

LA COSMOLOGIE EN 10 QUESTIONS

Marc Séguin,
Collège de Maisonneuve. Montréal, Québec

La cosmologie – l'étude de la structure globale et de l'évolution de l'Univers – est un sujet qui, par sa nature, fascine. Mais il est facile de se perdre dans son dédale de concepts et de théories, du big bang au big crunch en passant par l'expansion ou la philosophie du temps ! Voici en dix questions clés, celles que nous posent le plus souvent les lecteurs de Ciel et Espace, un tour d'horizon de la plus fondamentale des branches de l'astronomie.

① Pourquoi dit-on « Voir loin dans l'espace, c'est voir loin dans le passé ? »

Comme toute l'astronomie, la cosmologie repose d'abord et avant tout sur l'étude de la lumière qui nous parvient des objets célestes. Le spectre de cette lumière s'étend bien au-delà des couleurs de la lumière visible, allant des rayons X aux ondes radio. La lumière voyage dans le vide à la vitesse de 300000 km/s, ce qui correspond à sept fois le tour de la Terre en une seconde. Mais si la vitesse de la lumière est vertigineuse, elle n'est pas infinie, et ce fait revêt une importance capitale pour les astronomes, en particulier pour les cosmologistes. Car ainsi, ils observent l'Univers avec un retard qui grandit à mesure qu'ils regardent de plus en plus loin. Pour la Lune, le délai vaut à peu près une seconde. Pour le Soleil, huit minutes. Pour Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel nocturne, neuf ans, ce qui fait qu'en l'observant aujourd'hui, nous la voyons telle qu'elle était en 1989 ! A cause de ce délai de transmission, qui sait si certaines grosses étoiles qui nous semblent tranquilles n'ont pas déjà explosé en supernovae ? En revanche, puisque les étoiles ont des cycles de vie qui se mesurent en millions et en milliards d'années, on peut quand même considérer que ce que l'on voit avec quelques années de retard n'est pas trop différent dans l'ensemble de ce qui existe réellement en ce moment.

Appliqué aux galaxies lointaines, celles situées à des milliards d'années-lumière, le délai de transmission de la lumière prend des proportions considérables. La lumière de ces galaxies ayant mis des milliards d'années à nous parvenir, on ne peut plus affirmer qu'elles ressemblent encore aujourd'hui à ce que nous en voyons. La seule région du cosmos où le problème ne se pose pas en termes cruciaux, c'est notre voisinage immédiat — une sphère de quelques millions d'années-lumière de rayon. Mais quoi qu'il en soit, une chose est sûre : à cause de ce délai de transmission, il est tout simplement impossible aux cosmologistes de savoir à quoi ressemble l'Univers dans son ensemble en ce moment précis. En revanche, pour ceux qui travaillent plus particulièrement sur l'évolution des galaxies, ce délai de transmission constitue une manne incroyable. Puisqu'ils n'ont aucune raison de penser que la nature des galaxies diffère d'une région à une autre, ils peuvent reconstituer leur évolution globale en choisissant des échantillons à diverses distances. Et ainsi se faire une bonne idée de l'évolution de l'ensemble des galaxies, à défaut de celle d'une galaxie en particulier. Qu'est-ce Le big bang ?

② Qu'est-ce que le big bang ?

C'est justement en étudiant les galaxies que les astronomes se sont rendu compte qu'elles avaient tendance à se fuir mutuellement. Cette observation fut interprétée comme l'indice que l'Univers tout entier était lancé dans un gigantesque mouvement d'expansion. Or si les galaxies s'éloignaient ainsi les unes des autres, cela signifie que,



dans le passé, elles étaient donc plus proches. Et dans un passé lointain, encore plus proches et ainsi de suite, jusqu'au moment où la matière existant dans l'Univers formait une substance plus concentrée que n'importe quel matériau existant aujourd'hui, plus concentrée même que le noyau de l'atome. Le big bang, c'est cette théorie selon laquelle l'Univers aurait connu, voilà douze à quinze milliards d'années, un état hyperdense et hyperchaud, dont l'Univers actuel constituerait les restes extrêmement dilués par l'expansion.

③ Si l'Univers est en expansion, dans quoi s'étend-il ?

Cette question en apparence banale nous fait basculer en pleine métaphysique. En effet, par définition, l'Univers comprend tout ce qui existe. Mais alors, comment peut-il être en expansion ? Et par rapport à quoi ? Pour résoudre ce paradoxe, il faut refuser à tout prix de s'imaginer que l'on observe l'Univers depuis un point extérieur à lui-même : un tel point n'existe pas, puisque tout fait partie de l'Univers. De même, on ne peut pas dire que l'Univers s'étend dans un espace pré-existant. L'Univers est en expansion par rapport à lui-même et il faut donc toujours envisager cette expansion cosmique du point de vue d'un observateur situé à l'intérieur de l'Univers.

De ce point de vue, l'expansion ressemble beaucoup à celle de la pâte à pain qui lève. Reprenons une célèbre image, celle du pain aux raisins, où les raisins représentent les galaxies. À mesure que la pâte lève, la distance entre les raisins augmente, comme la distance entre les galaxies de l'Univers. Pour que l'analogie soit parfaite, il ne faut bien sûr pas observer la scène de l'extérieur : il faut plonger dans la pâte avec les raisins et oublier qu'il existe quelque chose à l'extérieur du pain, car ce pain est devenu l'Univers ! Une autre façon de se représenter les choses est de considérer la membrane d'un ballon en caoutchouc sur laquelle auraient été dessinés des points — les galaxies. Lorsque le ballon gonfle, l'espace entre les points augmente, tout comme l'espace entre les galaxies de l'Univers. Là encore, il ne faut pas observer le ballon de l'extérieur, mais s'imaginer soi-même comme une créature à deux dimensions prisonnière de la membrane. Cette membrane est la totalité de l'Univers, et l'espace à l'intérieur et à l'extérieur du ballon n'existe tout simplement pas ! Si l'on fait cela, certaines questions que l'on se pose d'ordinaire ont tendance à se résoudre d'elles-mêmes, dont la plus troublante : Où a eu lieu le big bang ?

④ Où a eu lieu le big bang ?

La tentation d'observer l'Univers de l'extérieur est grande. Preuve en est avec l'image si souvent utilisée pour parler du big bang et qu'il faudrait bannir à tout jamais : celle d'un « grand boum », d'une explosion primordiale qui aurait disséminé des fragments aux quatre coins du cosmos. Car, par définition, une explosion est expansion qui délimite un est, une explosion possède un big bang comme une explosion, demander à quel endroit il a eu du ballon qui gonfle, aucun des centre que les autres. Tous sont étaient « en germe dans le big bang » à l'origine : le centre de l'expansion — l'origine du big bang — est partout et nulle part à la fois.

Point de départ de
l'expansion, le big bang
s'est produit partout et
nulle part à la fois

bornée par une onde de choc en intérieur et un extérieur. Qui plus centre bien défini. Lorsqu'on voit le il est donc tout naturel de se lieu. En revanche, sur la membrane points dessinés n'est davantage au absolument équivalents, et tous

⑤ Y a-t-il des preuves de la théorie du big bang ?

L'expansion constitue la première preuve du big bang. Mais si les galaxies se fuient mutuellement, on ne les voit pas littéralement bouger, car une vie humaine est bien trop courte pour que l'augmentation de la distance entre deux galaxies données soit directement observable. Il faut donc se baser sur des observations indirectes, notamment celle du décalage vers le rouge de la lumière des galaxies. Cet effet — l'effet Doppler — nous est plus familier lorsqu'une ambulance nous dépasse : à mesure qu'elle s'éloigne, sa sirène nous paraît plus grave parce que



son signal sonore est décalé vers les basses fréquences (ou les grandes longueurs d'onde, c'est pareil). De même, les astronomes ont constaté que le signal lumineux en provenance des galaxies était décalé vers les grandes longueurs d'onde — vers le côté rouge du spectre. L'explication la plus simple à ce phénomène est qu'elles s'éloignent de nous sous le coup de l'expansion de l'Univers. Certes, on peut toujours imaginer que le décalage vers le rouge est produit par autre chose que par l'éloignement de la source et remettre ainsi en cause la nécessité d'un big bang. Mais il n'est pas la seule conséquence observable de la théorie...

Comme on l'a vu, qui dit big bang dit forcément que l'Univers évolue, qu'il a été dans le passé plus jeune, plus dense, plus chaud qu'aujourd'hui. C'est effectivement ce que l'on constate, grâce au délai de transmission, pour peu qu'on regarde à assez grande distance. Au fur et à mesure que l'on pénètre dans les profondeurs cosmiques, les propriétés moyennes des galaxies changent. Leurs noyaux se font plus actifs, plus turbulents, plus jeunes. Les étoiles bleues en leur sein se font plus nombreuses : ce qui est interprété comme un signe de jeunesse puisque les grosses étoiles bleues vivent moins longtemps que les petites étoiles rouges. Bref, plus on regarde loin, plus l'Univers rajeunit sous nos yeux ! Par ailleurs, les astronomes savent que la plus grande partie de l'hélium présent actuellement dans l'Univers n'a pas été fabriqué au cœur des étoiles. Cet hélium n'a pu être formé que dans les premiers instants d'un Univers très chaud, très dense et en expansion.

**Plus nous regardons
loin, plus l'Univers
rajeunit sous nos yeux**

Au fur et à mesure que l'on pénètre dans les profondeurs cosmiques, les propriétés moyennes des galaxies changent. Leurs noyaux se font plus actifs, plus turbulents, plus jeunes. Les étoiles bleues en leur sein se font plus nombreuses : ce qui est interprété comme un signe de jeunesse puisque les grosses étoiles bleues vivent moins longtemps que les petites étoiles rouges. Bref, plus on regarde loin, plus l'Univers rajeunit sous nos yeux !

Mais la preuve ultime de l'évolution cosmique était connue dès 1965, l'année où on a détecté un rayonnement diffus venant de toutes les directions du ciel, le rayonnement de fond cosmologique.

Cette « lumière fossile » nous arrive de régions de l'Univers si lointaines que, compte tenu du délai de transmission, nous les voyons telles qu'elles étaient environ 300 000 ans après le big bang. Juste avant cela, l'Univers n'était qu'une soupe chaude et quasiment homogène de noyaux atomiques, d'électrons et de particules de lumière. À ce moment-là, cette lumière a réussi à se libérer de la matière, pour suivre son propre destin. Le rayonnement de fond cosmologique est le vestige de cette première lumière, aujourd'hui diluée et refroidie. Son observation est pratiquement impossible à expliquer autrement que par la théorie du big bang.

⑥ Verra-t-on un jour tout L'univers ?

L'observation du rayonnement de fond cosmologique a confirmé de façon spectaculaire l'hypothèse du big bang. En revanche, elle a anéanti à jamais nos espoirs de répondre à une des questions les plus cruciales : Verra-t-on un jour tout l'Univers ? En effet, puisque l'Univers juste avant l'émission de cette « première lumière » était opaque, on ne peut pas voir plus loin : le rayonnement de fond cosmologique est « mur de brume » impénétrable. Il marque l'horizon de ce que l'on appelle l'Univers observable, soit l'ensemble des régions dont la lumière a eu le temps de nous parvenir depuis le début de l'Univers. Certes, la position de ce mur de brume recule à mesure que l'Univers vieillit, mais c'est au même rythme. Une vie humaine n'ajoutera guère plus que quelques dizaines d'années-lumière aux milliards d'années-lumière qui se trouvent déjà dans l'Univers observable. Qu'y a-t-il au-delà aujourd'hui ? Un Univers qui ressemble à l'Univers observable jusqu'à l'infini ? C'est ce que pense un grand nombre de cosmologistes. En effet, ils n'ont jamais observé de différences significatives entre les diverses régions de l'Univers observable. Si on tient compte du délai de transmission de la lumière, l'Univers observable semble parfaitement uniforme. Or il n'y a aucune raison de supposer qu'il y ait une borne quelque part. Mais il ne s'agit là que d'une extrapolation qui vient combler l'impossibilité d'observer au-delà du mur de brume. Toutefois, il existe un moyen indirect de répondre à la question : L'Univers est-il fini ou infini ?

⑦ L'Univers est-il fini ou infini ?

La cosmologie moderne s'inscrit dans le cadre de la relativité générale d'Einstein. D'après cette théorie, l'Univers peut avoir une géométrie globale ouverte ou une géométrie globale fermée. Dans l'hypothèse de l'Univers ouvert, l'espace est infini dans toutes les directions et l'Univers contient un nombre infini de galaxies. En revanche, dans l'hypothèse de l'Univers fermé, l'Univers possède une courbure globale de l'espace. Cette courbure fait en sorte que l'espace à trois dimensions de l'Univers se plie sur lui-même et se ferme : le volume de cet Univers est limité et le



nombre de galaxies qu'il contient est fini. Il est impossible au cerveau humain de se représenter un espace à trois dimensions et courbe, que les géomètres appellent une hypersphère. Seule analogie possible : la surface de la Terre, qui est aussi un espace courbe, mais à deux dimensions seulement. Dans un Univers fermé, comme à la surface de la Terre, un voyageur peut se déplacer pour toujours en ligne droite, mais il repasse fatalement par des régions qu'il a déjà traversées.

Pour choisir le bon modèle d'Univers, il faut imaginer des expériences mettant en évidence la courbure globale de l'Univers. Comme cette courbure — si elle existe — ne se manifeste que sur des échelles de plusieurs milliards d'années-lumière, ces observations sont assez difficiles à effectuer. Le principe de base consiste à faire un recensement de la « densité de population » des galaxies en se basant sur des « chandelles standards cosmiques » (des objets repères dont la luminosité moyenne ne varie pas d'un bout à l'autre de l'Univers), comme les supernovae. En calculant les effets subtils de la courbure de l'espace sur la densité apparente de ces objets, on espère pouvoir mesurer directement la courbure globale de l'Univers. On peut aussi espérer résoudre le problème en s'attaquant à une question en apparence fort différente mais qui, d'après la théorie de la relativité générale d'Einstein, est inséparable de la question de la courbure de l'Univers : Quel est l'avenir de l'Univers ?

⑧ Quel est l'avenir de l'Univers ?

La relativité générale relie la géométrie et le destin de l'Univers. En effet, c'est la gravité mutuelle de la matière que contient l'Univers qui est responsable de la courbure de l'espace. Si l'Univers est fermé, c'est que la matière de l'Univers est assez concentrée pour que sa gravité puisse un jour arrêter et inverser le mouvement d'expansion de l'Univers. Ainsi, un Univers fermé dans l'espace l'est aussi dans le temps, et il est condamné à finir ses jours par un big crunch, l'inverse du big bang. En revanche, si l'Univers est ouvert et si l'espace de l'Univers s'étend jusqu'à l'infini, c'est que la matière de l'Univers n'est pas assez concentrée pour pouvoir un jour arrêter l'expansion. L'Univers ouvert l'est à la fois dans l'espace et dans le temps.

Fini ou infini ? Fermé ou ouvert ? Tout dépend de la quantité totale de matière que renferme l'Univers — quantité que les cosmologistes ne connaissent toujours pas précisément parce qu'il existe de la matière visible, qui brille, et de la matière qui manifestement ne brille pas. C'est pourtant cette quantité totale de matière qui détermine le seuil au-delà duquel vont se jouer deux destins divergents : une expansion éternelle ou une recontraction. Si elle est inférieure à une certaine valeur critique, l'expansion se poursuivra pour toujours. En revanche, si elle est supérieure à cette valeur critique, les forces de gravité réussiront à contre-balancer l'expansion et il y aura recontraction vers un big crunch ultime. Le temps, alors, aura peut-être une fin, comme il a un début... Un début, avez-vous dit ? On arrive ainsi à la prochaine question, l'inévitable question que tout cosmologiste se voit poser un nombre incalculable de fois : Qu'y avait-il avant Le big bang ?

⑨ Qu'y avait-il avant Le big bang ?

Cette question nécessite le même genre d'approche que celle que nous avons développée pour visualiser l'expansion de l'Univers. Tout comme on ne doit pas s'imaginer en dehors de l'espace de l'Univers, on ne doit pas s'imaginer en dehors du temps de l'Univers. Celui-ci contient tout l'espace et tout le temps : il n'existe pas de temps en dehors. Dans cette perspective, le big bang est le premier instant pour lequel le temps a un sens. Il n'y a pas eu d'avant, car il n'y avait pas de temps avant le big bang. Cette réponse aurait plu au philosophe chrétien saint Augustin, qui dès le IV^e siècle expliquait qu'il ne fallait pas se demander ce que Dieu faisait avant de créer le monde : Dieu a créé le temps en même temps que le monde, et il n'y a tout simplement pas eu d'avant. De même, d'après les cosmologistes modernes, se demander ce qu'il y avait avant le big bang est aussi dénué de sens que se demander ce qui se trouve plus au sud que le pôle Sud de la Terre.

Mais n'est-ce pas un peu tricher avec la définition du terme Univers ? Quand un cosmologiste affirme que l'Univers contient tout par définition, il veut parler de tout ce qui est de la même nature que l'espace, le temps et la matière tels que nous les connaissons dans notre petit coin que l'on appelle l'univers observable. Mais qui sommes-nous pour limiter ainsi les possibilités de l'existence ? Ceci nous amène à une dernière question qui fait passer le débat à un tout autre niveau. Ya-t-il d'autres univers ?





⑩ Ya-t-il d'autres univers ?

Même si on arrivait un jour à une théorie complète et parfaite expliquant dans les moindres détails le comportement et l'évolution de l'Univers dans son ensemble, du big bang au big crunch, sans jamais avoir besoin de sortir de l'espace et du temps de l'Univers, qu'est-ce qui nous empêcherait de croire à l'existence d'autres univers ? Rien, bien sûr, tant que ces univers n'interagissent pas avec le nôtre et qu'ils n'ont aucune influence sur ce que l'on peut observer. Un petit nombre de théoriciens travaillent d'ailleurs à imaginer des super-univers, où le nôtre ne serait qu'une bulle parmi une multitude d'autres... Du coup, ne sort-on pas pour de bon du domaine de la science pour entrer dans celui de la métaphysique ? À la limite, on peut imaginer que tous les univers logiquement possibles existent, dont le nôtre, en équilibre quelque part entre le néant et l'absolu.

