

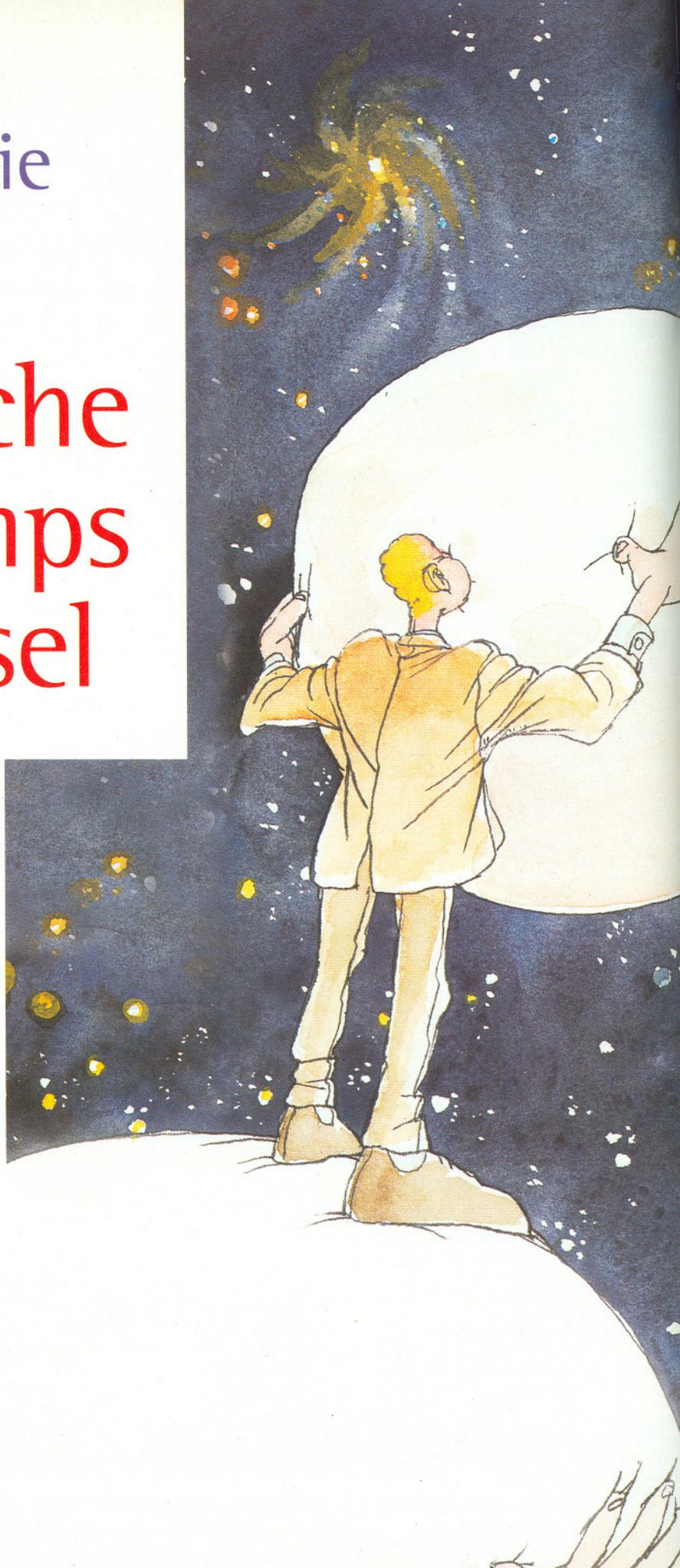
Cosmologie

À la recherche du temps universel

Lorsque deux observateurs se déplacent très vite l'un par rapport à l'autre, une année pour l'un peut valoir seulement une minute pour l'autre. Comment dès lors s'entendre sur un âge précis de l'Univers ? Comment au juste peut-on dire que celui-ci est né voilà quinze milliards d'années ? Le rayonnement de fond cosmologique, le fameux 3 K, fournit une réponse.

Stéphane Durand, physicien théoricien,
université de Montréal

LA théorie de la relativité nous a appris que le temps est une grandeur élastique : la vitesse et la gravité affectent son écoulement. Même si cet effet n'est pas apparent dans la vie de tous les jours, il peut devenir très important lorsque les vitesses ou les masses en jeu sont considérables. Comme dans le célèbre exemple des





quotidien, il a été rigoureusement vérifié à l'aide d'horloges atomiques précises au milliardième de seconde près et embarquées à bord d'avions. De même, le ralentissement du temps devient manifeste dans les immenses accélérateurs de particules, où celles-ci voyagent à des vitesses pratiquement égales à celle de la lumière. Par exemple, le temps de vie des muons (des sortes d'électrons lourds et instables) est trente fois

Une horloge, placée aux abords immédiats d'un trou noir, ralentit

plus long quand ils sont en mouvement que quand ils sont au repos. Manifestement donc, le temps peut ralentir. Et ce temps élastique n'est pas qu'un simple temps abstrait ; c'est le temps physique, celui qui contrôle le vieillissement de nos corps — deux personnes peuvent bel et bien vieillir à des rythmes différents.

Un effet similaire est provoqué par la gravité. En effet, un champ gravitationnel ralentit le temps, et ce d'autant plus efficacement qu'il est intense. Ainsi, le temps d'un observateur se trouvant aux abords immédiats d'un trou noir s'écoulera

jumeaux, où l'un part en fusée animée d'une très grande vitesse, et constate à son retour que le temps s'est écoulé pour lui beaucoup moins vite que pour son frère resté à terre...

Pour que ce ralentissement du temps soit manifeste, il faut bien sûr que la vitesse en question soit élevée, égale au moins à un dixième de celle de la lumière. Lumière qui voyage à la vitesse record de 300 000 km/s — elle parcourt ainsi la distance Montréal-

Paris en un soixantième de seconde ; en une seconde, elle fait environ sept fois le tour de la Terre. Or les plus rapides des fusées actuelles voyagent seulement à un dix-millième de la vitesse de la lumière, ce qui explique que les effets du ralentissement du temps ne nous soient pas perceptibles. Ainsi, des astronautes faisant l'aller-retour Terre-Lune ne "gagneront" qu'une infime fraction de seconde sur nous. Même si cet effet est négligeable au

beaucoup moins vite que celui d'un observateur resté prudemment au loin. On pourrait d'ailleurs transposer nos jumeaux dans ce nouveau contexte, en supposant que le voyageur, au lieu d'effectuer un périple à très grande vitesse, séjourne quelque temps aux environs d'un trou noir. Là encore, il serait à son retour sur Terre beaucoup plus jeune que son frère resté sagement à la maison. Bien sûr, la gravité terrestre étant très faible, le ralentissement

Le temps cosmique, d'instant en instant

Le temps cosmique est en quelque sorte le temps "intrinsèque" de l'Univers. Mais une question vient vite à l'esprit : son écoulement est-il constant dans le temps ? Autrement dit, le temps cosmique, qui est le même d'un endroit à l'autre à un instant donné, est-il aussi le même d'instant en instant ? Malheureusement, cette question ne semble pas avoir de sens dans le contexte de la relativité générale. Bien sûr, elle peut sembler importante (car si l'écoulement du temps cosmique n'est pas constant, cela fausse d'une certaine façon l'âge de l'Univers), mais pour lui donner un sens, il faut pouvoir comparer l'écoulement du temps à deux moments différents. Mais comment faire, sachant que si le temps cosmique ralentit, toutes les horloges,

tous les processus physiques et mécaniques ralentiront de la même façon ? Au contraire, dire qu'un champ gravitationnel ralentit le temps a un sens précis car on peut comparer le temps d'une horloge dans ce champ avec celui d'une horloge hors du champ. Pour comparer le temps cosmique à deux instants différents, il faudrait un "autre" temps de référence, par exemple un temps "extérieur" à notre Univers ou non affecté par son expansion. Ainsi, que la question n'ait pas de sens dans le cadre de la relativité générale ne signifie pas qu'elle n'ait pas de sens dans un contexte plus large. Dans le cadre d'une théorie à univers multiples, par exemple, où l'on pourrait imaginer de comparer le temps cosmique d'un univers avec celui d'un autre.

gravitationnel du temps n'est pas plus perceptible que le précédent dans la vie de tous les jours. Même si l'on vieillit effectivement moins vite au premier étage d'un gratte-ciel qu'au dernier, la différence est insignifiante (mais elle a tout de même été vérifiée expérimentalement à l'aide d'horloges atomiques embarquées à bord d'hélicoptères).

Mouvements propres, expansion : tout bouge dans l'Univers

Si l'écoulement du temps dépend de notre mouvement ainsi que de la proximité ou non d'un champ de gravité, quel temps dès lors faut-il choisir pour calculer l'âge de l'Univers ? Par rapport à quoi mesurer son histoire ? Il est facile d'éliminer les effets gravitationnels. Il suffit de considérer l'écoulement du temps loin de tout corps céleste imposant. En effet, il est naturel de considérer que le temps "global" de l'Univers est celui qui n'est pas affecté localement par la présence de matière. Mais comment éliminer les effets dus au mouvement ? En se mettant au repos, direz-vous. D'accord, mais au repos par rapport à quoi ? Même immobile chez vous, vous filez déjà à 30 km/s : c'est la vitesse à laquelle la Terre tourne autour du Soleil. Pire : le Système solaire lui-même est en mouvement autour du centre de la Galaxie, à la vitesse de 230 km/s environ.

Pire encore : la Galaxie est elle-même en mouvement. Elle se déplace par rapport aux autres galaxies de son amas, le Groupe local. Et finalement, cet amas lui-même est en mouvement du fait de l'expansion cosmique. Dès lors, à quoi correspond l'état de "repos naturel" ? Imaginons des coccinelles posées sur la surface d'un ballon en train de gonfler. La surface du ballon représente l'espace en expansion et les coccinelles⁽¹⁾ symbolisent les galaxies (ou les amas de galaxies). Celles-ci ont deux types de mouvement très différents : un mouvement par rapport à la surface — elles peuvent tourner sur elles-mêmes ou marcher — et un mouvement dû à l'éirement de la surface. À petite échelle, il peut ainsi arriver que deux voisines se rapprochent si elles marchent assez vite l'une vers l'autre (comme la galaxie d'Andromède se rapproche de nous, en quelque sorte). À grande échelle, en revanche, le mouvement général d'expansion l'emporte sur le mouvement local de chacune : les coccinelles s'éloignent les unes des autres...

À quoi correspond dans cet exemple l'état de repos naturel ? À une immobilité par rapport à la surface : pas de rotation, ni de marche. Une coccinelle dans cet état sera au repos par rapport à l'expansion de l'espace. (Notez que deux coccinelles immobiles relativement à la surface sont quand même en mouvement l'une par rapport à l'autre à cause de l'expansion du ballon.) Revenons à présent à notre galaxie. Nous savons qu'elle est en mouvement par rapport à ses voisines, mais nous est-il possible de différencier ses deux

types de mouvement : son mouvement propre par rapport à l'espace et son mouvement dû à l'expansion de l'espace ? La réponse est oui : grâce au rayonnement de fond cosmologique.

Ce rayonnement qui baigne tout l'Univers est l'écho lumineux du big bang.



Nous pouvons le mesurer très précisément aujourd'hui, et même déterminer notre vitesse par rapport à lui. D'après la théorie du big bang, il devrait être parfaitement uniforme dans toutes les directions. Or, ce n'est pas tout à fait ce que nous mesurons. Il est un peu plus chaud dans une certaine direction. Pourquoi ? Parce que nous nous déplaçons dans cette direction. Lorsque nous courons sous la pluie, nous recevons davantage de gouttes sur l'avant de notre corps que sur l'arrière. Plus précisément, nous recevons davantage de gouttes à la seconde sur l'avant que sur l'arrière. Autrement dit, la fréquence des gouttes est plus grande vers l'avant. Or, pour un rayonnement, qui dit fréquence plus élevée, dit énergie de vibration plus grande, et donc température plus haute. (Par exemple, la fréquence de la couleur bleue étant plus importante que celle du rouge, la partie bleue d'une flamme est plus chaude que



l'expansion de l'Univers, ils seraient tous au repos par rapport au rayonnement de fond, c'est-à-dire par rapport au mouvement général d'expansion. Par conséquent, tous s'entendraient sur l'histoire de l'Univers. Ils dateraient exactement de la même façon tous les événements. Leurs horloges indiqueraient le même *temps cosmique* (ou cosmologique), une sorte de temps universel ⁽³⁾. Du point de vue de l'évolution cosmique, ce temps cosmique est donc privilégié. C'est d'ailleurs lui qui apparaît dans les équations d'Einstein lorsque, par exemple, on porte sur un graphique l'évolution du rayon de l'Univers en fonction du temps pour discuter de son destin — expansion sans fin ou recontraction ? À noter qu'on ne peut le définir que si l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire si l'expansion est en quelque sorte uniforme dans toutes les directions (ou, pour le dire encore autrement, si la courbure de l'Univers est constante, comme la surface du ballon).

Puisque la Terre se déplace seulement à environ un millième de la vitesse de la lumière (370 km/s *versus* 300 000 km/s) par rapport au rayonnement de fond, la différence entre le temps terrestre et le temps cosmique est minime : 24 s par an ! Autrement dit, lorsque nous exprimons l'âge de l'Univers en fonction de notre temps terrestre, nous ne faisons qu'une erreur d'environ 10 000 ans sur quinze milliards d'années, c'est-à-dire une erreur d'une partie par million. Ce qui est bien sûr tout à fait négligeable... ■

(1) Pour représenter le comportement des galaxies dans un Univers en expansion, on utilise souvent l'analogie des points dessinés sur la surface d'un ballon. Mais l'image des coccinelles est meilleure. D'abord parce qu'elle permet de représenter le mouvement local des galaxies, contrairement aux points qui sont fixes sur la surface. Ensuite parce que les points grossissent avec l'expansion de la surface. Ce qui n'est pas le cas pour les galaxies, où les forces de cohésion gravitationnelle sont de loin supérieures à la force d'expansion.

(2) Cette vitesse de 370 km/s ($369 \pm 1,5$ km/s exactement) correspond en réalité à celle du Soleil par rapport au rayonnement de fond cosmologique. Puisque la Terre tourne autour du Soleil à 30 km/s en changeant de direction, sa vitesse par rapport au rayonnement de fond cosmologique varie au cours de l'année de ± 30 km/s. Elle est donc de 340 à 400 km/s selon les saisons.

(3) Il faut remarquer qu'aucune horloge ne peut indiquer un temps plus grand que le temps cosmique et, donc, que l'âge de l'Univers. En effet, celles qui ne mesurent pas ce temps cosmique (soit qu'elles sont en mouvement par rapport au rayonnement de fond, soit qu'elles sont affectées par un champ gravitationnel) retardent toujours par rapport à celles qui le mesurent.

la rouge.)
Nous mesurons ainsi un rayonnement plus chaud — plus bleu — dans une direction, et plus rouge dans la direction opposée. Étant donné la précision de ces mesures, on peut calculer que nous nous déplaçons à 370 km/s par rapport à ce rayonnement — c'est la vitesse de la Terre résultant de la superposition de toutes les vitesses énumérées plus haut ⁽²⁾. Soit, pour un observateur se déplaçant en sens inverse à 370 km/s relativement à la Terre, le rayonnement apparaîtrait parfaitement uniforme. Cet observateur mesurerait une fréquence identique dans toutes les directions. Il serait donc au repos par rapport au rayonnement de fond, c'est-à-dire par rapport à l'expansion de l'Uni-

vers (ou encore, pour en revenir à nos coccinelles, au repos par rapport à la surface du ballon).

Ainsi, quel que soit l'endroit où l'on se trouve dans l'Univers, il existe un tel état de mouvement (ou "référentiel") privilégié, immobile par rapport au rayonnement de fond. Imaginons maintenant toute une série d'observateurs placés dans ces référentiels, disséminés à travers le cosmos. Bien qu'en mouvement les uns par rapport aux autres du fait de