

L'EVOLUTION STELLAIRE  
(suite et fin)

---

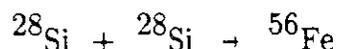
C. WAELKENS

Astronomisch Instituut Katholieke Universiteit Leuven

L'évolution des étoiles massives

La figure 4 nous apprend que pendant toute l'évolution des étoiles plus massives que 8 masses solaires, les réactions nucléaires se passent dans un milieu non dégénéré. D'une part, la combustion se passera donc sans épisodes catastrophiques, mais d'autre part il n'y aura pas d'électrons dégénérés pour contribuer à la pression. L'étoile n'a alors pas d'autre choix que de continuer à produire de l'énergie par fusion nucléaire. Ainsi à la combustion d'hydrogène succédera celle d'hélium, puis le carbone sera fusionné en magnésium-24,...

Il est clair que les réactions nucléaires ne pourront pas éternellement produire la pression nécessaire dans ces étoiles. Une fois le fer-56 synthétisé dans la réaction



c'en sera fini avec les possibilités de produire de l'énergie par fusion. En plus, les différentes phases de combustion se succéderont de plus en plus rapidement, pour deux raisons. D'abord, nous voyons sur la figure 1 que la pente diminue quand on se rapproche du fer; donc, de moins en moins d'énergie sera produite par réaction et il faudra de plus en plus de réactions par unité de temps pour assouvir les besoins de l'étoile. Puis, les réactions se produiront chaque fois à des températures plus hautes, et ainsi une fraction chaque fois grandissante de l'énergie sera évacuée par des neutrinos; celles-ci sont des particules qui n'interagissent pratiquement pas avec la matière et qui donc ne contribuent point à la pression. Pour produire quand même la pression nécessaire pour contrer son autogravitation, l'étoile devra donc produire de plus en plus d'énergie! La durée de la phase de synthèse de fer à partir de silicium ne sera que de l'ordre de quelques jours!

L'évolution d'une telle étoile massive conduira finalement à une explosion de supernova "du type II". Le noyau de fer soumis à sa propre gravitation contracte, n'allume plus de réactions, et arrive à une densité telle que ses électrons forment un gaz dégénéré. Mais sa masse atteint assez vite la limite de Chandrasekhar, et l'implosion devient inévitable. Pendant cet effondrement beaucoup d'énergie potentielle gravitationnelle est libérée. Cette énergie sert en partie à défaire les atomes de fer (elles sont "photodissociées"), ce qui accélère encore le processus

d'implosion puisque la photodissociation enlève de l'énergie au milieu. Pourtant, deux facteurs peuvent arrêter l'effondrement: d'une part la matière devient tellement dense qu'elle n'est plus transparente aux neutrinos, et d'autre part les électrons et protons se rentrent dedans et forment des neutrons: l'état de la matière est alors devenu celui d'un gaz dégénéré de neutrons, et celui-ci peut soutenir son propre poids jusqu'à environ deux masses solaires. On assiste alors à la formation d'une "étoile à neutrons".

L'implosion du noyau de fer jusqu'à la formation d'une étoile à neutrons ne dure qu'une milliseconde! Le nouvel équilibre se crée de façon assez brutale. Le rebond produit une onde de choc qui se propage vers l'extérieur de l'étoile. Il se peut alors que cette onde de choc l'emporte sur le mouvement inverse qui fait s'écrouler sur le noyau les couches de l'étoile qui entourent le noyau. Dans ce cas-là, ces couches, qui forment des coquilles de composition chaque fois différente, correspondant à des phases successives de combustion nucléaire, sont éjectées dans l'espace et une partie de l'énergie libérée parvient à l'extérieur. C'est l'explosion de supernova.

On peut aussi s'imaginer que, pour des étoiles très massives, l'onde de choc soit trop faible pour souffler les couches extérieures et que tout s'écroule. Alors même la pression des neutrons ne peut plus suffire pour contrebalancer la gravitation et l'effondrement est total, tel que même la lumière n'arrive plus à sortir. Ce scénario ultime de l'écroulement gravitationnel conduit alors à un trou noir.

L'énergie gigantesque libérée dans une supernova du type II est donc à l'origine de source gravitationnelle: elle est produite par l'implosion de l'étoile sur elle-même. Une grande partie (de l'ordre de 99%) de cette énergie est libérée sous forme de neutrinos. De ce qui reste, une fraction est convertie en l'énergie mécanique nécessaire pour souffler l'enveloppe de l'étoile. Cette énergie mécanique dépend de la structure et du poids de l'enveloppe et peut bien différer d'une supernova à une autre. Par conséquent, il est difficile de prédire l'énergie qui peut encore être convertie en la luminosité d'une supernova de type II. Ainsi, la fameuse supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan a-t-elle explosé dans une étoile assez dense, où il a fallu relativement beaucoup d'énergie mécanique pour souffler l'enveloppe: l'étoile n'est donc pas devenue aussi brillante qu'on pouvait espérer.

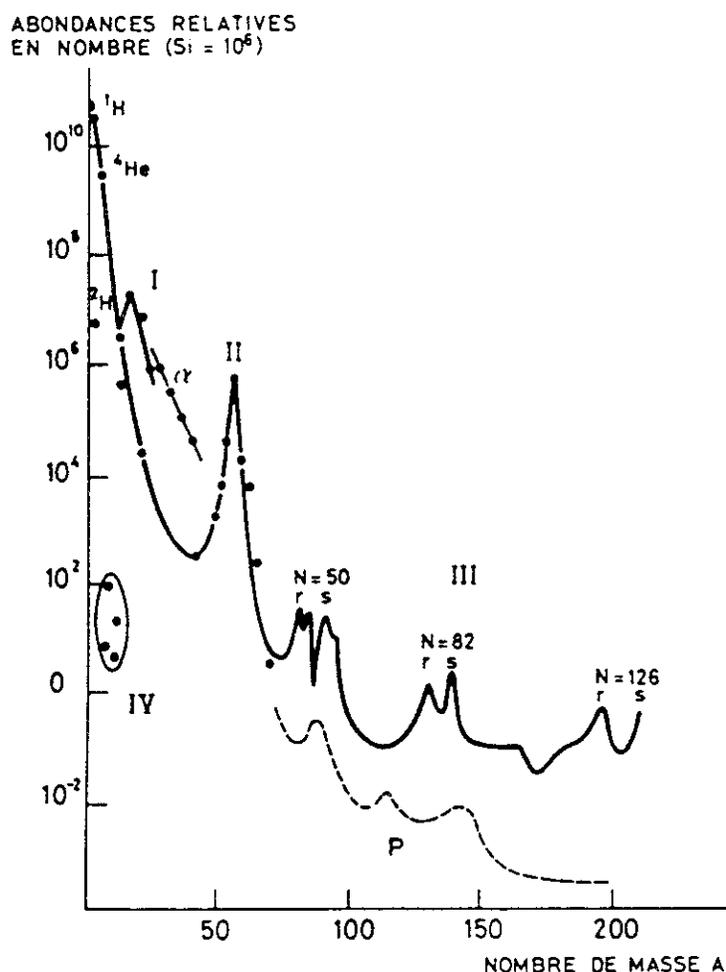
## La nucléosynthèse dans les étoiles

L'astrophysique moderne nous a apporté un certain nombre de connaissances qui sortent du contexte spécifique de cette science et qui devraient faire partie de la culture générale de chacun. Parmi celles-ci la notion d'expansion de l'univers et aussi l'explication pour l'origine des éléments chimiques.

Sur la figure 5 nous voyons ce qu'on appelle l'abondance des éléments, c'est-à-dire la fraction relative dans laquelle les différents éléments de la Table de Mendeleev sont présents dans la nature. Nous remarquons d'abord qu'environ 98% (en masse) des éléments sont sous forme d'hydrogène (72%) et d'hélium (26%). Ces chiffres sont très bien expliqués par les théories cosmologiques: la matière est émergée sous forme de protons et neutrons de la première seconde de l'univers et à peu près tous les neutrons se sont alliés à des protons pour former des atomes d'hélium. Cette "nucléosynthèse primordiale" s'est arrêtée très tôt, quand la densité de l'univers devenait trop faible pour permettre de nouvelles réactions.

Les abondances relatives des éléments dans le système solaire en fonction de leur nombre de masse  $A$ . Ces abondances sont le résultat de l'évolution chimique galactique, dans laquelle la synthèse des éléments dans les étoiles joue un rôle essentiel. Les abondances sont données en nombre d'atomes dans une échelle où celle du silicium, égale à  $10^6$ , soit un million, est prise pour référence. Les chiffres romains désignent les groupes des éléments pour lesquels  $A \leq 45$  (pic de l'hydrogène), le pic du fer (II), les éléments plus lourds que  $A \approx 65$  (III), les éléments très légers enfin (IV). On notera que l'échelle des abondances est logarithmique.

Figure 5:



Ce sont les deux pour cent d'éléments plus lourds qui nous intéressent ici, puisque l'existence de ces éléments peut être expliquée à partir de la théorie de la nucléosynthèse à l'intérieur des étoiles. En fait, par les explosions de supernovae et aussi pendant les phases ultimes des étoiles de faible masse, une partie des produits de cette nucléosynthèse est restituée au milieu interstellaire. Chaque génération d'étoiles est ainsi engendrée par un milieu enrichi chimiquement par les générations précédentes. Sur la figure 5 nous remarquons que

- (1) l'abondance des éléments décroît grossièrement avec le nombre de masse  $A$ ;
- (2) il y a une certaine prépondérance des éléments dont le nombre de masse est un multiple de 4, c'est-à-dire l'hélium, le carbone, l'oxygène, le néon, le magnésium, ...
- (3) il y a un maximum local autour du fer (le "pic du fer");
- (4) au-delà du fer, il y a encore des éléments, et là aussi il y a quelques maxima locaux.

Avec ce que nous avons vu plus haut nous pouvons expliquer les points (1) et (2). Il est assez compréhensible qu'il y'a plus d'éléments légers, puisque ceux-ci sont formés les premiers. Les noyaux d'hélium sont le matériel de base des réactions de fusion dans les étoiles évoluées et il est donc normal que les produits ont le plus souvent des nombres de masse qui sont un multiple de quatre. Les autres éléments sont formés à des abondances moins importantes dans les multiples autres réactions qui surviennent dans ces étoiles.

Pour comprendre les points (3) et (4) il faut quelques explications supplémentaires. On ne s'attend pas à qu'une explosion supernova telle que nous l'avons décrite produise du fer, puisque le fer est seulement produit dans le noyau qui justement implose et est photodissocié. Un nouveau concept qu'il faut introduire est la *nucleosynthese explosive*. L'onde de choc dans une supernova chauffe la matière dans l'enveloppe d'une façon telle que des réactions nucléaires en chaîne peuvent se produire; tous les éléments jusqu'au fer sont alors produits dans des proportions différentes. L'explosion d'une supernova n'est pas précisément une situation d'équilibre et l'énergie gigantesque libérée alors conduit aussi à des réactions nucléaires qui consomment de l'énergie au lieu d'en produire; ainsi les éléments stables plus lourds que le fer sont aussi synthétisés. Décrire toutes ces réactions en détail n'est pas simple; il nous suffit ici de dire que la théorie de la nucléosynthèse explosive parvient à expliquer beaucoup de détails de la figure 5, où en voit qu'au-delà du fer il y a certaines "bosses caractéristiques".

Pourtant, les supernovas du type II ne suffisent pas à expliquer le pic du fer. La supernova 1987A a produit plus d'une masse solaire d'oxygène, mais seulement environ 0.07 masses solaire de fer. Par contre, il existe un autre type de supernova, où les éléments du pic du fer sont produits abondamment: les supernovas du type I. Elles ont une origine bien différente des type II. Imaginons une naine blanche dans un système binaire où le companion est assez proche. Au cours de son évolution, ce compagnon grossit et à partir d'un certain moment commence à transférer de la matière sur la naine blanche. Finalement, il se peut ainsi que la naine blanche, qui croyait avoir définitivement résolu le problème de son autogravitation, finalement transgresse la limite de Chandrasekhar. C'est alors l'effondrement brutal et inévitable, le chauffage de l'intérieur allume le carbone en milieu dégénéré et c'est la "déflagration du carbone", une explosion nucléaire qui probablement conduit à l'éclatement total.

Les progéniteurs des supernova du type I sont donc des étoiles de masse initiale assez faible. L'énergie de l'explosion est d'origine nucléaire. Et dans cette explosion, la matière tend à son état d'énergie minimum, qui est celui d'un noyau de fer, l'élément le plus stable de la nature. Ce sont les supernovas de ce type qui contribuent le plus à synthétiser les éléments du pic de fer.

### L'âge des étoiles, l'âge de l'univers.

Les étoiles que nous observons ont chacune leur histoire et se trouvent à des distances très différentes de nous. On observe quand même des groupements physiques d'étoiles, les *amas stellaires*. Il s'agit alors d'étoiles qui sont nées dans un même nuage et qui ont fait chemin ensemble depuis. L'observation d'amas stellaires est très intéressante pour étudier l'évolution stellaire, parce que les étoiles d'un même amas ont le même âge et sont à la même distance: si l'une est plus brillante qu'une autre, on sait qu'il s'agit alors d'une différence de luminosité intrinsèque.

Sur la figure 6 nous montrons un diagramme "magnitude—couleur" d'un amas. C'est comme un diagramme HR, mais on met en évidence la magnitude apparente et non la magnitude absolue; puisque toutes les étoiles sont à la même distance, la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue est la même pour toutes les étoiles de l'amas, comme quoi on peut la figure 6 représente bien le

diagramme HR de l'amas. On observe alors que les étoiles de l'amas définissent une ligne "isochrone": à cause de la relation masse-luminosité et donc la variation très forte de la durée de vie de la séquence principale avec la masse de l'étoile, on voit que les étoiles les plus faibles se trouvent encore sur la "séquence d'âge zéro" (en traits sur la figure), alors que les plus massives ont déjà quitté la séquence principale.

Plus un amas est vieux, plus faibles intrinsèquement sont les étoiles qui ont déjà quitté la séquence principale. Ainsi, l'étude de diagrammes tels que la figure 6 est-elle un outil puissant pour estimer l'âge des étoiles et par conséquent une limite inférieure pour l'âge de l'univers. On trouve que les amas les plus vieux, les amas globulaires, ont des âges de l'ordre de 15 milliards d'années.

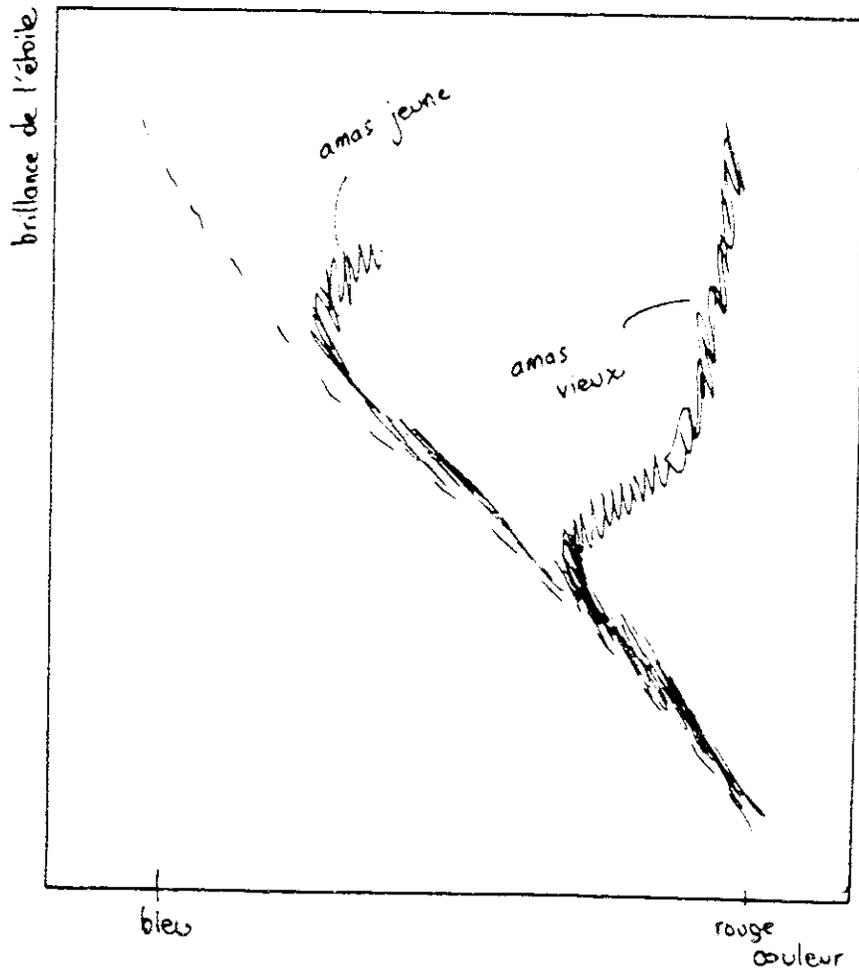


Figure 6: Diagrammes magnitude-couleur d'amas stellaires.