

MODIFIER LE PASSÉ EST SOURCE DE PARADOXES TEMPORELS

LE « PARADOXE ULTIME » apparaît quand des personnes ou des objets peuvent remonter le temps et modifier le passé. Une version simplifiée met en jeu des boules de billard. Une boule de billard passe dans un trou de ver faisant office de machine à remonter le temps. En émergeant, elle frappe la version antérieure d'elle-même, ce qui l'empêche de rentrer dans le trou de ver.



LA RÉOLUTION DE CE PARADOXE repose sur un fait simple : la boule de billard doit respecter la logique et les lois de la physique. Elle ne peut pas traverser le trou de ver d'une façon qui l'empêchera de le traverser (à nouveau). Mais elle peut le faire d'une infinité d'autres façons.



Philip Howe

note les détails, revient à son année de départ et enseigne le théorème à un étudiant, qui le rédige alors. L'article est, évidemment, celui-là même que le voyageur a lu. Une question se pose alors : d'où est venue l'idée du théorème ? Pas du voyageur temporel, puisqu'il a lu le théorème, mais pas non plus de l'étudiant, qui l'a appris du voyageur temporel. L'idée aurait surgi de nulle part, sans raison.

Protéger la chronologie

Ces conséquences insolites du voyage dans le temps ont conduit certains scientifiques à en rejeter la notion. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, a proposé une « conjecture de protection de la chronologie », qui interdirait les boucles causales... et les voyages dans le temps. Comme la théorie de la relativité autorise les boucles causales, la protection de la chronologie nécessiterait l'intervention d'un autre facteur pour empêcher le retour dans le passé. Quel serait ce facteur ?

Les processus quantiques pourraient offrir une solution. L'existence d'une machine à voyager dans le temps permettrait aux particules de revenir par boucle

dans leur passé. Les calculs suggèrent que les perturbations qui suivraient s'auto-renforceraient, créant une vague d'énergie incontrôlable détruisant le trou de ver.

La protection de la chronologie n'est pour le moment qu'une conjecture, et le voyage dans le temps reste une possibilité. Pour résoudre la question, il faudrait réussir à unifier la mécanique quantique et la gravitation, peut-être avec une théorie telle celle des cordes ou ses extensions. Il est même envisageable d'obtenir une preuve expérimentale des voyages temporels dans les années à venir ; le nouvel accélérateur de particules de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), le LHC (*Large Hadron Collider*), serait capable de créer des trous de ver microscopiques, si certaines nouvelles théories sur la gravitation sont avérées. Même si ces trous de ver disparaissaient aussi vite qu'ils sont apparus, ils survivraient suffisamment longtemps pour que les particules exécutent d'éphémères boucles causales. On serait encore loin de la machine à voyager dans le temps de H. G. Wells, mais cela modifierait à jamais notre représentation de la réalité physique. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Davies, *Comment construire une machine à explorer le temps ?*, EDP Sciences, 2007.

J. R. Gott III, *Time travel in Einstein's universe : the physical possibilities of travel through time*, Houghton Mifflin, 2001.

K. S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps : L'héritage sulfureux d'Einstein*, Flammarion, 2001.

L. Ford et T. Roman, *L'énergie négative*, *Pour la Science* n° 271, mai 2000.

P. J. Nahin, *Time machines : time travel in physics, metaphysics, and science fiction*, American Institute of Physics, 1993.

L'Univers aux limites de

Alain Riazuelo

L'ESSENTIEL

✓ L'expansion cosmique dilue le contenu de l'Univers. Mais que va-t-il advenir à long terme des objets qui le peuplent ?

✓ Les étoiles et les planètes s'effaceront d'abord, avant que les galaxies ne se dispersent. Plus tard, les trous noirs eux-mêmes s'évaporeront.

✓ À très long terme, la matière pourrait se désintégrer entièrement.

✓ Autre possibilité : sur des échelles de temps incommensurables, seuls de petits agrégats de fer stables subsisteraient.

À première vue, l'histoire de l'Univers est bien connue. Les observations actuelles nous révèlent que l'Univers est en expansion, et qu'il était plus dense et plus chaud par le passé. Il est issu d'une phase extraordinairement dense et chaude, il y a environ 13,7 milliards d'années : le Big Bang. Les différentes observations astronomiques permettent de détailler la plupart des étapes de ce scénario avec une remarquable précision.

Moins d'une seconde après le Big Bang, l'antimatière avait disparu. Dans les trois minutes suivantes furent synthétisés les premiers noyaux atomiques qui, 380 000 ans plus tard, capturèrent les électrons pour former les premiers atomes. Quelques dizaines de millions d'années plus tard, les premières étoiles s'allumèrent. Puis ce fut le tour de notre Galaxie, qui s'est formée il y a environ dix milliards d'années, suivie par le Soleil il y a 4,5 milliards d'années. La vie unicellulaire apparut 700 millions d'années plus tard, puis la vie évoluée, les dinosaures, les mammifères, et enfin l'homme.

Fin de l'histoire ? Pas vraiment. Car l'Univers a encore de beaux jours – ou plutôt une longue nuit – devant lui. L'une des grandes questions de la cosmologie est celle du devenir de l'expansion de l'Univers. Selon les propriétés de son contenu matériel, les modèles indiquent que l'expansion cosmique se poursuivra indéfiniment ou au contraire s'arrêtera et cédera la place à une phase de contraction aboutissant à un « Big Crunch », sorte de Big Bang à l'envers.

Les observations actuelles indiquent que l'Univers est majoritairement rempli d'une forme mystérieuse de matière, l'énergie sombre, qui provoque une accélération de l'expansion cosmique. Ainsi, tout porte à croire que l'expansion se poursuivra indéfiniment, si tant est que les propriétés de l'énergie sombre ne changent pas dans le futur. C'est dans ce cadre que nous allons passer en revue ce que pourraient être les événements marquants de l'histoire de l'Univers à très long terme.

Quelques dizaines ou centaines de millions d'années après le Big Bang, les premières étoiles ont illuminé le cosmos.

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).

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

NASA, ESA et G. Bacon (STScI)

10¹⁶ ANSLes planètes sont englouties
par leur étoile ou éjectées.

ESO/L. Calçada, Pour la Science

10¹⁹ ANSDébut de l'évaporation
des galaxies.ESO/D.A. Dunish, 1,5 mR. Gaudier, J.-E. Ovalsen, C. C. Thörn
and C. Feron, 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 10¹⁴ 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 10¹⁸ et 10¹⁹ 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 10²² 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'acquérir 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 10¹⁹ 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 10²² 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



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

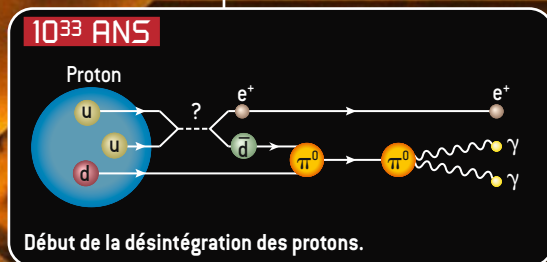
Sur le long terme, le devenir des résidus de l'évolution stellaire dépend de la stabilité de la matière. D'après le modèle standard de la physique des particules, l'électron et le proton sont parfaitement stables, et il existe au moins un élément, le fer 52, qui est parfaitement stable. La matière pourrait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

Évolution si le proton
est instable

10¹⁰⁰ ANS

Fin de l'évaporation
des trous noirs supermassifs.

10⁷⁹³ ANS

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

Évolution si le proton
est stable

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

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.

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-

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

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.

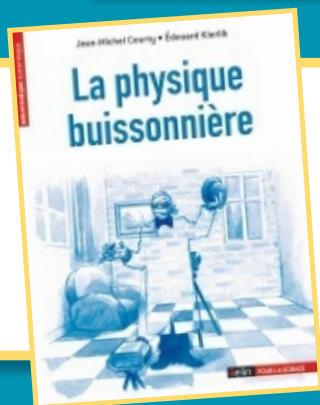
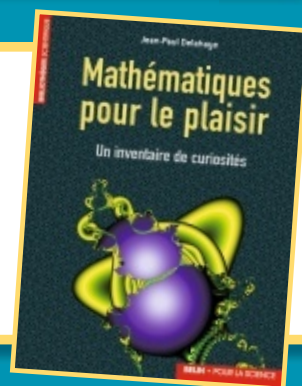
Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

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

