

“L’instant zéro” dans l'histoire de l'Univers

Marc LACHIEZE-REY

Astrophysicien au CNRS de Meudon

L'idée d'«instant zéro» découle directement de l'idée d'expansion de l'univers. Cette dernière elle-même n'est pas venue toute seule ; c'est une idée qui date du début de ce siècle et l'introduction de cette idée d'expansion est une révolution comparable par son importance à la révolution copernicienne.

Revenons au début du siècle, époque où ces idées ont commencé à être introduites.

En 1910, Einstein a déjà construit sa théorie de la relativité restreinte, formalisée de suite par le mathématicien balte MINKOWSKI. La grande idée de cette théorie est que la notion d'espace et la notion de temps doivent être prises en compte ensemble et non plus séparément. Einstein a introduit de manière pédagogique sa théorie de la relativité restreinte en partant de l'idée de simultanéité et en montrant que cette idée de simultanéité d'un point de vue pratique n'est pas tenable. En tenant compte du fait que la lumière se propage à vitesse finie, Einstein arrive à proposer une manière de décrire tous les phénomènes cinématiques en supposant que l'espace et le temps forment une seule entité, un espace mathématique, une variété à quatre dimensions qu'on va appeler l'espace-temps, muni d'une métrique pseudo-euclidienne sans courbure. Cette théorie de la relativité restreinte rend très bien compte de la plupart des phénomènes cinématiques et elle a été vérifiée maintes et maintes fois par l'expérience. Il y a une manière très simple de se rendre compte qu'on est obligé de travailler dans l'espace-temps dès que l'on fait de l'astronomie, ou de la cosmologie : la cause en est la vitesse finie de propagation de la lumière. Les photons du rayonnement lumineux émis par

le Soleil mettent près de 8 minutes à nous parvenir sur la Terre. On voit le Soleil tel qu'il était 8 minutes plus tôt. C'est peu à l'échelle de l'évolution du Soleil. Il est presque contemporain. Mais lorsqu'on observe des galaxies, on les voit telles qu'elles étaient il y a quelques millions, même quelques milliards d'années, et non pas telles qu'elles sont aujourd'hui. Leur distance se mesure en millions ou milliards d'années de lumière. Les astronomes n'observent donc jamais l'espace contemporain mais des objets situés dans des tranches d'espace-temps d'autant plus éloignées spatialement qu'elles sont éloignées dans le temps. Ainsi, ce qu'on peut appeler la partie de notre univers accessible à notre observation, ce n'est pas l'espace mais c'est ce qu'on appelle le cône du passé ou aussi le cône de lumière; c'est l'ensemble, dans l'espace-temps, de ces objets qui nous sont liés par la propagation du rayon lumineux.

En 1905, Einstein avait déjà réussi à imposer la notion d'espace-temps, ce qui s'est très rapidement révélé fâcheux. Mais cette théorie de la relativité restreinte n'est pas suffisante ; elle permet uniquement de décrire un espace-temps sans structure puisque l'espace-temps est représenté par une variété à 4 dimensions qui n'a aucune courbure, et qui est plate.

On peut, dans ces variétés, faire des sections à temps constant, sections qui représentent l'espace à cet instant. Dans une telle variété, les parties spatiales sont toujours identiques à elles-mêmes à chaque instant. Il n'y a pas d'évolution de l'univers. L'univers est statique. D'autre part, ces parties spatiales sont sans courbure, ce qui signifie qu'à chaque instant, l'espace, dans la géométrie de Minkowski, se réduit à l'espace euclidien habituel. Il y a cependant un premier pas conceptuel d'effectué : mêler les descriptions spatiales et les descriptions temporelles dans une même entité, un même espace-temps. C'est une première approche de la cosmologie, mais sans structure, sans effet gravitationnel.

Si on considère deux événements pris dans l'espace-temps, alors un observateur peut mesurer la distance entre ces deux événements, la durée qui les sépare, mais ces mesures ne sont pas absolues ; elles dépendent de l'observateur. Ainsi, par exemple, si l'un des observateurs est dans une fusée qui se déplace par rapport à l'autre observateur, alors les mesures obtenues seront différentes. La durée et la distance spatiale ne sont plus des absolus. En revanche, l'intervalle qui sépare les deux événements, c'est-à-dire l'intégrale de cette métrique pseudo-euclidienne qu'on définit dans l'espace-temps, est conservée. C'est la preuve que les phénomènes se produisent bien dans l'espace-temps et non dans l'espace avec le temps qui s'écoule séparément.

En 1910, tous les astronomes sauf quelques-uns (très peu) pensaient que l'univers était statique. Personne, et même pas Einstein, n'avait l'idée que l'univers puisse être quelque chose qui évolue, mis à part les étoiles, les planètes. Au début du siècle, on pensait que l'univers se limitait à notre galaxie, entourée de son halo. On ne connaissait pas les autres galaxies. Le philosophe Kant (et aussi Laplace) au milieu du XVIII^{ème} siècle, avait introduit l'idée d'"univers-île" : l'univers était rempli (!) de vide avec quelques îlots de matière, non connectés entre eux. Mais cette idée n'est pas acceptée par la communauté des astronomes de l'époque.

Revenons au début de notre siècle ; vers 1910 (encore) l'astronome Vesto SLIPHER, directeur adjoint de l'observatoire Lowell en Arizona, essaie de mesurer les vitesses de nébuleuses spirales à partir des décalages spectraux : la lumière émise par une nébuleuse est observée à une longueur d'onde différente de la longueur d'onde émise. Elle est décalée d'un certain facteur vers le bleu ou le rouge. C'est l'effet Doppler-Fizeau : si une source de rayonnement s'éloigne ou se rapproche de l'observateur, son rayonnement est reçu avec un décalage en longueur d'onde :

$Z = V \times C$ (V est la vitesse relative de la nébuleuse, C la vitesse de la lumière), décalage positif ou négatif selon que la nébuleuse s'éloigne ou se rapproche. Slipher interprète ce décalage comme conséquence d'une vitesse. Par ses nombreuses observations, il trouve des vitesses de plus en plus élevées (plusieurs centaines de kilomètres par seconde), ce qui ne peut s'interpréter que par des distances d'éloignement très grandes, donc des objets situés hors de notre galaxie, ce qui remet en cause l'hypothèse que ces nébuleuses spirales sont dans notre galaxie car sinon avec de telles vitesses, elles seraient sorties depuis longtemps de notre "univers-île".

En 1920, lors d'un meeting de l'Académie des Sciences organisé aux U.S.A., un grand débat a lieu entre ceux qui croient à un univers réduit à notre galaxie, et ceux qui croient aux "univers-îles" comme Slipher. Aucune conclusion n'en est sortie. C'est alors qu'en 1924, l'astronome américain Edwin HUBBLE clôt le débat. Après de longues et très minutieuses recherches et observations sur les étoiles variables du type Céphéides (le rapport de l'éclat absolu et de l'éclat apparent est égal au carré de la distance à l'observateur) situées dans la nébuleuse d'Andromède, Hubble détermine la distance de cette nébuleuse (deux millions d'A.L.) et prouve ainsi, grâce aussi au perfectionnement des télescopes, qu'Andromède est faite d'étoiles et se situe en dehors de notre galaxie. Il s'agit donc bien d'une autre galaxie. La "nébuleuse d'Andromède" s'appelle désormais "galaxie d'Andromède". D'autres mesures sont faites, prouvant qu'il en est de même pour d'autres

nébuleuses. L'univers est fait d'une multitude d'"univers-îles". On commence à penser que l'univers est fait comme un gaz dont les éléments de base sont les galaxies. C'est la première révolution cosmologique du siècle d'ordre purement observationnel.

Il y a donc eu deux sortes de mesures aux conséquences importantes : les mesures de vitesses (par Slipher) et les mesures de distances (par Hubble) permettant d'affirmer que les nébuleuses spirales observées jusqu'à présent à l'aide de télescopes ne sont autres que des galaxies spirales. Mais tout cela n'expliquait pas d'où venaient ces vitesses observées, ni quelles significations elles avaient. Slipher est l'un des premiers astronomes à avoir eu l'idée de l'expansion de l'univers ou dans l'univers. Pour comprendre ces vitesses, seule la théorie pouvait venir en aide.

En 1917, Einstein publie la théorie de la relativité générale rendant compte des phénomènes de gravitation. Pour décrire les propriétés gravitationnelles d'un système (l'univers par exemple), on n'utilise plus les forces comme en physique newtonienne, mais la structure de l'espace-temps, espace non euclidien à courbure.

L'un des premiers à comprendre cette théorie est l'astronome anglais Eddington. Cette théorie prévoyait entre autre la déviation des rayons lumineux au voisinage des masses. En 1919, à l'occasion d'une éclipse de Soleil, Eddington organise une expédition pour profiter des conditions idéales d'observation : la lumière émise par une étoile lointaine, située derrière le Soleil, était déviée en passant près du Soleil (une éclipse permet d'observer de jour une étoile sans être ébloui par le Soleil). Ces résultats ont donc confirmé la théorie de la relativité générale. Einstein se rend compte alors que sa théorie permettait de construire des modèles d'univers. Mathématiquement, l'univers de la relativité générale est une variété à 4 dimensions, avec des propriétés de structure et de courbure. Einstein proposa en 1917 un modèle cosmologique relativiste, croyant que l'univers était statique (et non en expansion). Pour s'adapter à une description d'un univers statique à volume fermé, il est obligé de modifier sa théorie en introduisant une constante cosmologique. Mais apprenant plus tard que l'univers n'est pas statique mais en expansion, Einstein reconnaît avoir fait une erreur en introduisant cette constante.

Deux ans plus tard, l'astronome et physicien hollandais Willem DE SITTER trouve un autre modèle d'univers relativiste, modèle qui semble apte à décrire l'univers observé, mais c'est aussi un modèle statique donc sans vitesse. Ce modèle permet d'expliquer les décalages spectraux non pas causés par l'effet Doppler mais par un effet cosmologique inexplicable sans le

secours de la relativité générale. Cependant ce modèle prévoit en approximation une densité de matière nulle (univers vide); or il y a trop de matière dans l'univers pour que cette approximation soit satisfaisante. De même il y a trop d'expansion pour pouvoir décrire l'univers avec le modèle d'Einstein. On est donc en présence de deux modèles : lequel est le bon ? C'est Hubble qui apporte la solution en découvrant que les décalages ne se distribuent pas au hasard. Il énonce alors en 1929 une loi empirique : les décalages spectraux des galaxies sont proportionnels à leurs distances ($V = H_0 D$ où H_0 est la constante de proportionnalité, appelée constante de Hubble).

En fait, la bonne solution avait été trouvée deux ans plus tôt, en 1927, par l'abbé Georges LEMAITRE, professeur à l'université de Louvain en Belgique. Il avait remarqué que les solutions d'Einstein et de De Sitter n'étaient que des cas particuliers de modèles d'une classe plus générale de solutions, appelés les modèles de Lemaitre-Friedmann (mathématicien russe qui avait lui aussi trouvé ces solutions). En 1931, on s'accorde sur ces modèles qui réconcilient tout le monde. Ces modèles de Lemaitre-Friedmann sont des modèles relativistes selon lesquels l'espace-temps est décrit par une variété à 4 dimensions à laquelle on impose une condition d'homogénéité de la partie spatiale : les sections spatiales sont à courbure constante. Or de telles variétés, il y en a trois catégories à condition qu'elles soient simplement connexes (modèles standards). De plus, dans ces modèles, il y a expansion, c'est à dire que la métrique de ces espaces fait intervenir un terme temporel et un terme spatial reliés entre eux par un "facteur d'échelle" qui est fonction du temps : $R(t)$. Si on prend deux points de coordonnées constantes et qu'on mesure la distance métrique, alors cette distance augmente proportionnellement à ce facteur d'échelle $R(t)$; ce facteur décrit comment la distance évolue avec le temps. Comme l'univers est en expansion, $R(t)$ est croissante. Si on prend la relation selon laquelle toutes les distances augmentent proportionnellement à $R(t)$ et si on la dérive, on trouve que la vitesse d'expansion est égale au produit de la distance par une certaine constante (constante de Hubble). On retrouve la loi de Hubble.

La fonction $R(t)$ est déterminée par le contenu matériel de l'univers, par sa densité. S'il y a beaucoup de matière, l'univers va voir son expansion se transformer en contraction; s'il y a peu de matière, l'expansion va se ralentir indéfiniment sans jamais s'arrêter. La valeur critique de cette quantité de matière (beaucoup ou peu) est de l'ordre de 10^{-31} g/cm³ comme densité de matière. Pour le moment, avec les mesures des astrophysiciens, on observe une valeur d'environ 1/100 de la quantité critique: l'univers serait donc en expansion éternelle. Mais il se peut qu'il y ait des masses cachées dans l'uni-

vers et que ces masses qu'on ne voit pas contribuent à une densité plus importante de matière. Dans ce cas, l'expansion de l'univers va s'arrêter puis il y aura contraction.

Dans la loi de Hubble ($V = H_0 D$), la constante H_0 exprime la variation de $R(t)$ avec le temps, ou plus exactement sa dérivée logarithmique. Elle mesure donc la vitesse d'expansion. Les cosmologues cherchent à estimer la valeur de H_0 . On est actuellement presque sûr qu'elle se situe entre 0,5 et 1.

Si on trace la courbe représentant $R(t)$ et la tangente à cette courbe au point d'abscisse t , cette tangente coupe l'axe des temps (axe des abscisses) en un point qui se situe dans le passé car $R(t)$ est croissante. Si par approximation on remplace la courbe par la tangente, on peut estimer que la courbe représentant R coupe l'axe des temps en un point voisin de l'instant t_0 où $R(t_0) = 0$, c'est à dire où toutes les distances cosmiques valent 0. Dans ce cas on ne peut remonter plus le temps, sinon les distances deviennent négatives. Avec ce modèle, t_0 est l'"instant zéro", l'origine de l'univers, ou plutôt le début de l'expansion. Si on est aujourd'hui au temps t , alors $t - t_0$ s'appelle le "temps de Hubble" et vaut l'inverse de la constante H_0 . D'après les mesures, donc d'après les valeurs données à H_0 , ce temps de Hubble est compris entre 9 et 18 milliards d'années.

Donc on suppose qu'il y a eu expansion dans le passé, c'est-à-dire que $R(t)$ a toujours été croissante et si la courbe ($R(t)$) a gardé sa concavité, on peut estimer que l'âge de l'univers est de l'ordre de grandeur du temps de Hubble ou inférieur à celui-ci. On montre en théorie de la relativité générale que si densité et pression sont positives, alors ($R(t)$) garde sa concavité et se détermine à partir de la densité et de la pression de l'univers. De plus si on admet qu'il n'y a pas création ou disparition de matière, alors l'expansion de l'univers se traduit par une diminution de la densité et de la pression, c'est à dire par une dilution de la matière.

Par contre, alors, en remontant à l'origine de l'univers, la densité et la pression augmentent. Or dans ces conditions de densité extrême, la théorie de la relativité générale ne peut plus s'appliquer à cause des effets gravitationnels et il faut alors tenir compte des effets quantiques.

Actuellement les théories de la relativité générale et de la physique quantique sont incompatibles. Dans la reconstitution de la courbe ($R(t)$) dans le passé n'est possible que tant que la densité n'a pas atteint une certaine limite, la densité de Planck, qu'on n'a pas le droit de dépasser car au-delà de cette densité interviennent les effets quantiques. On pense actuellement que

cette densité de Planck est atteinte environ 10^{-35} secondes après l'origine théorique t_0 de l'univers. On ne peut pas prolonger la courbe $(R(t))$ jusqu'à $R = 0$, mais jusqu'à une valeur de R minuscule mais non nulle.

Donc, quant au problème de l'«instant zéro» de l'origine de la création, on ne peut rien dire tant que l'on n'a pas une théorie qui permette de rendre compte à la fin des phénomènes gravitationnels et des phénomènes quantiques.

Y avait-il avant l'«instant zéro» une phase de contraction, une phase statique ? Nul pour l'instant ne peut le dire. Le problème de la cosmologie quantique reste à résoudre.



La «croix latine» comme instrument de mesure astronomique (XVI^e siècle)