

10²² ANS

Dernières étoiles
formées par la collision
de naines brunes.

ESO, G. Dana Barry, STSCI, Pour la Science

10²⁵ ANS

Annihilation de la matière noire
piégée dans les cadavres d'étoiles.
Les galaxies se désagrègent.

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

10²² ANS

Début de l'annihilation
spontanée de la matière noire.

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 10²⁵ 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 10¹⁴ 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 10²³ ans ! Mais des structures biologiques peuvent-elles subsister sur de telles échelles de temps ?

Les atomes meurent aussi

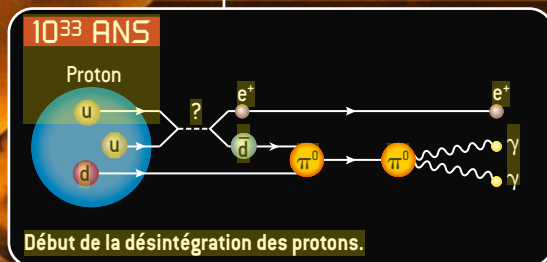
Sur le long terme, le devenir des résidus de l'évolution stellaire dépend de la stabilité de la matière. D'après le modèle standard de la physique des particules, l'électron et le proton sont parfaitement stables, et il existe au moins un élément, le fer 52, qui est parfaitement stable. La matière pourrait 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.



Le temps (presque) absolu de la cosmologie

✓ On a pour habitude de dire que l'Univers est âgé de 13,7 milliards d'années. Mais la théorie de la relativité nous a appris que le temps est différent pour chaque observateur et que parler de temps universel n'a pas de sens. Qu'en est-il alors de ce « temps cosmique » ?

L'Univers est, à grande échelle, homogène et isotrope. Cela signifie que tous les points sont équivalents, et en particulier que le temps s'y écoule partout de la même façon. De ce fait, d'hypothétiques horloges mises en route peu après le Big Bang et emportées par la suite avec la matière dans l'expansion resteraient aujourd'hui encore synchronisées de façon remarquable (les écarts atteindraient quelques centaines de milliers d'années au plus). En d'autres termes, le temps cosmique est une extension de notre temps propre à l'échelle de l'Univers, autorisée par l'homogénéité de celui-ci dans nos modèles cosmologiques.

de désintégration possible est l'annihilation des deux quarks u en un positron (c'est-à-dire un anti-électron) et un antiquark $\bar{d}$. Cet antiquark s'associe au quark d restant pour former une particule nommée pion, qui se désintègre très vite en deux photons. Finalement, le proton se désintègre en quelques photons et un positron, lequel pourra s'annihiler avec un électron du voisinage.

Une autre voie de désintégration implique la production d'un antimuon (μ^-). La désintégration du proton n'a pour l'heure jamais été mise en évidence. Les estimations de la durée de vie du proton sont donc des limites inférieures, qui vont de 10^{29} à 10^{32} ans, selon le type de désintégration attendu.

Mais ces limites ne sont guère contraignantes, car la durée de vie du proton est probablement plus longue. Elle est en effet déterminée par la masse d'une particule intermédiaire aujourd'hui inconnue qui intervient dans ce type de désintégration, et la durée de vie est d'autant plus grande que cette particule est massive. La durée de vie du proton pourrait ainsi atteindre 10^{49} ans si ce médiateur est très massif. Un autre scénario faisant intervenir non plus une, mais trois particules médiatrices, suggère même une durée de vie de 10^{200} ans. Il semble cependant moins plausible.

Quoi qu'il en soit, lorsque tous les protons se seront désintégrés, toute forme de matière ordinaire hormis les élec-

trons, les positrons et les neutrinos aura disparu. Seuls subsisteront les trous noirs résultant de l'évolution des étoiles, ou leurs homologues supermassifs issus du centre des galaxies. Soulignons que les photons étant sans masse, leur fréquence est décalée vers le rouge par l'expansion et ils perdent donc de l'énergie ; ils représentent vite une énergie totalement négligeable comparée à celle du reste de la matière.

Les trous noirs s'évaporent

Du point de vue de la relativité générale, les trous noirs sont des objets d'une absolue stabilité. Mais Stephen Hawking a montré en 1974 qu'à cause des effets quantiques, les trous noirs émettent un très faible rayonnement – principalement des photons ou des neutrinos –, qui dissipe ainsi lentement, mais sûrement leur énergie. Cette évaporation des trous noirs est paradoxalement mieux établie, du point de vue théorique, que la durée de vie du proton. Le taux d'évaporation est d'autant plus élevé que la masse du trou noir est petite. Il faut ainsi 10^{65} ans pour qu'un trou noir d'une masse solaire s'évapore, et environ 10^{100} ans pour que les trous noirs supermassifs subissent le même sort.

Dans ce futur extraordinairement lointain, quand les trous noirs et la matière