

Un nouveau mode de fission éclaire l'origine cosmique des terres rares

S. HILAIRE - N. DUBRAY - J.-F. LEMAITRE / CEA – DAM Île-de-France

J.-L. SIDA - S. PANEBIANCO / CEA – DSM, Saclay

S. GORIELY / Institut d'astronomie et d'astrophysique, Belgique

A. BAUSWEIN / Aristotle University of Thessaloniki, Grèce

H.-T. JANKA / Max-Planck Institut für Astrophysik, Garching, Allemagne

Une collaboration européenne combinant des prédictions issues de calculs de structure nucléaire avec des modèles de nucléosynthèse apporte, pour la première fois, une explication simple à l'abondance des terres rares dans le système solaire : une fission doublement asymétrique.

Le processus de capture de neutrons rapides (processus r) est un des processus de nucléosynthèse stellaire responsables de la production des noyaux au-delà du fer. De nombreuses zones d'ombres demeurent encore sur les conditions et les sites astrophysiques dans lesquels il est susceptible de se dérouler. Deux possibilités occupent à ce jour le devant de la scène : l'explosion de supernovæ et la coalescence d'étoiles à neutrons.

Dans le premier cas, la difficulté réside dans l'obtention, à l'issue de l'explosion stellaire, des conditions thermodynamiques et neutroniques suffisantes pour que ce processus s'engage de manière convaincante. À ce jour, les modèles les plus modernes ne parviennent toujours pas à les obtenir. Dans le second cas, par contre, l'intensité du flux neutronique est telle que la viabilité du site vis-à-vis du processus r dépend davantage de la physique nucléaire à l'œuvre durant ce processus que des conditions astrophysiques en tant que telles. Plus précisément, le phénomène de fission vient recycler les transactinides (noyaux avec plus de 103 protons) en fragments de fissions, ce qui rend la composition finale de la matière éjectée très peu sensible aux abondances initiales et aux conditions astrophysiques du milieu collisionnel [1].

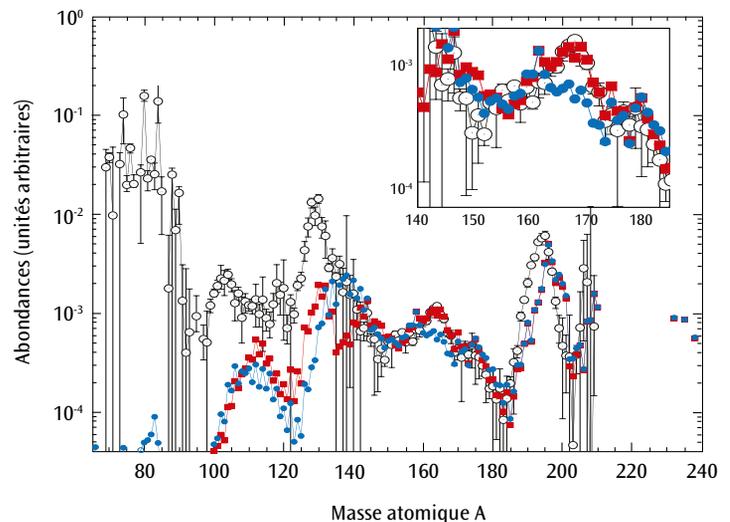
Cette matière est essentiellement constituée de noyaux de masse A supérieure à 140 et produit en particulier une abondance autour du pic A = 195 en bon accord avec les abondances observées dans le système solaire. Pour les noyaux plus légers, typiquement dans la zone de masse des terres rares (140 ≤ A ≤ 175), la situation est en revanche moins claire, et dépend en particulier très fortement des propriétés de la fission en général et de la distribution des fragments de fission en particulier.

La simulation

Depuis plusieurs années, les moyens de calcul intensif dont nous disposons nous ont permis de réaliser des calculs systématiques pour l'ensemble des noyaux susceptibles d'exister dans l'univers. Nous avons en particulier déterminé les énergies de tous les noyaux en fonction de leur déformation axiale [2]. Ces informations constituent la base à partir de laquelle nous avons modernisé le modèle du point de scission [3] afin de pouvoir l'appliquer avec plus de confiance dans des régions où n'existent pas de données expérimentales relatives aux distributions

Figure 1. Abondance en fonction de la masse atomique.

Les carrés rouges (resp. bleus) correspondent aux prédictions issues de notre simulation en utilisant les distributions de fragments prédites par le code SPY (resp. GEF). Les abondances solaires sont représentées par les cercles.



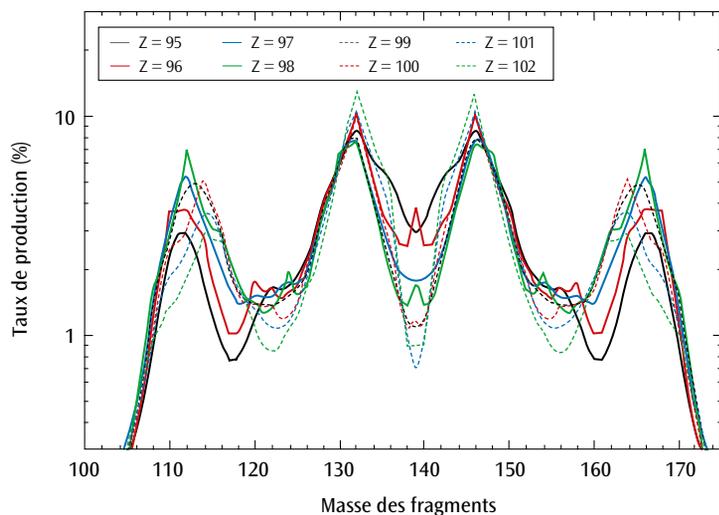


Figure 2. Distribution de fragments prédites par le modèle SPY pour des isobares de masse 278.

de fragments. Ce modèle, appelé SPY, développé dans le cadre de la collaboration CPHYNU entre la DAM et la DSM, a d'ores et déjà prouvé son potentiel prédictif [3].

Nous l'avons donc utilisé pour prédire, de manière exhaustive, les distributions de fragments obtenues à partir de tous les noyaux fissionnant dans un calcul de processus r. Ces prédictions ont alimenté une base de données de réactions nucléaires pour plus de 5 000 noyaux, construite à partir du code TALYS [4]. Cette dernière permet de traiter l'évolution de la population nucléaire durant la coalescence de l'étoile à neutron avec son compagnon, en prenant en compte, de manière cohérente, toutes les réactions nucléaires d'intérêt.

Notons l'utilisation systématique de données microscopiques pour son élaboration en raison de l'absence d'informations expérimentales pour la quasi-totalité des noyaux concernés par cette étude.

Les résultats

Les abondances obtenues à l'issue de la simulation sont représentées sur la figure 1 et comparées aux abondances solaires. Sur cette figure sont aussi représentées les abondances obtenues en remplaçant les distributions de fragments fournies par SPY par celles issues du modèle GEF ajusté dans les zones accessibles à l'expérience, toutes choses étant égales par ailleurs. Comme on peut le constater, l'accord avec les abondances solaires dans la zone des terres rares est bien plus satisfaisant lorsque l'on repose sur les prédictions de SPY. Cette observation reste valable si l'on modifie certains éléments de la simulation tels que les taux de réactions nucléaires ou les modèles de décroissance β [5], preuve que la source principale d'accord est la distribution de fragments de fission spécifique du modèle SPY.

En y regardant de plus près, nous avons constaté que ces distributions fournies par SPY ont un caractère totalement singulier dans la région des progéniteurs des terres rares, jamais observé jusqu'alors. Il consiste en une distribution doublement asymétrique (figure 2) qui semble confirmée par des calculs plus microscopiques (figure 3).

Conclusion

Ce travail éclaire sous un jour nouveau le problème de l'abondance des terres rares dans le système solaire.

Ces éléments pourraient avoir été créés lors de collisions d'étoiles à neutrons permettant à un processus r de se produire. Cette conclusion se base sur nos prédictions relatives à un nouveau mode de fission, doublement asymétrique, se développant pour des noyaux de masse $A \approx 280$.

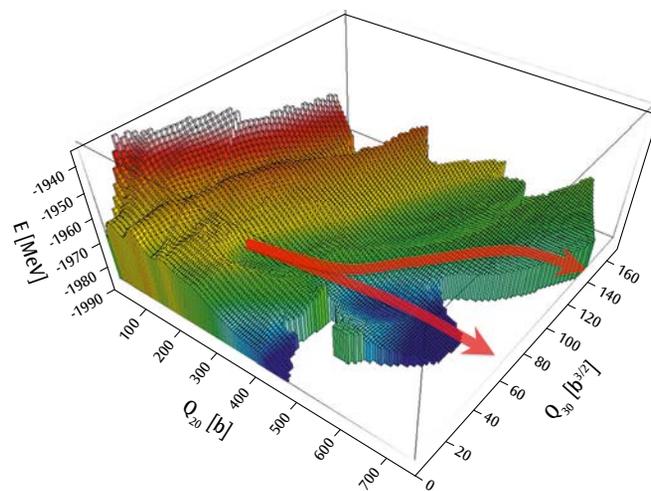


Figure 3. Surface d'énergie potentielle du ^{278}Cf en fonction des déformations quadripolaires Q_{20} et octupolaires Q_{30} . Les deux vallées asymétriques sont indiquées par les flèches rouges.

Références

- [1] O. KOROBKIN *et al.*, "On the astrophysical robustness of neutron star merger r-process", *Month. Not. Roy. Astro. Soc.*, **426**, p. 1940-1949 (2012).
- [2] S. HILAIRE, M. GIROD, "Large-scale mean-field calculations from proton to neutron drip lines using the D1S Gogny force", *Eur. Phys. J.*, **A33**, p. 237-241 (2007).
- [3] S. PANEBIANCO *et al.*, "Role of deformed shell effects on the mass asymmetry in nuclear fission of mercury isotopes", *Phys. Rev. C.*, **86**, 064601 (2012).
- [4] S. GORIELY, S. HILAIRE, A. J. KONING, "Improved predictions of nuclear reaction rates with the TALYS reaction code for astrophysical applications", *Astron. Astrophys.*, **487**, p. 767-774 (2008).
- [5] S. GORIELY *et al.*, "New fission fragment distributions and r-process origin of the rare-earth elements", *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 242502 (2013).