètes en devenir a commencé à augmenter notablement. En grandissant, ces embryons ont acquis une gravité suffisante pour nettoyer leurs orbites des débris environnants (soit en les absorbant, soit en les éjectant) et sont ensuite entrés en collision les uns avec les autres pour donner naissance aux planètes. Finalement, l'intérieur de ces planètes s'est réorganisé en deux parties distinctes: le noyau métallique, liquide et turbulent, et un manteau de silicates fondu, océan de magma qui allait se refroidir progressivement.

Cette mécanique bien huilée correspond à l'ancienne vision des choses. Mais, alors que Ben Weiss et moi commençons à étudier Allende et le rôle de l'aluminium 26, d'autres données indiquaient déjà que le Système solaire primordial avait été, en réalité, le théâtre de changements rapides et violents. De nos jours, cette séquence sage où l'on passe, dans l'ordre, de la poussière aux cailloux, puis aux planétésimaux, aux embryons et, enfin, aux planètes, est en train d'être supplantée par un autre scénario. La période de formation des planétésimaux,



Des planètes se sont formées, déchiquetées et reconstruites en moins de 10 millions d'années



dont on supposait il y a encore peu qu'elle s'étirait sur des centaines de millions d'années, aurait duré seulement 3 millions d'années.

À cette fenêtre de temps très réduite, il fallait ajouter le fait que si les petits composants initiaux renfermaient davantage d'énergie (comme l'énergie apportée par la radioactivité de l'aluminium et les premières collisions entre planétésimaux) qu'on ne le pensait, la différenciation en un noyau et un manteau se serait faite sans attendre. Ainsi, des planétésimaux relativement petits ont pu subir des processus que l'on croyait auparavant réservés aux planètes: fusion et dégazage, apparition d'une dynamo magnétique, volcanisme...

En outre, de nouvelles simulations indiquaient que les corps du Système solaire n'ont pas fait qu'augmenter en taille au cours du temps: souvent, lors des collisions, de gros objets ont éclaté pour en donner d'autres plus petits. En effet, si des masses sphériques de taille planétaire se sont formées au cours de ces premiers temps par accréation de petits corps, par la suite, des collisions entre planétésimaux les ont parfois dénudés ou détruits. Leurs débris ont ensuite heurté d'autres corps sphériques et s'y sont agglomérés pour, finalement, leur conférer une taille de planète. Des planètes ont ainsi pu se former, se déchiqueter et se reconstruire en moins de 10 millions d'années.

Si les planétologues ont réussi à assembler cette nouvelle vision d'un jeune Système solaire ➤

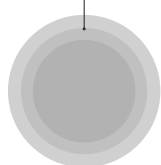
LA CONSTRUCTION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE

Les planètes telles que la Terre et ses voisines ont commencé à se former quand le nuage de gaz et de poussière entourant le Soleil a constitué des grumeaux, les planétésimaux. On a longtemps considéré que ces corps étaient des graines de planète en devenir, qui accumulaient progressivement de la matière. Mais les chercheurs pensent aujourd'hui qu'ils s'entrechoquaient avec violence en tous sens et que ces processus énergétiques ont donné rapidement naissance aux planètes.

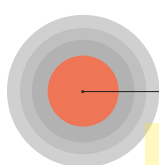
Les grains métalliques d'une couche externe fondue pointent dans la même direction que le champ magnétique et conservent la même orientation une fois que la dynamo s'est arrêtée et que la couche externe s'est refroidie.

À L'INTÉRIEUR D'UN PLANÉTÉSIMAL

Couches de métal et de roche mélangées

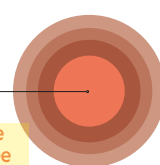


Couches externes non fondues



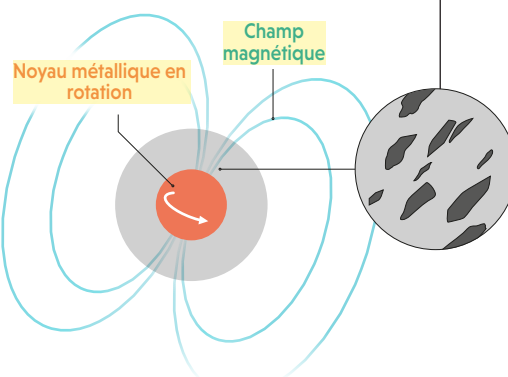
Partiellement différencié

Toutes les couches fondent



Entièrement différencié

Roche silicatée autour d'un noyau métallique



PLANÉTÉSIMAL NON DIFFÉRENCIÉ

Un tel corps, d'un diamètre d'une dizaine à quelques centaines de kilomètres et une structure en oignon, contient des éléments radioactifs qui réchauffent son intérieur sans le fondre.

PLANÉTÉSIMAUX DIFFÉRENCIÉS

Si les éléments radioactifs créent davantage de chaleur, le corps fond de l'intérieur vers l'extérieur. Le métal fondu (fer et nickel) coule vers le centre. Parfois, l'écorce externe n'est pas assez chaude pour se différencier. Tous les planétésimaux différenciés ont un noyau de métal liquide.

FORMATION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Le métal en mouvement devient une dynamo magnétique, ce qui se produit quand les planétésimaux et leur noyau de métal liquide sont en rotation. Ces noyaux génèrent des champs magnétiques pointant dans des directions particulières, tout comme celui de la Terre.

DES PLANÉTÉSIMAUX AUX PLANÈTES

ACCRÉTION

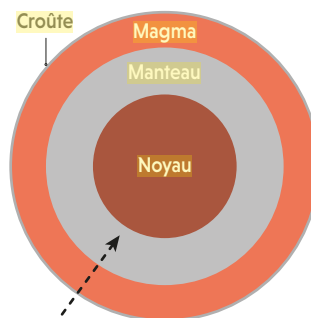
Aux débuts du Système solaire, les particules de poussière s'entrechoquent et s'agglutinent en planétésimaux pouvant atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. En à peine 500 000 ans, l'intérieur de certains de ces corps se différencie partiellement ou totalement.

EMBRYONS

Après de nombreuses collisions, certains planétésimaux ont assez grossi (leur diamètre atteint des milliers de kilomètres) pour former ensuite des embryons planétaires, dont la taille avoisine celle de Mars. Leur intérieur est différencié.

IMPACTS

Dans cette période initiale de formation du Système solaire, les planétésimaux, nombreux, entrent souvent en collision en formant des corps de taille supérieure, mais certains de ceux-ci se scindent en plus petits débris.



PLANÈTES

Quand les embryons sont assez gros, leur gravité perturbe la matière environnante. Parfois, des débris les heurtent. Les impacts géants créent de vastes océans de magma et libèrent des gaz qui forment une atmosphère primitive. D'autres fois, la gravité dévie les corps voisins vers des orbites lointaines. Ces gros objets dont l'orbite est nettoyée gagnent enfin leur statut de planète.

Aujourd'hui, l'astéroïde Psyché est peut-être le vestige d'un noyau métallique de planétésimal, mis à nu par des collisions. Psyché est la cible d'un projet de mission spatiale d'exploration.

Psyché

très actif, c'est en grande partie grâce à l'aide d'outils permettant de calculer l'âge des météorites ainsi que celui de nuages de poussière planétaires (semblables à celui du Système solaire primordial) ailleurs dans le cosmos.

Au moyen de télescopes toujours plus puissants, on a observé la croissance de jeunes étoiles dans d'autres parties de la Voie lactée; et dans certains cas, on a scruté le disque de gaz et de poussière à partir duquel l'étoile et ses planètes se développent. En estimant l'âge des étoiles autour desquelles gravitent des planètes, et en comparant ces mesures avec celles relatives aux étoiles entourées seulement de disques de poussière et de gaz, les chercheurs ont déterminé que ces disques ne perdurent, en moyenne, que 3 millions d'années.

Par conséquent, les planétésimaux n'ont eu que 3 millions d'années en moyenne pour se développer. La poussière et le gaz qui n'ont pas contribué à la formation de ces corps ont été soit happés par l'étoile soit dispersés dans l'espace interstellaire. Il ne restait alors plus aucun matériau disponible pour la construction planétaire. Les théoriciens pensaient que le processus d'accrétion avait duré des centaines de millions d'années: on peut dire que celui-ci a connu un sérieux coup d'accélérateur!

D'autres voies de recherche ont livré des échelles de temps comparables. Depuis une quinzaine d'années, les scientifiques ont développé des instruments capables d'identifier les éléments contenus dans les roches spatiales et estimer leur concentration avec une précision de quelques parties par million, voire mieux. Comme nous connaissons bien les temps que mettent les éléments radioactifs à se désintégrer, nous pouvons déterminer quand les planètes et les planétésimaux ayant perdu ces fragments se sont formés et ont subi des transformations.

Ainsi, les équipes d'Alex Halliday, aujourd'hui à l'université d'Oxford, de Thorsten Kleine, à l'université de Münster, et bien d'autres ont alors commencé à analyser des échantillons de diverses météorites. Ces chercheurs ont montré que des planétésimaux se sont formés dans les premiers millions d'années ayant suivi le début du refroidissement du disque de poussière, que de nombreuses planètes telluriques seraient nées dans les dix premiers millions d'années, et que même la Terre s'était probablement pour l'essentiel constituée et différenciée en un noyau et un manteau en quelques dizaines de millions d'années.

Cette chronologie a été déterminée en utilisant l'horloge que constitue la désintégration des éléments radioactifs. Dans sa version la plus simple, un élément instable se désintègre en un élément stable suivant une loi bien connue. En comparant les quantités de ces deux éléments présentes aujourd'hui dans un



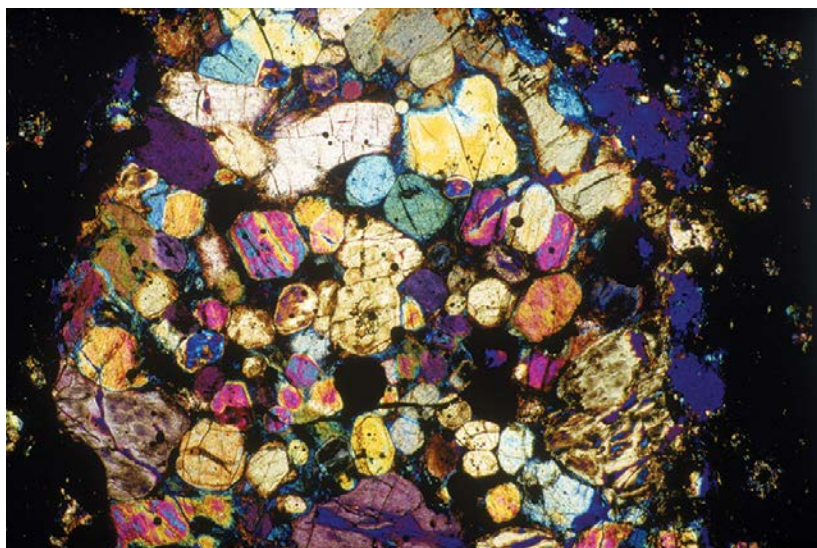
échantillon, on mesure depuis quand ces horloges « tournent ». Les météorites datées de cette façon proviennent de morceaux d'astéroïdes tombés sur Terre, qui sont eux-mêmes des vestiges des planétésimaux primitifs.

Une application bien connue de ces horloges est la datation de la formation du noyau terrestre. L'un des isotopes radioactifs du hafnium a une grande affinité pour les minéraux silicatés et est resté préférentiellement dans le manteau lorsque celui-ci et le noyau se sont différenciés. Mais l'isotope de hafnium se désintègre en un isotope du tungstène qui se combine facilement avec les métaux dont est constitué le noyau planétaire. Cette désintégration se produit à un rythme régulier: la moi-

La météorite Allende est de type chondrite carbonée. Sa matrice gris foncé contient des chondres de couleur claire et des inclusions blanches de calcium-aluminium. Les chondres et les inclusions sont datés d'environ 4,567 milliards d'années. Ils correspondent aux plus vieux matériaux connus du Système solaire et déterminent l'âge de ce dernier.

En grossissant, les petits agrégats de poussière finissent par atteindre la barrière du mètre

tié d'une quantité donnée de hafnium se transforme en tungstène en 9 millions d'années. Ainsi, lors de la différenciation, les métaux ont emporté le tungstène déjà formé par la désintégration d'une partie du hafnium. Après la formation du noyau, les atomes de



Coupe d'un échantillon de la météorite Allende, observée au microscope en lumière polarisée. L'étude du matériau de la météorite a révélé des traces d'un champ magnétique dont était doté le planétésimal parent.

hafnium restant dans le manteau ont continué à se désintégrer en tungstène. En mesurant les concentrations de hafnium et de tungstène restés dans le manteau, on a pu estimer que la formation du noyau terrestre s'est achevée environ 30 millions d'années après la naissance du Système solaire.

De la même façon, des mesures isotopiques réalisées sur des météorites ferreuses ont montré qu'elles provenaient d'objets formés dans les 500 000 ans qui ont suivi les premières condensations de gaz et de poussière du disque protoplanétaire. Si les météorites ferreuses sont des fragments du noyau de planétésimaux qui ont volé en éclats à la suite d'impacts, cela voudrait dire que les planétésimaux ont effectivement dû se former, fondre et créer des noyaux de fer dans cette minuscule fenêtre temporelle.

FORMATION PLANÉTAIRE ACCÉLÉRÉE

Des données expérimentales montrant clairement que le Système solaire s'est formé beaucoup plus vite qu'on ne le pensait, les spécialistes devaient désormais expliquer comment les planètes ont pu apparaître aussi vite. La balle était de nouveau dans le camp des théoriciens. Par quel mécanisme la poussière et les cailloux, de taille comprise entre quelques micromètres et quelques centimètres, tous en orbite autour du jeune Soleil, ont-ils réussi à s'assembler pour former des objets jusqu'à 10 millions de fois plus gros (des planétésimaux de 100 kilomètres de diamètre) en seulement 500 000 ans?

La réponse est tout sauf évidente. La physique classique indique que de petits agrégats de poussière qui entrent en collision peuvent facilement se lier grâce aux forces électromagnétiques, un peu comme l'électricité statique tend à créer des moutons de poussière

domestique. Par ailleurs, un effet d'amortissement des impacts, l'énergie du choc étant absorbée par compression et perte de porosité, aide les amas à rester collés plutôt qu'à rebondir les uns sur les autres et à se séparer.

Mais, en grossissant, ces corps finissent par atteindre un obstacle: la «barrière du mètre». En effet, à partir d'une certaine taille, ces cailloux deviennent trop gros pour être tenus par les forces électromagnétiques, et ils sont encore trop peu massifs pour être maintenus en un seul bloc par l'attraction gravitationnelle. Les impacts, même à très faible vitesse, entraînent la destruction plutôt que l'accrétion de ces agglomérats. Il semble alors impossible d'obtenir des corps de un mètre de diamètre ou plus. Pourtant, nous savons que cette barrière du mètre a été franchie: la planète sur laquelle nous nous tenons aujourd'hui le prouve. D'autres processus doivent donc être en jeu.

Plusieurs idées ont été proposées pour résoudre cette énigme. La plupart font intervenir des mécanismes qui compriment et concentrent le matériau du disque protoplanétaire. Les pistes font notamment intervenir des effets de turbulence qui projettent les particules les unes sur les autres. Ces forces tourbillonnaires pourraient inclure des phénomènes tels que les ondes de Kelvin-Helmholtz, qui se développent entre le gaz et la couche de poussière du disque. La compression de certaines régions riches en matériau les unes sur les autres pourrait former des objets plus gros.

Anders Johansen, de l'université de Lund, en Suède, a proposé un mécanisme d'instabilité de courant. Indépendamment d'Hal Levison, de l'institut de recherche du Sud-Ouest, à San Antonio, au Texas, il a travaillé, avec Michiel Lambrechts, sur un autre modèle, dit d'«accrétion de galets». Ses calculs indiquent que même les plus petits morceaux de poussière et de gravier se seraient accumulés, par des effets gravitationnels et par friction avec le gaz, sur certaines orbites pour venir s'ajouter à un planétésimal en croissance, et cela suffisamment vite pour que des planétésimaux naissent très tôt dans l'histoire du Système solaire.

Si ces scénarios expliquent comment les planétésimaux se sont formés en un temps relativement court, ils sont insuffisants pour déclencher la différenciation de ces corps en un noyau et un manteau. Si les planétésimaux s'étaient initialement formés à partir de matériaux du disque primordial où métaux et silicates étaient intimement mêlés, alors seules des températures élevées et une fusion interne au moins partielle auraient assuré que le métal coule vers le centre et forme un noyau. Des calculs montraient notamment que la chaleur libérée quand ces objets relativement petits se fracassent les uns sur les autres est insuffisante pour atteindre le point de fusion. Par conséquent, les >