

# À LA POURSUITE DU CURIUM-247

En combinant observation astronomiques et mesures isotopiques astrophysiciens, astronomes et cosmochimistes ont fait deux pas de géants dans la compréhension de la synthèse des éléments les plus lourds de l'Univers.

**E**ntre la formation de la Voie lactée il y a 13,2 milliards d'années (Ga) et celle du Système solaire il y a 4,56 Ga, des générations d'étoiles sont nées, ont évolué, avant de finalement exploser, ensemençant ainsi le milieu interstellaire du produit des réactions nucléaires qu'elles ont abritées; c'est la nucléosynthèse stellaire. La composition du gaz et de la poussière présents dans la nébuleuse présolaire est donc le résultat de milliards d'années d'évolution chimique. Véritables archives temporelles, les météorites primitives se sont formées très tôt dans l'histoire du Système solaire et ont capturé cette composition initiale. L'étude de la composition chimique et isotopique des météorites nous fournit ainsi de pré-

cieuses informations sur les processus qui ont façonné le Système solaire et sur la nucléosynthèse stellaire.

Au-delà du pic du fer (masse atomique,  $A \approx 70$ ) les éléments sont produits par trois processus principaux : par photodésintégration selon le processus- $p$ , et par capture neutronique, selon les processus- $s$  et - $r$  suivant que celle-ci est lente ( $s$  pour "slow") ou rapide ( $r$  pour "rapid") par rapport à la décroissance radioactive. Les processus- $s$  et - $p$  sont bien compris et leur site astrophysique est connu : les étoiles géantes de la branche asymptotique pour le processus- $s$ , et les explosions de supernovae pour le processus- $p$ . A contrario, de grandes incertitudes existent concernant le site astrophysique et l'universalité du processus- $r$  (encadré 1). Les abon-

dances des nucléides- $r$  à vie courte dans les météorites primitives, combinées à un modèle simple d'évolution chimique de la Galaxie (encadré 2), nous fournissent un outil pour déterminer le nombre de différents types de processus- $r$ . Bien entendu, on ne peut pas déterminer directement l'abondance des nucléides qui ont disparu, mais uniquement celle de leurs produits de décomposition.

Jusqu'ici, l'abondance météoritique de seulement deux nucléides- $r$  à vie courte a été estimée (l'iode-129 et le plutonium-244), suggérant des époques de nucléosynthèse potentiellement différentes, mais ne permettant pas de trancher la question de l'universalité ou de la multiplicité du processus- $r$  de manière définitive étant donnée l'erreur très large associée au rap-



## L'ESSENTIEL

L'étude de la composition chimique et isotopique des météorites nous fournit de précieuses informations sur la nucléosynthèse stellaire. En ce qui concerne les éléments lourds, au delà du fer, produits par le processus-*r*, de grandes incertitudes existent quant au site et à l'universalité de ce processus. Ce n'est que récemment que des mesures ont pu être faites sur l'un des éléments concernés, le  $^{247}\text{Cm}$ , nucléide idéal, mais qui a échappé à la détection jusqu'à très récemment. C'est la traque de cet isotope qui est décrite ici ; après trente ans de recherches, la présence de  $^{247}\text{Cm}$  est identifiée sans ambiguïté dans le nuage parent du Système solaire, indiquant en même temps l'unicité du processus-*r*. De plus, les observations récentes d'une collision d'étoiles à neutrons par LIGO ont montré que le site astrophysique du processus-*r* réside dans ce type de collisions.

port de production du plutonium-244. Une meilleure compréhension de la nature du processus-*r* nécessiterait donc la détermination de l'abondance d'un troisième nucléide à vie courte. Celui-ci aurait une demi-vie plus longue que 10 millions d'années (Ma) pour expliquer qu'il soit toujours présent dans le nuage présolaire 100 Ma après le dernier événement nucléosynthétique, mais plus courte que ~ 40 Ma, pour être sensible à l'histoire de la nucléosynthèse avant la formation du Système solaire. Le curium-247 ( $^{247}\text{Cm}$ ), qui décroît en uranium-235 ( $^{235}\text{U}$ ), a une demi-vie de 15,6 Ma et serait donc le nucléide idéal à étudier, si tant est que l'on puisse se mettre d'accord sur sa présence dans le Système solaire primi-

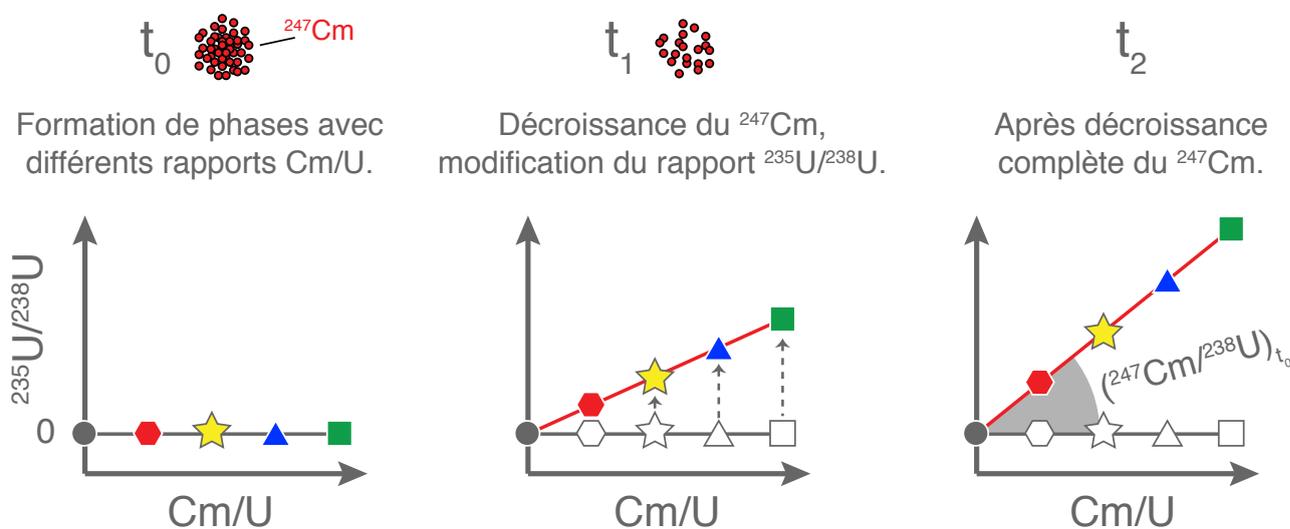
tif... En effet depuis plus de trois décennies, le  $^{247}\text{Cm}$  a échappé à la détection. Jusqu'à aujourd'hui !

### UNE CHASSE COSMIQUE, LONGUE ET TORTUEUSE

Comme en géologie, la loi de décroissance radioactive en fonction du temps permet d'utiliser les radioéléments pour dater des événements dans le passé. Avec une demi-vie de 15,6 Ma (temps au bout duquel la moitié des atomes de  $^{247}\text{Cm}$  se sont désintégrés), tout le  $^{247}\text{Cm}$  initialement présent dans le Système solaire est maintenant décomposé en  $^{235}\text{U}$ . On parle de radioactivité éteinte. Dans le Système solaire actuel, la détection du  $^{247}\text{Cm}$  n'est donc possible qu'indirectement sous la

forme d'excès en  $^{235}\text{U}$  (par rapport au  $^{238}\text{U}$ ) proportionnel à la quantité de curium initialement présente dans l'échantillon. (Fig. 1). Comme il n'est pas possible de mesurer la concentration du Cm directement (il n'existe pas d'isotopes stable du curium), on utilise d'autres éléments ayant un comportement chimique identique pour comprendre les processus mis en jeu. Ce sont les lanthanides ou terres rares. Le néodyme (Nd), un de ces lanthanides, a ainsi un comportement similaire au curium. Pour établir une chronologie on compare dans ce cas précis le rapport isotopique de l'uranium ( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) au rapport Nd/U, lui-même analogue du rapport Cm/U.

L'utilisation du système  $^{247}\text{Cm}$ - $^{235}\text{U}$



1. Evolution temporelle du rapport isotopique de l'U,  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ , pour différentes phases, formées au même moment  $t_0$ , mais contenant différentes abondances relatives de curium (Cm/U). Après décroissance complète du  $^{247}\text{Cm}$ , ces phases s'alignent sur une droite, appelée isochrone, et dont la pente est proportionnelle au rapport  $^{247}\text{Cm}/^{238}\text{U}$  au temps  $t_0$ . (F.Tissot)

comme chronomètre fut proposée pour la première fois en 1973 dans la prestigieuse revue Nature [1]. Quatre et sept ans plus tard, deux autres études, également publiées dans Nature, découvraient des excès de  $^{235}\text{U}$  allant jusqu'à 30 % dans des météorites primitives. Ces excès furent attribués à la présence de  $^{247}\text{Cm}$  dans le Système solaire naissant. De tels résultats, en contradiction avec la constance du rapport  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  terrestre, demandaient confirmation. En 1980, trois articles de deux chercheurs du California Institute of Technology (Caltech), James Chen and Gerald Wasserburg, rapportèrent des mesures de plus haute précision dans les mêmes météorites primitives sans y dé-

couvrir le moindre excès en  $^{235}\text{U}$ . Ce résultat indiqua que si le  $^{247}\text{Cm}$  était présent dans le Système solaire primitif, son abondance était trop faible pour qu'il soit détectable. Convaincu de son résultat, Wasserburg enfonce le clou dans le cercueil du  $^{247}\text{Cm}$  en écrivant dans son autobiographie [2] : «  *$^{247}\text{Cm}$  occurred abundantly in a journal called Nature, but did not occur in nature* ». (soit : « Le  $^{247}\text{Cm}$  est présent en abondance dans un journal appelé Nature mais pas dans la nature ».)

Pourquoi une telle certitude de la part de Wasserburg quant à la justesse des mesures ne trouvant pas d'excès en  $^{235}\text{U}$  ? Il y a, d'une part, la qualité des données du groupe de Caltech, qui avait éprouvé la

justesse de leur méthode grâce à une série de tests robustes, minutieusement détaillés et qui utilisait un spectromètre de masse unique, plus précis que les autres équipes de recherche. Et d'autre part, le fait qu'aucune des études rapportant des excès en  $^{235}\text{U}$  n'avait démontré que ceux-ci étaient corrélés avec la quantité de Curium présente initialement dans les échantillons (c.-à-d. pas d'isochrone ; voir Fig 1). La quantité de météorites étant limitée et la précision maximale insuffisante pour déterminer l'abondance de  $^{247}\text{Cm}$ , la chasse au curium s'arrêta là. Il fallut attendre 24 ans, et la mise sur le marché d'un nouveau type de spectromètre de masse, permettant une mesure du rapport  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  avec

## 1. LES INCERTITUDES DU PROCESSUS-R

Le site du processus-r est le sujet d'intenses discussions. D'un côté, les supernovas à effondrement de cœur (Fig. 6A) évoluent assez rapidement pour expliquer l'enrichissement en nucléides-r des plus vieilles étoiles de la Galaxie mais les conditions de flux de neutrons nécessaires au processus-r n'y sont pas toujours satisfaites. À l'inverse, les collisions d'étoiles à neutrons (Fig. 6B) produisent les conditions nécessaires au processus-r, mais il n'est pas certain que ces événements se produisent assez tôt dans l'histoire de la Galaxie. Une difficulté majeure pour faire avancer le débat est que le processus-r n'a jamais été observé. En Août 2017, la première observation d'une collision d'étoiles à neutron (voir Actualité pXX) change le statu quo, nous montrant pour

la première fois le processus-r en action, synthétisant d'énormes quantités d'or et de platine.

Le nombre de différents processus-r est lui aussi sujet à débat. Les modèles font appel à trois types de processus-r, un premier qui produirait les nucléides-r légers ( $A < 140$ ), un second les nucléides-r lourds ( $A > 140$ ), et un troisième les actinides (e.g., thorium, uranium, plutonium, curium). Ce découpage se base en grande partie sur les abondances des nucléides-r dans les étoiles de faible métallicité du halo galactique (Fig. 7). Si plusieurs types de processus-r ont pu exister tôt dans l'histoire de la Galaxie, la question est de savoir si ces différents processus décrivent l'évolution chimique de la Galaxie à long terme.

une précision de 0,05 ‰ (pour mille, 1 ‰ = 0,1 ‰), pour que les chercheurs s'intéressent à nouveau à cette question.

Si les premières mesures de météorites à haute précision ne trouvèrent aucune variation dans une gamme de 0,5 ‰, une étude publiée en 2010 par Brennecka et ses collaborateurs dans Science [3] fit grand bruit. Les auteurs y mesuraient une série d'inclusions réfractaires météoritiques (ou CAI [note]), les plus anciens solides formés dans le Système solaire, dont quatre révélèrent des excès en  $^{235}\text{U}$ , entre 1,5 et 3,5 ‰, corrélés à l'abondance relative du curium. Pour la première fois, une estimation fiable de l'abondance du  $^{247}\text{Cm}$  dans le Système solaire primitif fut obtenue. Fiable? Pas vraiment!

La faible amplitude des excès en  $^{235}\text{U}$  pose problème. S'ils peuvent être dus à la décroissance du  $^{247}\text{Cm}$ , ils pourraient aussi être la conséquence d'une condensation plus rapide du  $^{235}\text{U}$  par rapport au  $^{238}\text{U}$ . Ce processus, important lors de la formation des CAIs, peut théoriquement

produire des effets de 6,3 ‰, deux fois plus grands que les excès observés jusqu'ici. Deux nouvelles études (fin 2010 et 2012) découvrirent dans d'autres CAIs des enrichissements et appauvrissements en  $^{235}\text{U}$  couvrant 2 ‰ et non corrélés à l'abondance relative de curium. Ces résultats, inexplicables par la décroissance du  $^{247}\text{Cm}$ , jetèrent le doute sur l'origine des faibles enrichissements découverts en 2010 et donc sur la présence du  $^{247}\text{Cm}$  dans le Système solaire jeune...

### SORTIR DE L'IMPASSE : LES CAIS APPAUVRIS EN URANIUM

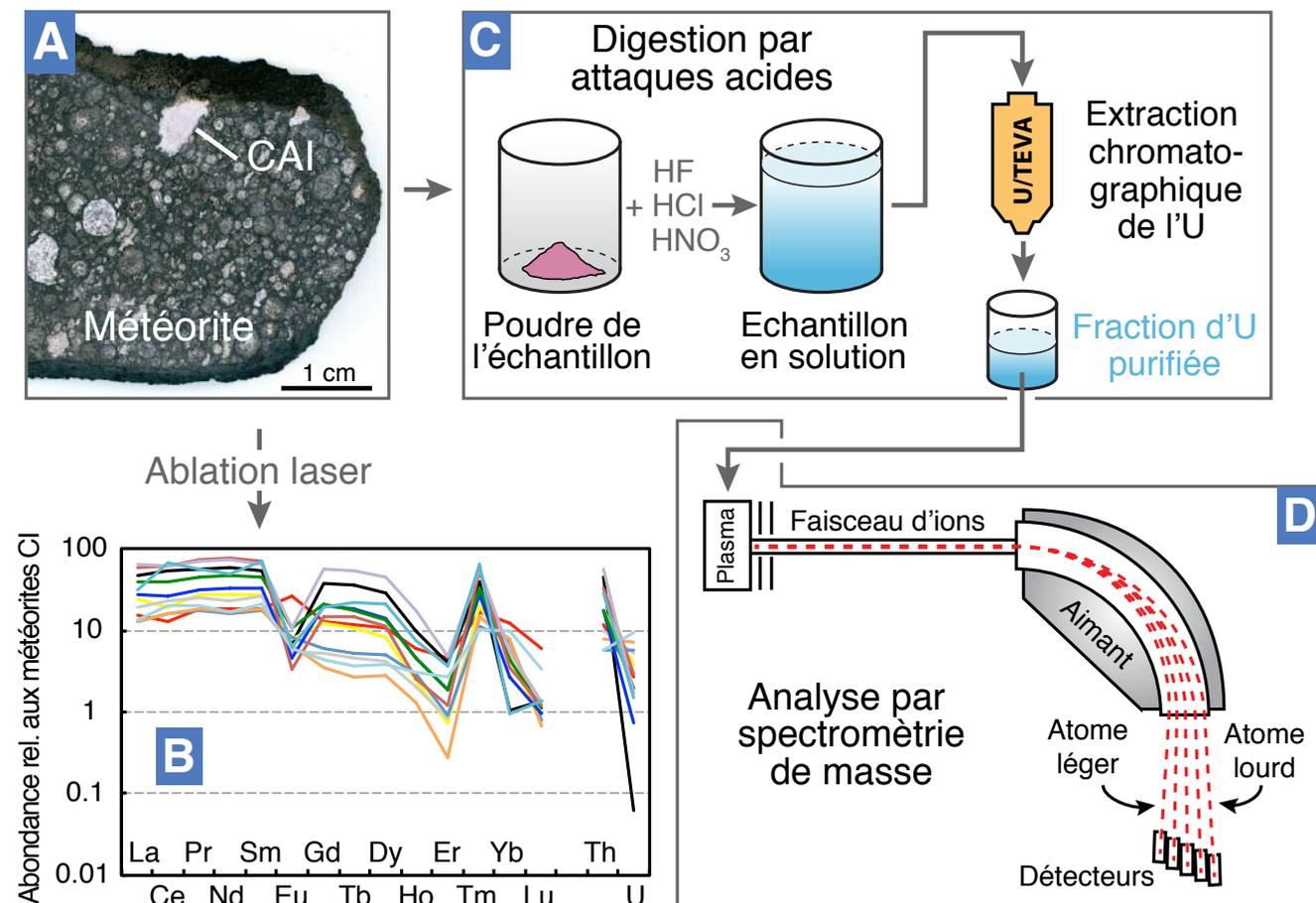
La question n'est donc plus de savoir s'il existe dans les matériaux du Système solaire primitif des excès de  $^{235}\text{U}$  corrélés avec l'abondance relative du curium mais d'en déterminer l'origine.

Pour évaluer la présence de  $^{247}\text{Cm}$  dans le Système solaire primitif il faudrait donc trouver une phase, formée tôt dans l'histoire du Système solaire, qui conserverait un excès en  $^{235}\text{U}$  supérieur à ce que des

phénomènes d'évaporation et/ou de condensation peuvent produire, soit environ 6 ‰. Les CAIs sont les premiers solides à s'être condensés dans la nébuleuse présolaire et sont donc des objets de choix à étudier. Mais l'abondance du  $^{247}\text{Cm}$  dans le Système solaire primitif est au mieux faible, et il faudrait donc trouver une phase avec un rapport  $^{144}\text{Nd}/^{238}\text{U} > 2100$ , alors que le plus haut rapport trouvé jusqu'ici est de 794.

Les cosmochimistes ne pouvant faire d'expédition sur le terrain, nous visitons à la place les collections de météorites des musées. Comme un rapport Nd/U élevé implique un échantillon pauvre en U, trouver des échantillons de grande taille est crucial. Pour ce faire, nous avons examiné plus de 200 spécimens de la météorite d'Allende (une météorite de 2 tonnes, tombée au Mexique le 8 Février 1969) et sélectionné 15 CAIs. Pour chacune (Fig. 2), un fragment a été étudié au microscope électronique à balayage pour en déterminer la minéralogie et analysé pour

2. Protocole expérimental, depuis l'identification des CAIs pauvres en uranium, jusqu'à l'analyse isotopique. Les abondances de terres rares (B) montrent clairement le fractionnement Nd/U des échantillons, condition sine qua non pour détecter des excès en  $^{235}\text{U}$  due à la décroissance du curium-247. (F.Tissot)



déterminer les abondances de terres rares et d'uranium. Les échantillons ont ensuite été extraits de leur matrice météoritique à l'aide d'outils en acier inox et placés dans des flacons en téflon, avant d'être dissous par des attaques acides à chaud. Une fois dissous, chaque échantillon fut soumis à une étape de chromatographie sur colonne pour séparer l'uranium du reste des éléments composant la CAI, et analyser ensuite ses isotopes à l'aide d'un spectromètre de masse à haute-précision.

### PRÉSENCE ET ABONDANCE DU <sup>247</sup>Cm DANS LE SYSTÈME SOLAIRE PRIMITIF

12 des 15 CAIs sélectionnées présentent des abondances de terres rares satisfaisantes (c.a.d. enrichi en Nd) et des appauvrissements en U plus ou moins prononcés. Une CAI en particulier, que nous avons nommée Curious Marie (en hommage à Marie Curie) se révéla avoir un rapport <sup>144</sup>Nd/<sup>238</sup>U de 22640 et un excès en <sup>235</sup>U de +58,9 ± 1,9 ‰ (Fig. 3).

Après confirmation du résultat par une série de tests rigoureux et de mesures additionnelles, la preuve de l'excès en <sup>235</sup>U était faite, indiquant que le <sup>247</sup>Cm était bien présent dans le Système solaire pri-

mitif [4]. En effet, si d'autres processus peuvent produire des variations du rapport <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U, comme l'altération aqueuse, les réactions redox ou l'évaporation et la condensation, aucun de ces processus ne peut produire d'excès plus grand que 5 à 6 ‰.

Ces mesures permettent donc de calculer un rapport <sup>247</sup>Cm/<sup>238</sup>U initial de ~1,79 × 10<sup>-5</sup> (pente de la droite isochrone, cf. Fig. 3). Bien que les échantillons à faible rapport Nd/U s'alignent sur l'isochrone, c'est Curious Marie qui en définit principalement la pente. L'abondance du <sup>247</sup>Cm déterminée correspond donc à la fin de la formation de cette CAI, quand le rapport

Cm/U (ou Nd/U) fut modifié pour la dernière fois. En effet, les fragments de la météorite d'Allende (d'où provient cet échantillon) ayant été récoltés dans les jours suivant sa chute, le fractionnement Cm/U ne peut être la conséquence d'un processus terrestre et la faible teneur en U de Curious Marie est donc une caractéristique précoce. Curious Marie est extrêmement altérée, suggérant qu'un épisode d'altération intense a conduit à la perte de la plus grande partie de l'U, qui est facilement mobilisé par des fluides oxydants.

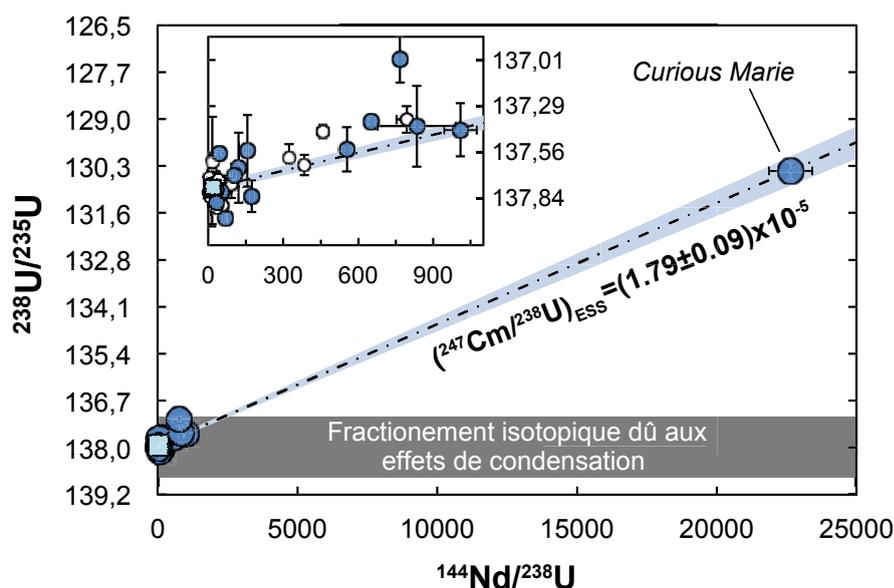
En utilisant un autre chronomètre plus adapté, nous avons pu déterminer que l'altération de Curious Marie s'était produite au plus tard 50 000 ans après la formation du Système solaire [5]. Comme la demi-vie du <sup>247</sup>Cm est de 15,6 Ma, un âge d'altération de 50 ka se traduit par une correction inférieure à 1% de l'abondance du <sup>247</sup>Cm et le rapport (<sup>247</sup>Cm/<sup>238</sup>U) = (1,79 ± 0,09) × 10<sup>-5</sup> représente donc la valeur initiale du Système solaire. Cette valeur est en très bon accord avec les limites supérieures définies par Chen et Wasserburg et les mesures à haute précision de Brennecka (cercles blanc sur la Fig. 3).

On cherche à comparer les prédictions d'un modèle d'évolution chimique de la Galaxie aux abondances mesurées dans les météorites.

### UN PROCESSUS-*r* UNIQUE ?

Revenons à notre question initiale: quelle information nous apporte l'abondance du <sup>247</sup>Cm dans le Système solaire primitif quant au processus-*r*? Comme nous l'avons expliqué (encadré 2), on cherche à comparer les prédictions d'un modèle d'évolution chimique de la Galaxie aux abondances mesurées dans les météorites. Une manière simple de représenter cela est de construire un graphique avec en abscisse, la vie moyenne d'un nucléide (qui détermine les résultats du modèle, équation 1), et en ordonnée, le rapport d'abondance de ce nucléide comparé à un nucléide stable produit par un même processus, le tout normalisé par le rapport des rapports de production de ces deux nucléides. Dans un tel espace, des radionucléides à vie courte produits par un même processus avant la formation du Système solaire, s'aligneront sur une courbe correspondant à un même « intervalle de décroissance libre », Δ (courbes pointillées, Fig. 4).

Si l'on utilise le modèle schématisé en Fig. 5, alors le rapport (<sup>247</sup>Cm/<sup>238</sup>U) = (1,79 ± 0,09) × 10<sup>-5</sup> dans le Système so-



3. <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U vs <sup>144</sup>Nd/<sup>238</sup>U dans les CAIs. Par convention, le rapport <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U est ici exprimé en rapport <sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U en inversant l'échelle. Ronds bleus, CAIs (cette étude, [4]), carré bleu, météorite d'Allende en roche totale (cette étude, [4]), ronds blancs, CAIs (études précédentes). Comme il n'existe pas d'isotope stable du curium, on normalise la quantité d'U présente dans l'échantillon à celle d'un élément stable de comportement géochimique identique à celui de Cm : le néodyme, Nd. L'excès en <sup>235</sup>U de Curious Marie ne peut être expliqué que par la décroissance radioactive du <sup>247</sup>Cm.

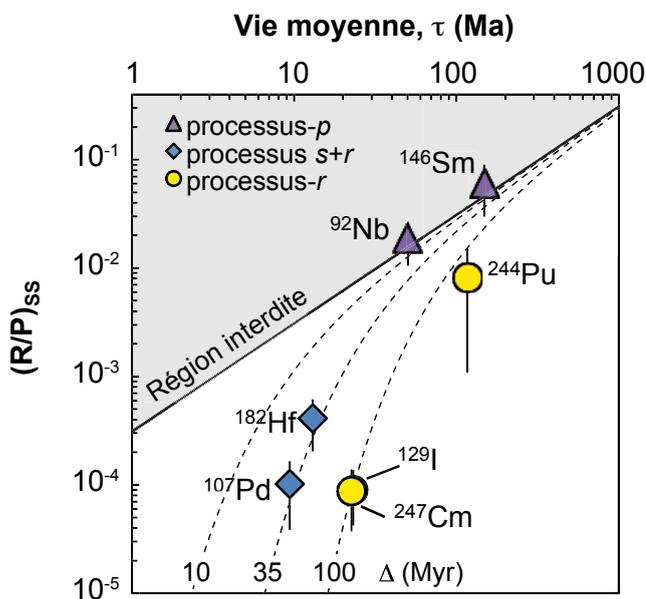
## 2. : UN MODÈLE SIMPLE D'ÉVOLUTION CHIMIQUE DE LA GALAXIE

Dans son plus simple formalisme, la Galaxie peut être décrite comme un disque de gaz, dans lequel les étoiles se forment, vivent et meurent, renvoyant dans le gaz une partie des produits de la nucléosynthèse qu'elles abritent, le reste étant prisonnier du cœur de l'étoile à la fin de sa vie. Ce disque galactique n'est pas un système fermé et il grandit en permanence par incorporation de gaz intergalactique (Fig. 5). Avec seulement quelques paramètres d'entrée, ce modèle simple reproduit les grandes caractéristiques de la Galaxie d'aujourd'hui, dont la métallicité\* des étoiles en fonction de leur âge, l'abondance des éléments en fonction de leur distance au centre galactique, les rapports d'abondance à travers le temps, et les abondances des éléments stables dans le Système solaire. Dans ce contexte, le rapport d'abondance dans le milieu interstellaire d'un nucléide à vie courte sur un nucléide stable produit par un même processus (par exemple, pour l'iode,  $R=^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ) peut être calculé pour tout âge  $T$  de la Galaxie, comme

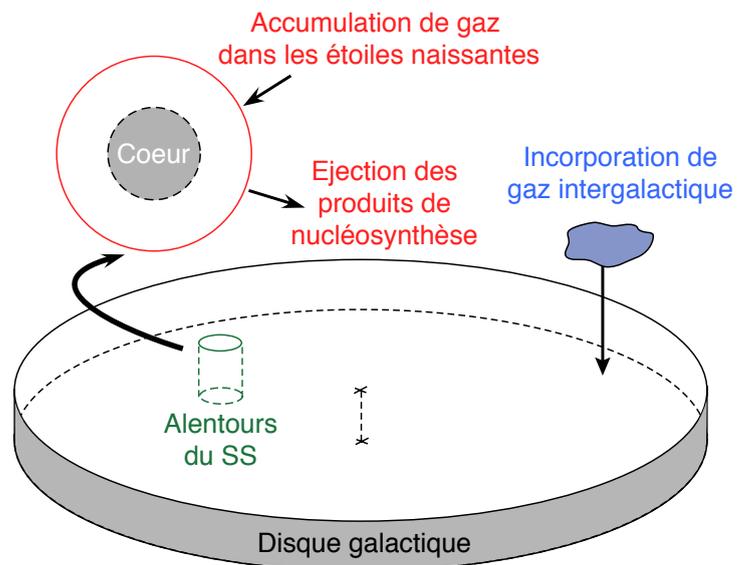
$$R_{\text{ISM}} = 2,7 \times \tau / T \times P \quad (1)$$

où  $P$  est le rapport de production du nucléide à vie courte sur celui du nucléide stable,  $\tau$  est la vie moyenne du nucléide à vie courte ( $\tau = 1/\lambda$ , où  $\lambda$  est la constante de décroissance radioactive), et la constante 2,7 quantifie l'assimilation du gaz intergalactique. L'abondance dans le milieu interstellaire d'un nucléide à vie courte prédite par le modèle (eq : (1)) peut être comparée à celle dans le Système solaire jeune, obtenue par des mesures dans les météorites. La différence entre ces deux valeurs est souvent interprétée comme un « intervalle de décroissance libre » (noté  $\Delta$ , Fig. 4) entre le dernier événement nucléosynthétique qui a produit le nucléide à vie courte et la formation du système solaire :  $R_{\text{SS}} = R_{\text{ISM}} \times e^{-\Delta/\tau}$  (2)

\* c'est-à-dire la proportion, en quantité ou en masse, d'atomes plus lourds que l'hélium.



4. Le rapport  $R/P$  dans le Système solaire primitif (cf. équation 1 et définitions de  $R$  et  $P$  de l'encadré 2) vs la vie moyenne d'un nucléide à vie courte.  $\Delta$  est le temps écoulé entre la dernière production de ce nucléide et son incorporation dans le Système solaire.

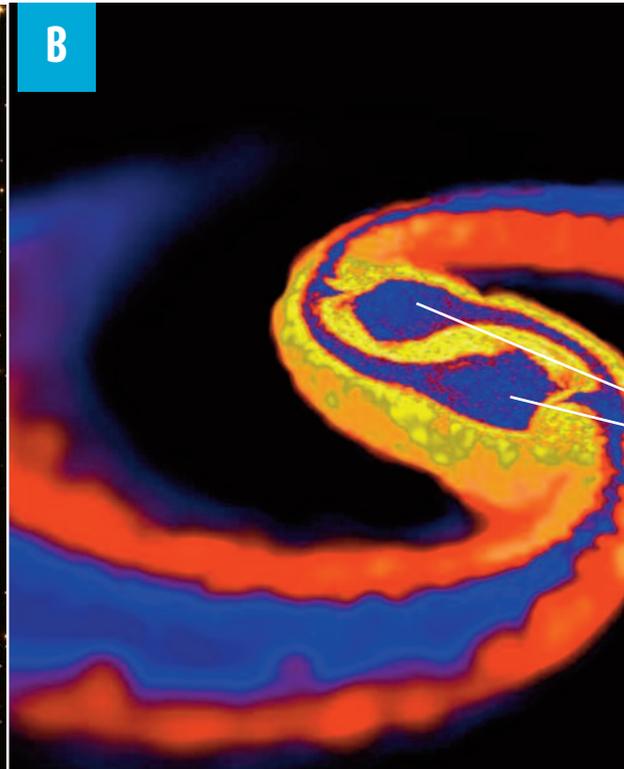
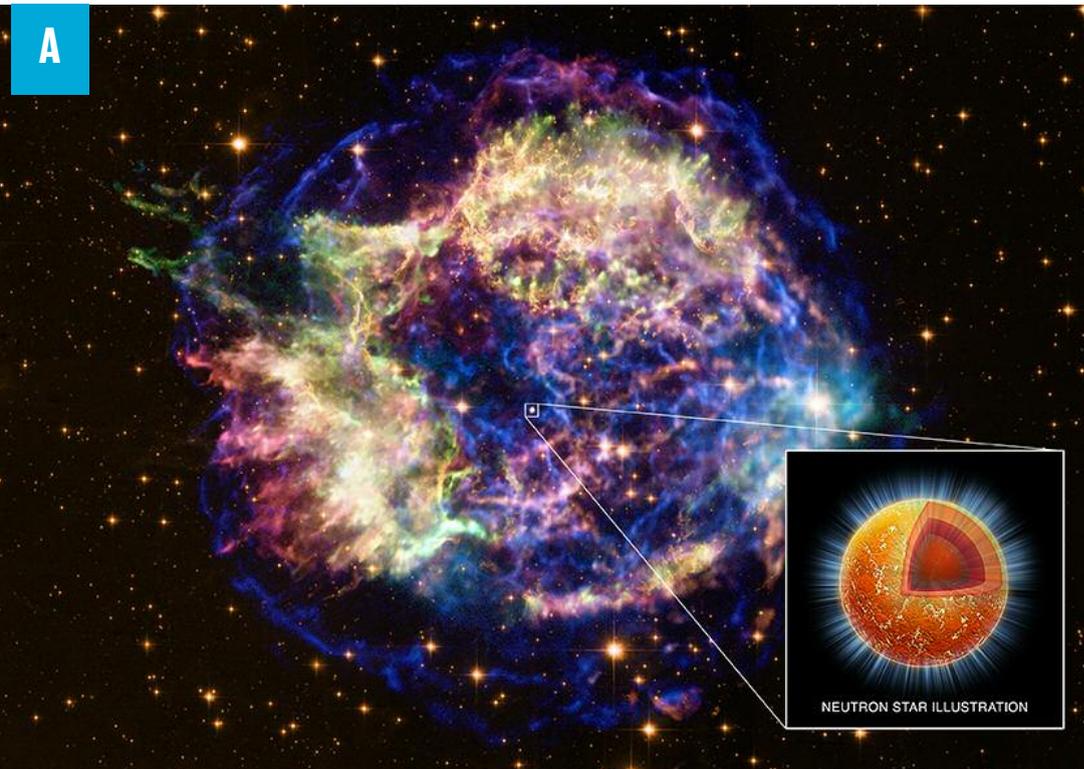


5. Schéma du modèle d'évolution chimique de la Galaxie (après [6]). Les paramètres d'entrée incluent la composition initiale de la Galaxie, le taux de formation des étoiles et leurs rendements (c.-à-d. la proportion de masse renvoyée dans le milieu interstellaire par l'étoile à sa mort), la distribution initiale de masse à travers le disque et le taux de croissance de la Galaxie due à l'assimilation du gaz intergalactique.

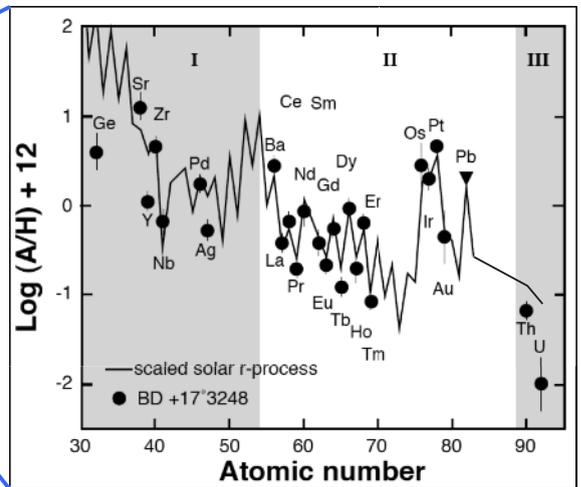
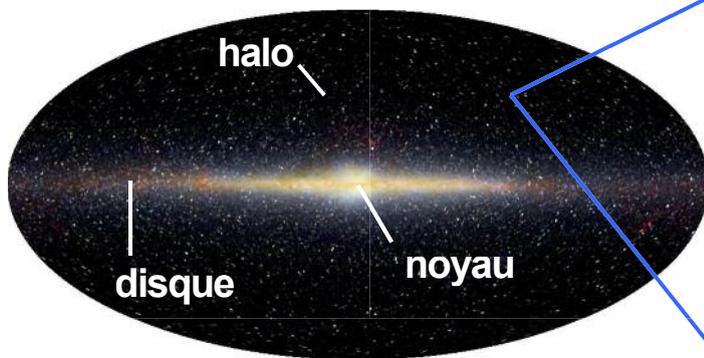
laire primitif correspond à  $\Delta = 103 \pm 13$  Ma. Cette valeur est identique à celle de  $\sim 100$  Ma dérivée des abondances météoritiques en iode-129 et en plutonium-244, mais est beaucoup plus longue que la valeur de 35 Ma obtenue à partir des abondances en palladium-107 et hafnium-182 (Fig. 4). Si le palladium-107 et l'hafnium-182 sont bien des nucléides- $r$ ,

alors plusieurs types de processus- $r$  sont nécessaires pour expliquer les différentes valeurs de  $\Delta$ . Mais des modèles de nucléosynthèse ont récemment réévalué l'origine de ces deux éléments, et trouvent qu'entre 70 et 80 % de ces isotopes sont produits non pas par le processus- $r$ , mais par le processus- $s$ . Dans ce contexte, un seul processus- $r$  suffit à ex-

pliquer les abondances météoritiques de tous les nucléides- $r$  dans le Système solaire primitif. Ce processus unique, produisant les nucléides- $r$  ensemble et dans les mêmes proportions, aurait injecté du matériel dans le nuage interstellaire à partir duquel s'est formé le Système solaire, environ 100 Ma avant la formation de ce dernier.



↑ 6. (A) - Supernovas à effondrement de cœur (B) - Simulation de collisions d'étoiles à neutrons.



7. (À GAUCHE) **Structure de la Voie Lactée.** Les étoiles du halo galactique se sont formées tôt dans l'histoire de la Galaxie, avant l'enrichissement du milieu interstellaire en éléments plus lourds que l'hélium. (À DROITE) Abondances élémentaires des nucléides-*r* dans l'étoile de faible métallicité BD+17°3248 (points noirs), et dans le Système solaire (ligne brisée). Une excellente correspondance est observée entre les abondances du Système solaire et de cette étoile dans la zone II (~53<Z<89), mais pas dans les zones I et III (Z<53 et Z>89). Ce type d'observations indique qu'il existerait deux voire trois types de processus-*r* produisant des nucléides-*r* de différentes masses.

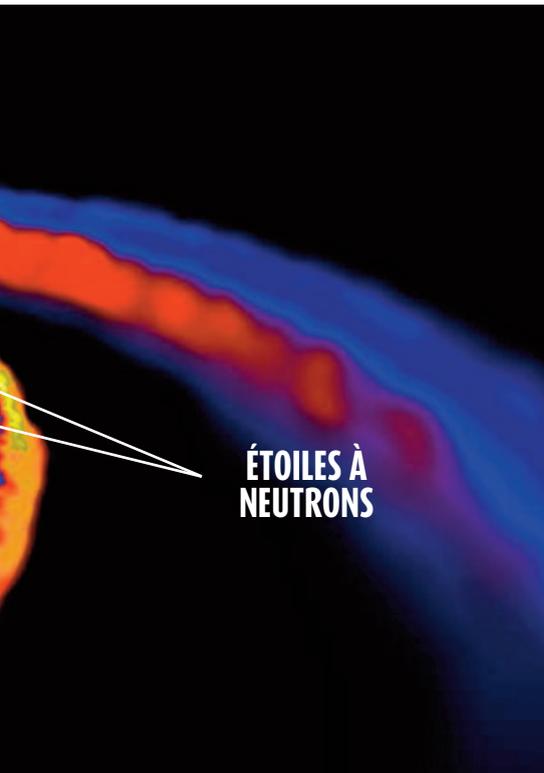
tions atypiques qui ne s'appliquent qu'aux temps primordiaux de la Galaxie. D'après les abondances météoritiques, ces divers types de processus-*r* semblent converger vers un processus unique, pertinent pour décrire l'évolution au long terme de la Galaxie. L'observation récente de la kilonova GW170817 suggère que ce site astrophysique de ce processus soit les collisions d'étoiles à neutrons.

**EN CONCLUSION**

Après trois décennies de recherche, nous avons enfin pu établir sans ambiguïté la présence du <sup>247</sup>Cm dans le nuage parent

Un problème subsiste : comment réconcilier l'unicité du processus-*r* déduite des abondances météoritiques, et la multiplicité de processus-*r* déduite des observations dans les étoiles du halo galactique (encadré 1) ? Une possibilité est que le processus-*r* tel qu'enregistré dans ces étoiles anciennes n'ait pas atteint l'état stationnaire

que nous observons dans les météorites. En effet, ces étoiles se sont formées extrêmement tôt (dans notre Galaxie elle-même ou dans des galaxies elliptiques naines qui furent ensuite capturées par notre Galaxie) et à partir d'un gaz peu enrichi en nucléides-*r*. Plusieurs processus-*r* pourraient être en action dans ces condi-



ÉTOILES À NEUTRONS

véler des informations cruciales sur les processus de nucléosynthèse dans les étoiles et sur les apports de matériaux interstellaires dans le Système solaire en formation. De nouvelles aventures scientifiques en attente d'explorateurs !

### LA PIERRE PHILOSOPHALE

Des siècles durant, les alchimistes ont poursuivis le Magnum Opus, c.a.d. la transmutation d'un métal de base, comme le fer, en un métal noble, comme l'or. Bien sur, cette quête, qui fait maintenant parti de la culture populaire, était principalement symbolique ; une métaphore pour l'amélioration de soi à travers la recherche du savoir. Ce que l'on sait moins, c'est que la transmutation du fer en or est en fait une question tout à fait sérieuse et extrêmement importante pour les astrophysiciens et les cosmochimistes. Dans sa formulation moderne, le problème est d'expliquer où et comment les éléments légers comme le fer (masse atomique 56) ou le cuivre (masse atomique 64) sont transformés en éléments lourds tel que l'or (masse atomique 197), l'uranium (masse atomique 238) ou le curium (masse atomique 247). Théoriquement, le processus qui permet une telle transformation est connu, c'est le processus-*r*, de capture neutronique rapide. Si nous avons vu comment le nombre de types de processus-*r* a pu être déterminé grâce à l'analyse isotopique d'inclusions météoritiques, la question du site astrophysique du processus-*r*

restait un intense sujet de débat. La raison principale étant que le processus-*r* n'avait jamais été observé.

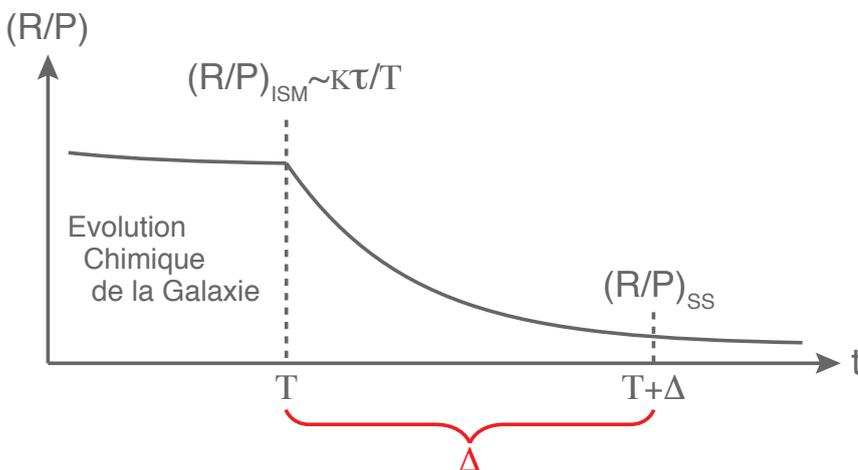
En Août 2017, une onde gravitationnelle venant d'une collision d'étoile à neutron fut détectée par LIGO pour la première fois. Les coordonnées de la collision furent transmises aux télescopes du monde entier, ce qui permit à la communauté astronomique de pouvoir collecter la lumière en provenance de la collision. L'analyse de ce spectre lumineux révéla indirectement que des quantités énormes d'or (200 fois la masse de la Terre) et de platine (500 fois la masse de la Terre) étaient synthétisées lors de la collision. Or la synthèse de ces éléments ne peut être que le résultat du processus-*r*, faisant de cette observation une double découverte : non seulement nous furent témoins pour la première fois d'une collision d'étoiles à neutrons, mais en plus, les observations confirmèrent que celles-ci sont le site astrophysique du processus-*r* ! En combinant observation astronomiques et mesures isotopiques astrophysiciens, astronomes et cosmochimistes ont donc fait deux pas de géants dans la compréhension de la synthèse des éléments les plus lourds de l'univers, répondant par la même à la question alchimique : « comment transformer le Fer en Or ». La pierre philosophale serait donc les collisions d'étoiles à neutrons.

*James Lequeux, nous apporte sa vision d'astronome sur l'origine des éléments r (page xx)*

RÉFÉRENCES : 1. Blake, J.B. and D.N. Schramm, Cm-247 as a Short-Lived R-Process Chronometer. *Nature-Physical Science*, 1973. 243(130): p. 138-140. 2. Wasserburg, G.J., Isotopic adventures - Geological, planetological, and cosmic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003. 31: p. 1-74. 3. Brennecka, G.A., et al., <sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U variations in meteorites: extant <sup>247</sup>Cm and implications for Pb-Pb dating. *Science*, 2010. 327(5964): p. 449-51. 4. Tissot, F.L.H., N. Dauphas, and L. Grossman, Origin of uranium isotope variations in early solar nebula condensates. *Science Advances*, 2016. 2(3). 5. Tang, H., et al., In situ isotopic studies of the U-depleted Allende CAI Curious Marie: Pre-accretionary alteration and the co-existence of <sup>26</sup>Al and <sup>36</sup>Cl in the early solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017. 207: p. 1-18. 6. Nittler, L.R. and N. Dauphas, Meteorites and the Chemical Evolution of the Milky Way. 2006: p. 127-146.

NOTE : Les CAI sont des inclusions réfractaires, riches en Calcium et en Aluminium, présentes en proportions variables dans les météorites primitives. Elles sont facilement identifiables à leur couleur blanc-gris-rose dans la matrice météoritique qui elle est de couleur noire (Cf. Fig 2).

du Système solaire, faisant du Curium l'élément le plus lourd qui y soit naturellement présent. En plus d'indiquer l'unicité du processus-*r*, l'abondance du <sup>247</sup>Cm fournit un rare point d'ancrage dans la région du tableau périodique des actinides, où le manque d'information rend la modélisation chimique extrêmement ardue. Cette découverte marque un tournant dans une poursuite scientifique vieille de 40 ans. Grâce aux instrumentations modernes, les CAIs pourront continuer de ré-



Intervalle de décroissance libre

8. Evolution de l'abondance d'un nucléide à vie courte dans le milieu interstellaire en fonction du temps.  $\Delta$  sépare le dernier événement nucléosynthétique ayant produit un nucléide à vie courte (à l'instant T de la Galaxie) et la formation du SS (à l'instant T+ $\Delta$ ).