

L'éternité

Des étoiles aux amas de galaxies, rien dans l'Univers n'est éternel. Sur des échelles de temps démesurément longues, tous les objets que nous connaissons finiront par disparaître dans le néant. Petite revue des scénarios possibles pour le très lointain futur.

L'énergie dont dispose une étoile au cours de son existence est proportionnelle à sa masse. Mais l'intensité des réactions nucléaires au sein d'une étoile augmente, elle, très rapidement avec sa masse, ce qui diminue d'autant sa durée de vie. Au final, ce sont les petites étoiles qui brillent le plus longtemps : bien qu'ayant moins d'énergie à leur disposition, elles en usent avec bien plus de parcimonie.

Les étoiles avant les planètes

L'espérance de vie des étoiles plus petites que le Soleil varie à peu près comme l'inverse du cube de leur masse : une étoile dix fois moins massive que le Soleil vivra environ 1 000 fois plus longtemps, soit 10 000 milliards d'années. Les plus petites étoiles possibles ayant une masse minimale d'environ sept pour cent de celle du Soleil (en deçà, les réactions de fusion ne perdurent pas), les dernières étoiles parmi celles qui brillent déjà aujourd'hui s'éteindront dans 10^{14} ans environ en se

transformant en naines blanches, qui se refroidiront lentement.

Dans l'intervalle – ou plus tard –, la plupart des étoiles auront perdu leur cortège planétaire. Les étoiles passent la majeure partie de leur existence à transformer de l'hydrogène en hélium. Les étoiles de plus d'un dixième de masse solaire entrent ensuite dans une seconde phase, où elles brûlent l'hélium pour le transformer en carbone. Durant ce stade, dit de géante rouge, leur taille augmente de façon considérable. Les planètes les plus proches de ces étoiles se feront ainsi engloutir lors de la phase de géante rouge. C'est ce qu'il adviendra de Mercure et Vénus, et peut-être de la Terre.

Les planètes plus distantes, ou celles en orbite autour d'étoiles de plus faible masse, ne connaîtront pas un sort plus enviable. Une planète éloignée est moins liée à son étoile, et donc plus susceptible d'être arrachée lors du passage proche d'un autre astre. À l'inverse, le sort d'une planète assez proche de son étoile (moins d'un cinquième de la distance de la Terre au

Soleil, ou unité astronomique) sera scellé par la gravitation elle-même. La théorie de la relativité générale prédit en effet que deux corps en orbite l'un autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles, sorte d'infimes vaguelettes de l'espace-temps, qui dissipent l'énergie du système. Cette émission d'ondes gravitationnelles provoque « l'usure » de l'orbite des deux corps, qui se rapprochent lentement, mais sûrement, et finissent par entrer en collision. Tel est le destin des planètes trop proches de leur étoile. Les calculs indiquent que dans 10^{16} ans tout au plus, c'en sera fini, d'une façon ou d'une autre, de tous les systèmes planétaires.

Existera-t-il d'autres générations d'étoiles après la fin de celles qui brillent aujourd'hui ? Probablement pas, car le taux de formation d'étoiles d'une galaxie

L'UNIVERS, AUJOURD'HUI PEUPLÉ d'innombrables galaxies comportant chacune des centaines de milliards d'étoiles (à gauche), finira peut-être totalement sombre et vide de toute matière (à droite).

10¹⁶ ANS

Les planètes sont englouties par leur étoile ou éjectées.

SO/L. Calçada, Pour la Science

10¹⁴ ANS

Mort des dernières étoiles formées dans les premières centaines de milliards d'années.

NASA, ESA et G. Bacon (STScI)

10¹⁹ ANS

Début de l'évaporation des galaxies.

ESO/IDA/Danish 1.5 m/R. Gendler, J.-E. Ovaldsen, C. C. Thöne
and C. Féron, *Pour la Science*

diminue de façon drastique au cours du temps. Alors que l'équivalent de 100 masses solaires par an se formaient dans notre Galaxie à ses débuts, elle ne produit désormais guère plus qu'une masse solaire par an, chiffre qui n'a guère de chances d'augmenter, sauf à l'occasion de collisions ponctuelles avec d'autres galaxies. Passés 10^{14} ans et la mort des dernières étoiles actuelles, il n'y aura donc quasiment plus de nouvelles étoiles. Tout au plus des couples de naines brunes (des étoiles avortées du fait de leur trop faible masse) pourront-ils fusionner de temps en temps en raison de l'usure de leur orbite par émission d'ondes gravitationnelles. Des naines brunes de 0,05 masse solaire chacune et initialement séparées de dix unités astronomiques mettront ainsi entre 10^{18} et 10^{19} ans à se rapprocher en spirale avant de fusionner et former une nouvelle étoile.

Les galaxies se dispersent

Une autre possibilité est que des naines brunes solitaires errant au hasard se rencontrent. Mais même si les naines brunes sont très nombreuses dans une galaxie (probablement plusieurs centaines de milliards), ces collisions resteront très rares. Dans des temps lointains, il n'y aura ainsi guère plus que quelques centaines d'étoiles simul-

tanément actives par galaxie, soit un milliard de fois moins qu'aujourd'hui. Mais cette phase durera longtemps : il faudra sans doute attendre 10^{22} ans pour que les collisions achèvent de transformer les dernières naines brunes en étoiles – lesquelles mourront à leur tour –, à supposer que les galaxies existent encore...

Car les galaxies non plus ne sont pas éternelles. Dans un premier temps, les galaxies proches fusionneront. C'est le destin qui attend la Voie lactée et sa voisine, la galaxie d'Andromède, dans quelques milliards ou dizaines de milliards d'années. Mais sur le long terme, les galaxies s'évaporeront.

Que les galaxies soient alors composées d'étoiles ou de résidus de l'évolution stellaire, les orbites de ces objets seront susceptibles d'être perturbées au gré de leurs rencontres rapprochées les uns avec les autres. Ces rencontres permettront à certains de ces astres d'acquiescer assez d'énergie pour s'échapper de leur galaxie hôte. Ainsi, au final, la majeure partie des objets constituant les galaxies s'en échappera, tandis que la petite part restante (moins de dix pour cent) formera un système bien plus compact, qui fusionnera à terme avec le trou noir supermassif probablement tapi au centre de chaque galaxie. Le temps caractéristique de ce processus est d'environ 10^{19} ans pour une galaxie comme la nôtre.

Toutefois, les galaxies obtiendront peut-être un sursis. En effet, tout porte à croire que l'essentiel de la masse d'une galaxie n'est pas constitué de matière ordinaire, mais de matière noire, mystérieuse forme de matière composée de particules n'ayant encore jamais été observées en laboratoire et qui se manifestent uniquement par leurs effets gravitationnels. La matière noire contribue à retenir les étoiles et autres objets au sein des galaxies, ralentissant d'autant l'évaporation de celles-ci. Selon les modèles les plus populaires, la matière noire est composée de particules stables, mais qui peuvent s'annihiler deux à deux. Ces annihilations sont vraisemblablement rares, du fait de la faible densité et de la faible capacité d'interaction de la matière noire. Néanmoins, le processus étant irréversible, et la matière noire étant confinée dans les structures qu'elle façonne, l'annihilation des particules finira par se produire tôt ou tard, laissant alors libre cours à la dislocation des galaxies.

Là encore, ce sera très long : même si la durée exacte est aujourd'hui impossible à déterminer, on peut estimer qu'il faudra au moins 10^{22} ans pour que la matière noire s'annihile, permettant alors l'évaporation complète de la galaxie si cela n'est pas déjà fait. Mais même dans le cas où ce serait bien plus long, une autre voie de disparition de la matière noire existe : en voyageant dans