

POURQUOI LES ÉTOILES DEVIENNENT DES GÉANTES ROUGES

On considère le plasma à l'intérieur des étoiles comme un gaz parfait. Entre deux chocs, les atomes sont donc considérés en chute libre vers le centre de l'étoile, donc en fait, en orbite gravitationnel autour du centre de l'étoile. On sait que la trajectoire entre deux chocs ne dépend pas de la masse mais uniquement de la position initiale et de la vitesse initiale après le choc.

L'étoile transforme progressivement l'hydrogène en hélium. À cause de l'équipartition de l'énergie, quand un atome d'hydrogène heurte un atome d'hélium, ils prennent en moyenne la même énergie cinétique, donc, l'atome d'hélium va moins vite. Donc il est placé sur une trajectoire qui devrait l'amener, sans choc ultérieur plus près du centre. Lentement, les atomes d'hélium s'accumulent donc au centre de l'étoile.

À cause du théorème du viriel, orbitant plus près du centre, les atomes d'hélium vont en moyenne plus vite, et sont donc plus chauds. En effet : $2\langle E_C \rangle = -U$. Deux fois l'énergie cinétique est opposé à l'énergie potentielle gravitationnelle. Donc si l'énergie potentielle gravitationnelle diminue, ce qui est le cas pour l'ensemble des atomes d'hélium, alors l'énergie cinétique, donc la température augmente.

Supposons que l'énergie de l'étoile reste à peu près constante. À cause du théorème du viriel, à la fois l'énergie thermique et l'énergie potentielle gravitationnelle sont séparément constantes. En effet $\langle E_C \rangle = -E_{\text{totale}}$, donc si l'énergie totale est constante, l'énergie thermique aussi. Par $2\langle E_C \rangle = -U$, l'énergie potentielle est également constante.

Comme le cœur s'échauffe, la périphérie se refroidit. La surface de l'étoile se refroidit donc et prend une couleur rouge. Comme le cœur d'hélium se contracte, son énergie potentielle diminue. Donc, l'énergie potentielle de la périphérie augmente et l'étoile grossit. Elle devient une géante, donc une géante rouge, à cause de ce qui précède. Le processus inverse se produit quand l'hélium s'allume pour fusionner en carbone et oxygène. Le cœur se dilate et se refroidit, et la périphérie s'échauffe et se contracte.

La fusion de l'hydrogène se produit dans une enveloppe entourant le cœur d'hélium inerte. Mais comme l'hélium est très chaud, l'hydrogène est plus chaud qu'avant le stade de géante rouge et fusionne donc plus rapidement. On peut donc penser que l'énergie totale de l'étoile est en fait un peu plus grande qu'avant le stade de géante rouge, ce qui contribue à dilater encore plus l'enveloppe, donc à la refroidir encore plus. Les étoiles sont en effet, à cause du

théorème du viriel, des objets à capacité thermique négative. Augmenter l'énergie totale revient à diminuer l'énergie cinétique donc à diminuer la température.

Ce phénomène de grossissement et d'accélération de la fusion, donc d'augmentation du rayonnement totale de l'étoile se produit en fait graduellement pendant tout le cours de la vie de l'étoile pour les étoiles d'une masse inférieure à 2,5 fois celle du Soleil. Pour une masse supérieure, l'effondrement du cœur et le passage à l'état de géante rouge est brutal, ce qui explique *l'Hertzsprung gap*. Même quand elle est sur la séquence principale, l'étoile de masse inférieure à 2,5 masse solaire grossit. Il y a un milliard d'année, le soleil chauffait la Terre 5% de moins, et il y a 4 milliards d'années, 20% de moins. C'est grâce à la diminution progressive de la concentration en gaz carbonique, que la température moyenne de la Terre est restée à peu près constante pendant toute cette période. Le gaz carbonique est en effet recyclé par la tectonique des plaques qui décompose les carbonates en dioxyde de carbone. S'il fait plus chaud, le dégagement de gaz carbonique par les volcans ne change pas, mais le cycle de l'eau augmentant, le lessivage des silicates qui les transforme ainsi en carbonates en absorbant le gaz carbonique augmente, ce qui diminue le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère, donc l'effet de serre, donc la température.

Le même processus agit quand l'hélium brûle en déposant au centre de l'étoile un cœur inerte de carbone et d'oxygène. Mais l'étoile est encore plus grosse. C'est une supergéante rouge de rayon supérieur à 300 fois celui du Soleil.