

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

Évolution si le proton
est instable

Évolution si le proton
est stable

10¹⁰⁰ ANS

Fin de l'évaporation
des trous noirs supermassifs.

10⁷⁹³ ANS

La dernière structure subsistant,
le positronium, finit par disparaître.

ordinaire auront fini par disparaître, il est possible que subsistent d'ultimes structures. En effet, il se pourrait que les électrons et positrons se combinent deux à deux pour former des positroniums, sorte d'atomes d'hydrogène où un positron remplace le proton. À notre échelle, le positronium a une courte durée de vie, mais si l'expansion de l'Univers ralentit son rythme, de telle façon que la densité d'électrons et de positrons ne diminue pas trop vite, des électrons et des positrons plus distants que le diamètre de l'Univers observable actuel pourraient se lier pour former du positronium d'autant plus stable que ses constituants sont distants. Selon la durée de vie du proton, ces positroniums perdureront 10¹⁴¹ à 10⁷⁹³ ans, et survivront donc à la fin des atomes et des trous noirs. Ce sera l'ultime structure résiduelle du cosmos. Mais les positrons et les électrons seront voués à lentement se rapprocher pour finalement s'annihiler en photons.

Les cailloux sont éternels

Tel est le scénario si le proton est instable à long terme. Mais que se passera-t-il si la matière ordinaire se révèle parfaitement stable? Dans cette hypothèse, outre les résidus de l'évolution stellaire (naines blanches, naines brunes ou étoiles à neu-

trons), tous les objets de petite taille (poussières, astéroïdes, comètes...) seront alors plus stables que les trous noirs. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils cesseront d'évoluer. Au fil du temps, la matière ordinaire se refroidira quasiment jusqu'au zéro

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES À TEMPÉRATURE NULLE
transformeront toute matière en fer à l'échelle de 10¹⁵⁰⁰ ans, bien plus que l'espérance de vie des plus gros trous noirs.

absolu. Mais même au zéro absolu, la matière n'est pas figée, car, en vertu des lois de la physique quantique, et notamment du principe d'incertitude d'Heisenberg, l'état d'énergie minimale d'un système n'a pas une énergie nulle.

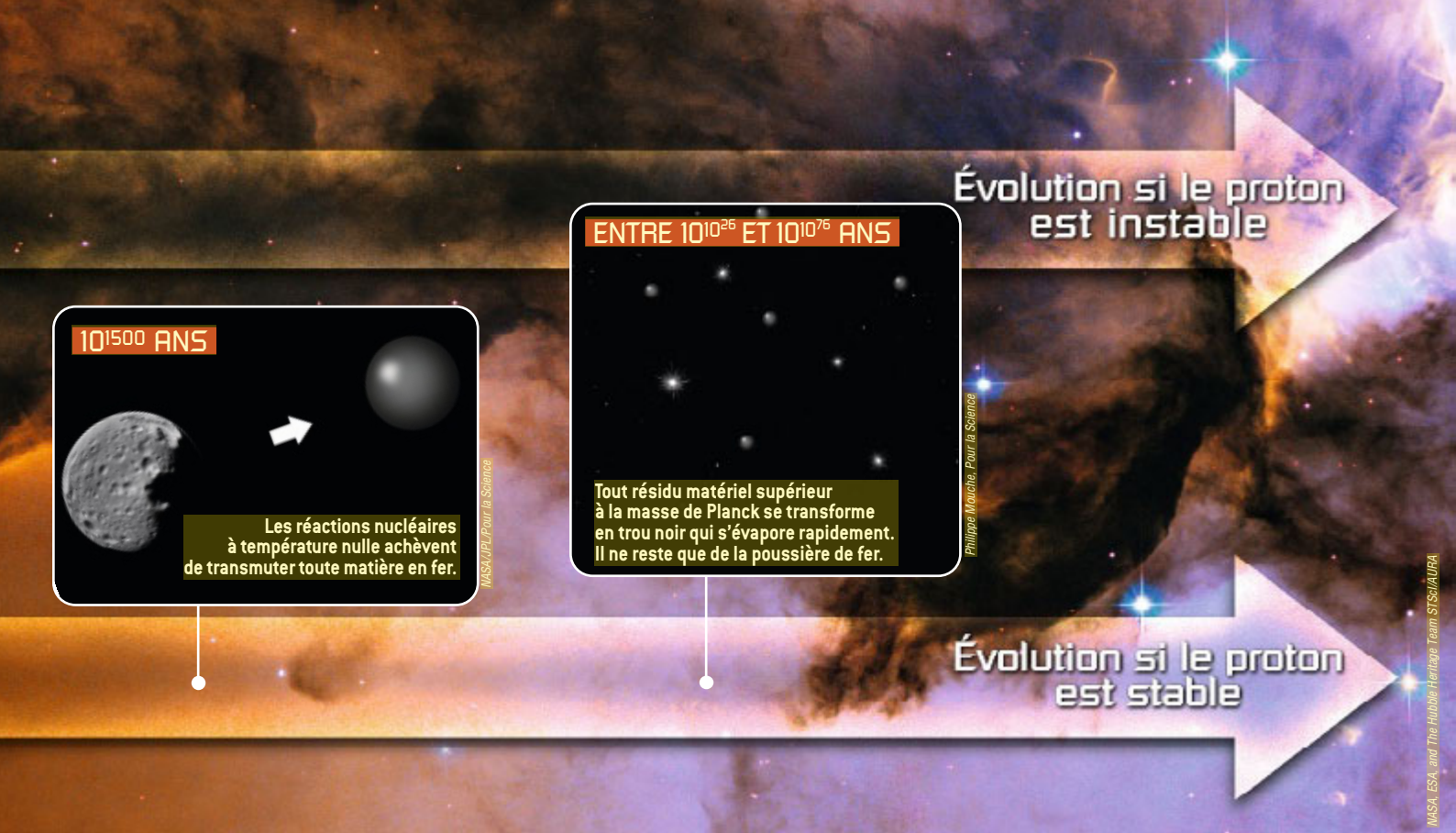
Au gré des fluctuations quantiques, lentement mais sûrement, les atomes d'un objet résiduel se déplaceront les uns par rapport aux autres. Sur des échelles de temps suffisamment longues, un solide se comporte en fait comme un liquide très visqueux. Le temps caractéristique de ce processus dépend de façon exponentielle de la masse des atomes en jeu. Pour le fer, le plus lourd des éléments abondants, il atteint 10⁶⁵ ans. À cette échelle de temps, tout objet, quelle que soit sa masse, se réorganisera lentement sous l'effet de sa pro-

pre gravité et acquerra, si ce n'est pas déjà le cas, une forme sphérique. Astéroïdes, comètes, rochers, poussières, tout finira par ressembler à une sphère.

Mais les transformations à l'œuvre au sein de la matière ne seront pas achevées.

Car si deux atomes peuvent bouger même à température nulle, rien n'empêche également deux noyaux atomiques de se rapprocher, voire de vaincre leur répulsion électrostatique. Il suffit pour cela... d'attendre assez longtemps. Ainsi, à des échelles de temps colossales, la matière froide sera encore le théâtre de réactions nucléaires! Le noyau atomique le plus stable étant le fer, ces réactions presque infiniment lentes de fusion ou de fission auront tendance à tout transmuter en fer. Ce sera réalisé en quelque 10¹⁵⁰⁰ ans, bien plus que l'espérance de vie des plus gros trous noirs.

L'Univers sera alors un lieu immensément froid et vide où erreront des boules de fer de toutes tailles. Ce n'est toujours pas la fin de l'histoire. Un cristal d'atomes de fer n'est pas l'état de plus basse



Évolution si le proton
est instable

ENTRE $10^{10^{26}}$ ET $10^{10^{76}}$ ANS

Tout résidu matériel supérieur
à la masse de Planck se transforme
en trou noir qui s'évapore rapidement.
Il ne reste que de la poussière de fer.

Philippe Mauché, Pour la Science

Évolution si le proton
est stable

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team STS/AURA

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Krauss et R. Scherrer,
La fin de la cosmologie,
Pour la Science, n° 368, juin 2008.
<http://bit.ly/pls368-fin-cosmo>

L. Krauss et R. Scherrer,
**The return of a static universe
and the end of cosmology**,
General Relativity and Gravitation,
vol. 39, pp. 1545-1550, 2007.
<http://fr.arxiv.org/abs/0704.0221>

F. Adams et G. Laughlin,
**A dying universe : The long term
fate and evolution of astrophysical
objects**, *Review of Modern Physics*,
vol. 69, pp. 337-372, 1997.
[http://fr.arxiv.org/abs/
astro-ph/9701131](http://fr.arxiv.org/abs/astro-ph/9701131)

D. A. Dicus *et al.*, **Effects of proton
decay on the cosmological future**,
Astrophysical Journal,
vol. 252, pp. 1-9, 1982.
[http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/
1982ApJ...252....1D](http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1982ApJ...252....1D)

F. Dyson, **Time without end :
Physics and biology in an open
universe**, *Reviews of Modern
Physics*, vol. 51, pp. 447-460, 1979.
[http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/
1979RvMP...51..447D](http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1979RvMP...51..447D)

énergie de la matière. Pour les objets assez massifs (au-delà de 0,3 masse solaire), notamment les naines blanches, devenues des naines noires de fer en refroidissant, il existe une configuration plus compacte et d'énergie plus basse : les étoiles à neutrons. Ces dernières sont des boules principalement composées de neutrons stabilisés par la gravité (s'il se désintégraient en électrons et protons, ceux-ci se recombineraient immédiatement, car plusieurs électrons, comprimés par la gravité, ne peuvent occuper le même état quantique).

Là encore, le principe d'incertitude n'interdit pas que les 10^{56} ou 10^{57} atomes d'une naine noire, en principe répartis dans un rayon de quelques milliers de kilomètres, se retrouvent à un moment donné confinés dans une boule d'une vingtaine de kilomètres de diamètre. La naine noire s'effondrera alors en étoile à neutrons, en dissipant son énergie en une ultime bouffée de rayons X et de neutrinos. Mais ces événements seront rarissimes : le temps caractéristique d'effondrement d'une naine noire en une étoile à neutrons est estimé à... $10^{10^{76}}$ ans, un nombre presque unimaginable, dont le nombre de chiffres dépasse le nombre d'atomes contenus dans plusieurs dizaines de millions de galaxies !

Suivant le même processus, mais plus rapidement, une étoile à neutrons rési-

duelle s'effondrera à son tour en partie en un trou noir, qui se chargera alors d'engloutir assez vite le reste de l'étoile. En fait, il ne sera sans doute pas nécessaire d'attendre que les naines noires s'effondrent en étoiles à neutrons, car une petite portion d'une naine noire peut s'effondrer directement en trou noir.

Vestige ultime : de la poussière de fer

La principale difficulté est de savoir quelle est la masse minimale du trou noir ainsi formé qui permette d'accréter le reste du cadavre stellaire. Les plus petits trous noirs, de la masse de Planck (20 microgrammes), se forment en $10^{10^{26}}$ ans, mais ils s'évaporent trop vite pour faire leur œuvre. La masse minimale d'un trou noir qui finit par engloutir l'objet qui lui a donné naissance est sans doute comprise entre quelques kilogrammes et quelques milliards de tonnes, ce qui demande d'attendre un temps compris entre $10^{10^{38}}$ et $10^{10^{56}}$ années pour les voir se former. Il semble qu'après cela, c'en sera définitivement fini de l'évolution de l'Univers. Subsisteront encore des agrégats de fer trop petits pour se transformer en trou noir. Virtuellement indestructibles, ce seront les ultimes vestiges du monde tel que nous le connaissons. ■

Des livres à offrir ou à s'offrir

Nouveauté

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Dans ce livre, on découvre comment les mathématiciens de l'École de Moscou, inspirés par la secte hérétique orthodoxe de l'Adoration du Nom, finissent par croire à l'existence des infinis de la théorie des ensembles qu'avaient commencé à explorer des mathématiciens français.

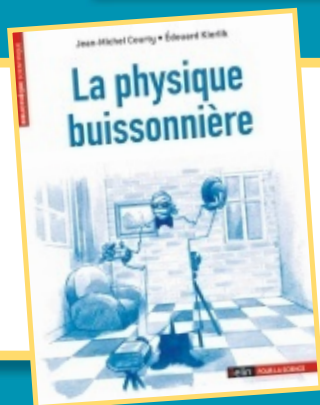
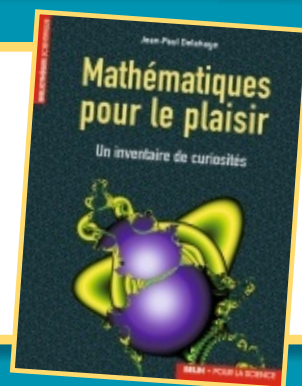
Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

075107 • 288 pages • 24 euros

Les mathématiques sont faciles et s'y adonner est un plaisir. Les arts géométriques, les jeux de cartes, les jeux avec des dominos ou des damiers, la vie sociale et politique et ses subtiles stratégies, toutes ces activités sont mathématiques et souvent procurent des satisfactions... même à ceux qui clament ne pas aimer les mathématiques et y être « nuls ».

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique.

075104 • 208 pages • 25 euros



Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus.

Passionnés de physique et curieux de sciences, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé. Retrouvez les meilleures de leurs chroniques parues dans *Pour la Science*.

Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

075105 • 160 pages • 22 euros

Aujourd'hui, la géologie, c'est la théorie de la tectonique des plaques, mais c'est aussi l'histoire de la Terre, son économie, ses ressources (pétrole, minerais, eau), ses humeurs (catastrophes naturelles), etc. Le passé, le présent et l'avenir de la Terre ne peuvent être examinés que par la géologie.

Découvrez cet ouvrage très illustré rédigé par Claude Allègre, ancien directeur de l'Institut de physique du Globe, et son collègue et ami René Dars.

075102 • 304 pages • 35 euros

