

10¹⁶ ANS

**Les planètes sont englouties
par leur étoile ou éjectées.**

ESM 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-

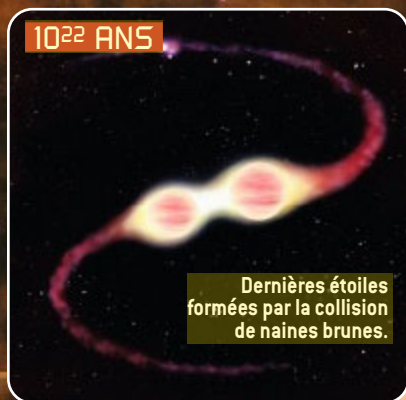
tanément actives par galaxie, soit un milliard de fois moins qu'aujourd'hui. Mais cette phase durera longtemps : il faudra sans doute attendre 10^{22} ans pour que les collisions achèvent de transformer les dernières naines brunes en étoiles – lesquelles mourront à leur tour –, à supposer que les galaxies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

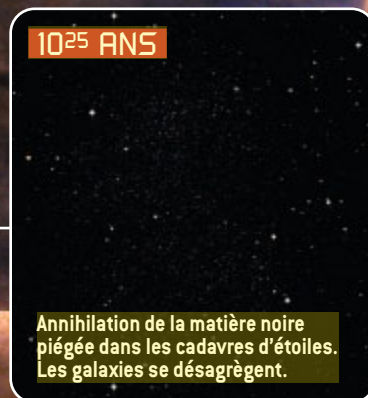
Que les galaxies soient alors composées d'étoiles ou de résidus de l'évolution stellaire, les orbites de ces objets seront susceptibles d'être perturbées au gré de leurs rencontres rapprochées les uns avec les autres. Ces rencontres permettront à certains de ces astres d'acquiescer assez d'énergie pour 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



ESO, G. Dama Barry, STSCL, Pour la Science



NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



Pour la Science

leur galaxie mourante, les éventuelles naines blanches et naines brunes captureront sur leur passage une infime partie de la matière noire. Peu à peu concentrée dans le cœur de ces cadavres stellaires, elle s'annihilera d'autant plus rapidement... mais il faut compter 10^{25} ans tout de même pour qu'elle disparaisse par ce biais (et que, par suite, les galaxies disparaissent aussi).

La vie telle que nous la connaissons demeure *a priori* possible tant que brillent des étoiles, c'est-à-dire pendant les 10^{14} ans de l'ère stellaire. Peut-elle se prolonger au-delà ? Il est difficile d'imaginer une source d'énergie pérenne et stable autre que les étoiles qui autorise un développement naturel de la vie. Mais peut-être une civilisation très avancée sera-t-elle en mesure de survivre à la mort de son étoile. Car même mort, un résidu stellaire peut produire une quantité considérable d'énergie.

Tel est le cas des trous noirs. Un faisceau d'observations suggère en effet que les trous noirs sont en rotation très rapide, et qu'une partie de leur énergie totale provient en fait de leur énergie cinétique de rotation. Or Roger Penrose a montré dans les années 1960 qu'il est théoriquement possible d'extraire l'énergie de rotation d'un trou noir, en s'approchant et en y «jetant» de la masse. Finalement, ce sont 42 pour cent de l'énergie de masse d'un trou noir qu'il serait potentiellement

possible de récupérer. Même s'il s'agit d'un simple trou noir de masse stellaire, cela équivaut à la puissance solaire reçue par la Terre pendant 10^{23} ans ! Mais des structures biologiques peuvent-elles subsister sur de telles échelles de temps ?

Les atomes meurent aussi

Sur le long terme, le devenir des résidus de l'évolution stellaire dépend de la stabilité de la matière. D'après le modèle standard de la physique des particules, l'électron et le proton sont parfaitement stables, et il existe au moins un élément, le fer 52, qui est parfaitement stable. La matière pourrait donc être, dans certains états, d'une absolue stabilité. Mais il semble établi aujourd'hui que le modèle standard n'est qu'une théorie valable à basse énergie, et qu'elle découle d'une théorie plus générale, encore à construire.

Ces théories dites de grande unification prédisent que le proton n'est pas stable et, par conséquent, qu'aucun atome ne l'est. Dans ce cadre, contrairement au modèle standard, les quarks, constituants du proton et du neutron, peuvent interagir pour former des leptons (particules non soumises à l'interaction forte). Le proton contient deux quarks *u*, de charge électrique $2/3$, et un quark *d*, de charge électrique $-1/3$. Une voie

L'AUTEUR



Alain RIAZUELO est astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris.