

Radioactivités Éteintes et Système Solaire Primitif

Par Jean Duprat

Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse
IN2P3 et Université Paris Sud 11

Il y a 4.5 Milliards d'années, un nuage de gaz et de poussières s'effondrait sur lui-même. Au centre la densité et la température augmentaient. Enfoui au cœur de sa nébuleuse, notre soleil émettait sa première lumière. Si les grandes lignes du scénario de la formation du système solaire sont comprises, de nombreuses questions restent ouvertes. Quelles étaient les interactions entre les différents protagonistes : la proto-étoile¹, la disque d'accrétion² de gaz et de poussière qui l'entourait, le milieu interstellaire entourant cette structure... ? Les étoiles de type solaire naissent-elles isolées, ou en amas ? Une étoile massive a-t-elle explosé à proximité du nuage moléculaire qui forma notre soleil ? Si oui, l'onde de choc produite par la mort violente de cette étoile massive a-t-elle déclenché l'effondrement de la nébuleuse proto-solaire ?

Il reste peu de témoins minéralogiques de cette phase reculée de notre histoire. La plupart des premières *phases*³ minérales qui ont condensé à cette époque ont été refondues dans les corps massifs du système solaire (planètes, astéroïdes). Pourtant, certains objets ont survécu, c'est le cas des phases réfractaires telles que les chondres⁴ ou les CAIs⁵. Ces objets ont condensé à haute température (1000-1500°C) durant les premiers millions d'années du système solaire. On peut les trouver sous forme d'inclusions dans des météorites rocheuses primitives (en particulier dans les chondrites carbonées). C'est dans ces objets qu'ont été mises en évidence les radioactivités éteintes.

Les observations

Pour comprendre le problème posé par les radioactivités éteintes, commençons par les données expérimentales. L'une des premières radioactivité éteinte à avoir été identifiée est le noyau radioactif d'aluminium-26 (²⁶Al) de période 0.74 million d'années.



Dans les CAIs de la météorite d'Allende (Chondrite Carbonée de type CV), on observe un excès de magnésium-26 (²⁶Mg) qui est linéairement corrélé à la teneur en ²⁷Al (l'isotope stable d'Aluminium) : plus la phase minérale de l'inclusion est riche en aluminium, plus celle-ci contient une teneur anormalement élevée en ²⁶Mg. Le rapport ²⁶Mg/²⁴Mg moyen du système solaire est de 0,14. Comme le montre la figure 1, dans certaines phases minérales très riches en Aluminium (Anorthite), on observe un rapport ²⁶Mg/²⁴Mg=0,15. Cet excès de ²⁶Mg

¹ Proto-étoile : étoile en cours de formation.

² Accrétion : les étoiles en formation attirent à elles la matière qui les entoure, il se forme un disque d'accrétion autour d'elles. Proto-étoile : étoile en cours de formation.

³ Phase : partie homogène d'un mélange (chimie).

⁴ Les chondres se trouvent sous forme d'inclusions sphériques d'environ 1 mm dans les météorites primitives (les chondrites). Ils sont composés de silicates réfractaires (olivines, pyroxènes, verres...).

⁵ Les CAIs (Ca, Al rich Inclusions) se présentent sous la forme d'inclusions irrégulières de tailles variables (de quelques dizaines de microns au cm) dans les météorites de type chondrites carbonées. Elles sont constituées de silicates et oxydes réfractaires (mélilite, spinel, anorthite, ...).

est dû à la décroissance de noyaux d' ^{26}Al initialement contenus dans cette phase minérale. On peut ainsi en déduire que, lors de la formation de cette phase minérale, le mélange contenait de l'Aluminium présentant un rapport $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \cdot 10^{-5}$.

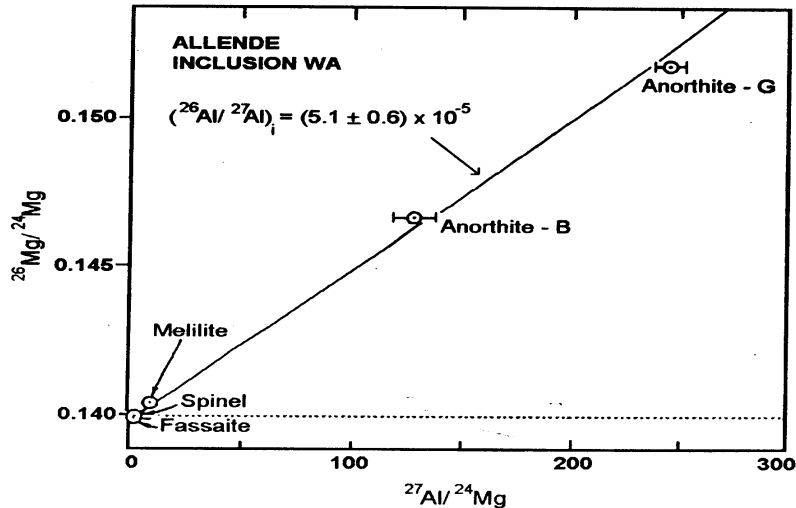


Figure 1 : Mesures des anomalies isotopiques en $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ dans une phase réfractaire de la météorite d'Allende [Lee et al. (1976)]. La valeur solaire normale du rapport $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ (=0.140) est indiquée par la ligne en pointillé. Un excès de ^{26}Mg est visible dans les phases réfractaires riches en Aluminium (Anorthite B et C). Cet excès est dû à la décroissance du noyau radioactif ^{26}Al présent à l'origine dans ces inclusions.

Tout le problème est maintenant de comprendre d'où venait cet ^{26}Al radioactif ? Dans notre Galaxie, de l' ^{26}Al « frais » est constamment injecté par la nucléosynthèse stellaire. Il est en particulier produit par des étoiles massives de type SuperNovae, AGB, Wolf-Rayet... Mais les modèles d'évolution chimique de la galaxie indiquent que lors de son isolement du reste de la galaxie, notre nuage moléculaire devait avoir un rapport $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ inférieur de plusieurs ordres de grandeur à la valeur de $5 \cdot 10^{-5}$ déduite de l'excès de ^{26}Mg dans les CAIs de la météorite d'Allende. Depuis cette découverte, d'autres radioactivités éteintes ont été mises en évidence ^{41}Ca (0,1 Ma), ^{53}Mn (3,74 Ma)...

Quelque chose s'est donc passé au moment de la naissance de notre système solaire qui a produit ces isotopes à courte¹ durée de vie...

Les interprétations

Pendant de nombreuses années, l'explication retenue était l'explosion dans le proche voisinage du système solaire primitif, d'une étoile massive (Supernova ou AGB)². Notre nébuleuse aurait alors été contaminée par les éjecta de cette étoile et aurait donc présenté des teneurs anormalement élevées en certains isotopes à courte durée de vie (de l'ordre du million d'années). Certains auteurs ont envisagé que l'explosion même de cette étoile ait pu déclencher l'effondrement du nuage moléculaire dont une partie forma notre système solaire. Il s'agit donc d'un scénario de nucléosynthèse stellaire (figure 2, gauche).

⁶ On parle ici de courte durée de vie par rapport à l'âge du système solaire (4,5 Milliards d'années)

⁷ Les Super Novae et les AGB (Asymptotic Giant Branch) sont des étoiles massives en fin de vie, elles enrichissent le milieu interstellaire en gaz et en poussières soit lors d'un processus explosif (Super-Novae) soit par une expulsion de leur enveloppe (AGB).

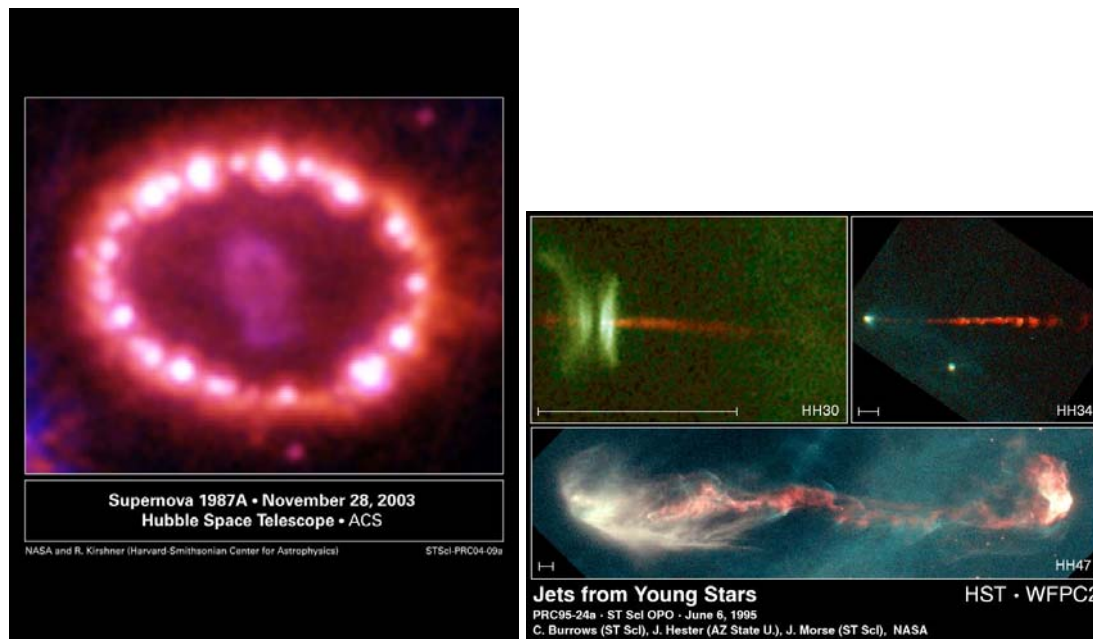


Figure 2 : A gauche, Explosion d'une étoile massive (Super Nova, SN 1987). A droite, étoile en formation, on distingue les flots de matière éjectés par l'étoile.

Une alternative à ce scénario est de produire les radioactivités éteintes par irradiation directement in-situ au cœur de la nébuleuse proto-solaire. Différentes observations astronomiques montrent que les étoiles jeunes passent pas des phases d'activités intenses où il est possible qu'elles irradient la matière qui les entoure (le disque circumstellaire, ou disque d'accrétion) avec des particules légères chargées (p, He) accélérées jusqu'à des énergies de quelques dizaines de MeV. A de telles énergies, ces particules peuvent produire des réactions nucléaires avec la matière entourant l'étoile et donc produire de nombreux noyaux, y compris des noyaux radioactifs. Récemment, l'astrophysicien F. Shu a proposé un modèle, dit modèle du vent-x, pour décrire les interactions possibles entre le proto-soleil et son disque d'accrétion (Shu et al. 1997). Dans le cadre de ce modèle, les teneurs observées en différentes radioactivités éteintes (^{26}Al , ^{41}Ca , ^{53}Mn ...) ont pu être reproduites (Lee et al. 1998, Gounelle et al. 2001). Récemment une nouvelle radioactivité éteinte été identifiée : le ^{10}Be . Le ^{10}Be est un noyau radioactif de période 1,5 Ma, sa présence dans le système solaire primitif est démontrée par l'excès de son produit de décroissance (le ^{10}B) dans des CAIs de la météorite d'Allende (McKeegan et al. 2000).

Ce noyau est particulièrement intéressant pour ce qui est de la controverse qui nous occupe ici car il est très efficacement produit lors de réaction de particules légères sur des cibles de Carbone ou Oxygène mais il n'est que très peu produit par nucléosynthèse stellaire (les travaux de H. Reeves dans les années 70-80 montrent qu'il est en fait plutôt détruit dans les étoiles). Voilà donc un fait expérimental qui plaide fortement pour le scénario de nucléosynthèse par irradiation... Mais, les choses ne sont jamais si simples et, en 2004, l'analyse de Sulfures de Fer de deux météorites (Chervony Kut et Semarkona) a démontré que le ^{60}Fe , (1.5 Ma), était lui aussi présent dans le système solaire primitif. Or ce noyau est, dans l'état actuel de nos connaissances, quasiment impossible à produire par irradiation : il est trop riche en neutrons par rapport à son isotope stable (^{56}Fe) pour être efficacement produit par irradiation de noyaux stables. En revanche, il est très efficacement produit par la nucléosynthèse stellaire dans des étoiles massives de type SuperNovae.

La question de l'origine des radioactivités éteintes est donc encore aujourd'hui, une question ouverte. Quelque soit l'explication qui s'avérera finalement valide, il est important de conserver à l'esprit que cette nucléosynthèse de dernière minute ne représente qu'une infime partie des noyaux de notre système solaire (au maximum quelques 0.01%). L'essentiel des noyaux qui nous entourent proviennent de nucléosynthèse stellaire dans les générations d'étoiles qui ont précédé notre soleil. Pourtant, identifier le mécanisme de cette nucléosynthèse de dernière minute qui produit les radioactivités éteintes est crucial : c'est en effet à partir de ces radioactivités qu'il est possible de bâtir une chronologie isotopique des premiers millions d'années de notre système solaire.

Références :

- Lee, T., D. A. Papanatassiou, et al. (1976). "Demonstration of ^{26}Mg excess in Allende and evidence for ^{26}Al ." GRL 3: 109-112.
- Lee, T., F. H. Shu, et al. (1998). "Protostellar cosmic rays and extinct radioactivities in meteorites." APJ 506: 898-912.
- Gounelle, M., F. H. Shu, et al. (2001). "Extinct radioactivities and protosolar cosmic-rays: self-shielding and light elements." Astrophysical Journal 548: 1051-1070.
- McKeegan, K. D., M. Chaussidon, et al. (2000). "Incorporation of short-lived ^{10}Be in a Calcium-Aluminium-rich Inclusion from the Allende meteorite." Science 289: 1334-1337.
- Mostefaoui, S., G. W. Lugmair, et al. (2004). "Evidence for live ^{60}Fe in meteorites." New Astronomy Reviews 48: 155-159.
- Shu, F. H., H. Shang, A. E. Glassgold, et al. (1997). "X-rays and fluctuating x-winds from protostars." Science 277: 1475.