

Après le Big Bang, quels fondements pour la cosmologie ?

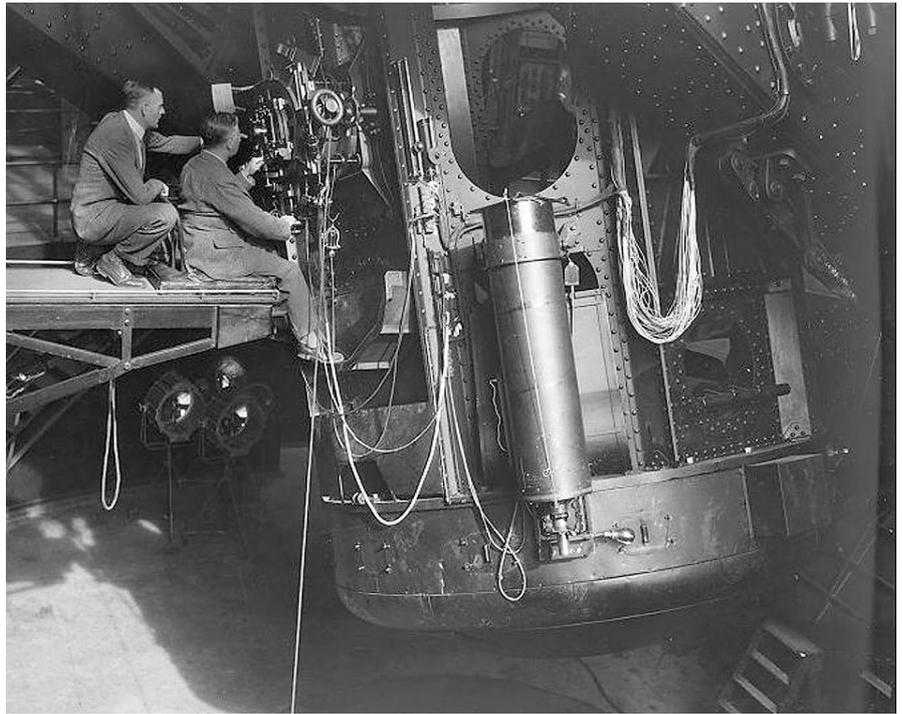
BENOIT CHALIFOUX

Toutes les anomalies inexplicables par la théorie du Big Bang nous amènent à réexaminer les fondements de la cosmologie, qui reposent principalement sur les travaux de deux géants de la science du XX^e siècle : Édwin Hubble et Albert Einstein. Nous allons d'abord essayer de présenter la nature de leurs travaux et, après avoir identifié les axiomes qui les sous-tendent, nous essaierons de développer des critères nous permettant de juger des qualités relatives des différents modèles cosmologiques.

La liste des anomalies inexplicables par la théorie du Big Bang est devenue aujourd'hui très longue, et continue de s'allonger. A part les problèmes d'ordre philosophique ou épistémologique soulevés par cette théorie, sur lesquels nous reviendrons dans cet article, on découvre, au fil du temps, de plus en plus de paradoxes qui obligent les astrophysiciens à recourir à des modèles toujours plus fantaisistes pour les expliquer.

Le premier type d'anomalies est lié à la question de l'âge de l'univers. La mise en service récente d'instruments plus performants et les observations qu'ils ont permis d'obtenir ont fait resurgir certains problèmes majeurs que l'on croyait plus ou moins résolus. Par exemple, l'observation, grâce au télescope Hubble, de galaxies toujours plus lointaines et vieilles donne des résultats non conformes à ce que l'on s'attendait, notamment pour ce qui concerne l'échelle du temps couvrant la formation et l'évolution des galaxies. D'autres techniques récentes utilisées par l'équipe de l'université de Durham dans la recherche de galaxies très lointaines (avec des décalages vers le rouge très élevés, considérés comme impossibles il y a encore quelques années), permettent également d'identifier des astres qui défient la chronologie actuelle. Le Big Bang attribue en effet à notre univers un âge étonnamment jeune, de l'ordre de 9 à 15 milliards d'années. Rappelons, à titre de comparaison, que notre Terre est âgée de 5 milliards d'années environ. Notre propre galaxie n'aurait eu le temps d'accomplir, d'après sa vitesse de rotation actuelle, que 45 à 60 tours complets sur elle-même, ce qui expliquerait difficilement, d'après certains spécialistes, sa forme spirale bien développée. D'autres galaxies situées à des distances (spatiales et par conséquent chronologiques) de moins de 5 % du Big Bang exhibent, elles aussi, des formes spirales régulières. Certaines superstructures de galaxies, comme le « Grand Mur » découvert en 1989 par Margaret Geller et John Huchra, auraient exigé beaucoup plus de temps pour se développer que celui accordé par la cosmologie du Big Bang.

L'autre type d'anomalies est lié à la question du décalage vers le rouge et à l'évaluation des distances.



Edwin Hubble et sir James Jeans regardant à travers un télescope.

Plusieurs types d'objets présentent des décalages difficiles à expliquer. Mentionnons ici simplement les quasars, qui semblent beaucoup trop éloignés par rapport à leur luminosité très élevée, ou certaines galaxies (comme NGC 7603, voir *Fusion* n°93 à ce sujet) qui sont reliées, par des ponts de matière, à des objets présentant des décalages spectraux très différents, ce qui ne devrait pas être le cas en raison de la faible distance qui les sépare.

Enfin, plusieurs anomalies concernent la densité massique de l'univers. Ce problème est connu sous le nom de la « masse manquante de l'univers » et découle du fait que la matière directement observable ne constitue qu'un faible pourcentage de la masse calculée par les théories de la relativité et du Big Bang. Ceci a conduit plusieurs scientifiques à inventer des formes toujours plus exotiques de matière fantôme, « noire » selon la terminologie officielle, ou à postuler l'existence de neutrinos toujours plus lourds, qui ne peuvent malgré tout être observés par l'expérience.

On assiste pour ainsi dire à un « décrochage épistémologique », où n'importe quoi peut être proposé le plus sérieusement du monde, ce qui a pour effet de générer un grand scepticisme face aux capacités ul-

times de l'homme à comprendre l'univers.

Cette surmultiplication d'explications et de modèles nous rappelle la complexification sans cesse croissante des épicycles de Ptolémée pour rendre compte du mouvement des planètes, jusqu'aux découvertes de Copernic et de Kepler.

Tous ces problèmes nous amènent à réexaminer les fondements de la cosmologie, qui reposent principalement sur les travaux de deux géants de la science du xx^e siècle : Edwin Hubble et Albert Einstein. Nous allons d'abord essayer de présenter la nature de leurs travaux et, après avoir identifié les axiomes qui les sous-tendent, nous essaierons de développer des critères nous permettant de juger des qualités relatives des différents modèles cosmologiques.

Les travaux de Hubble

Le nom de l'astrophysicien américain Edwin Hubble (1889-1953) fait aujourd'hui partie du langage de l'astrophysique. Avant même la mise en service du télescope Hubble, on parlait déjà de la constante de Hubble, du temps de Hubble, de la loi de Hubble corrélant la distance

et le décalage vers le rouge des galaxies, de la séquence de Hubble pour la classification des galaxies et bien d'autres choses encore.

Malgré sa grande prudence lorsqu'il s'agissait de spéculer sur les fondements théoriques de l'astrophysique (il croyait avant tout à la primauté de l'observation), Hubble arrivait à cerner l'essentiel. A partir des programmes d'observation qu'il élaborait avec soin, il réussissait à dégager les données nécessaires pour relever les grands défis de son temps.

Ainsi, après avoir contribué à éclaircir la nature des « nébuleuses » – on ne savait pas à l'époque s'il s'agissait de nuages de gaz à l'intérieur même de notre galaxie ou de galaxies à part entière comme la nôtre –, il développa (en même temps que Lundmark par ailleurs) une classification des différents types de galaxies.

Dans un article de 1926 intitulé *Nébuleuses extragalactiques*, en étudiant certaines caractéristiques comme la luminosité d'une galaxie en fonction de son diamètre et de son orientation dans l'espace, il arriva rapidement à réduire les différents types de galaxies (elliptiques, spirales et irrégulières) à un groupe homogène. Il chercha ensuite à établir un décompte des galaxies et à calculer leur distribution dans l'espace. Il fallait dans un premier temps déterminer la distance réelle de quelques-unes d'entre elles. Ceci fut accompli grâce à l'étude des céphéides, des étoiles supergéantes rouges dont la luminosité varie de façon périodique et régulière. On avait constaté que les céphéides les plus brillantes avaient les périodes les plus courtes, et les moins brillantes les périodes les plus longues. Etant donné que l'on avait déjà précisément déterminé par la méthode des parallaxes la relation entre la magnitude et la distance réelle des céphéides se situant dans notre galaxie, on a pu par la suite calculer la distance de céphéides situées dans ce que l'on supposait être des galaxies voisines, là où l'on pouvait toutefois encore distinguer des étoiles individuelles. La nature extragalactique des nébuleuses les plus proches se trouvait donc dans un premier temps confirmée et la connaissance de leur distance réelle fut utilisée comme étalon afin de

calibrer l'échelle des distances pour l'ensemble des galaxies (**encadré 1**).

En dénombrant les galaxies de magnitude inférieure à une limite préétablie et en enchaînant les décomptes correspondant à des limites successives et à des distances moyennes maximales de plus en plus grandes, Hubble a réussi à calculer leur distribution dans l'espace.

Il a aussi calculé, en s'appuyant notamment sur les travaux d'Opik, les dimensions réelles et les masses des galaxies. Une fois connue

la distribution des galaxies, il a déterminé, en négligeant la masse de la matière intergalactique, la densité de la matière dans l'espace puis, à l'aide d'équations développées par Einstein pour un univers sphérique et statique, les masse, rayon et volume de l'univers de la relativité générale. Nous précisons, par curiosité, qu'il arriva à une densité de $1,5 \times 10^{-31}$ g/cm³, à une masse totale de 9×10^{19} kg et à un rayon de $8,8 \times 10^{10}$ années-lumière. A titre d'indication, l'étoile la plus proche –

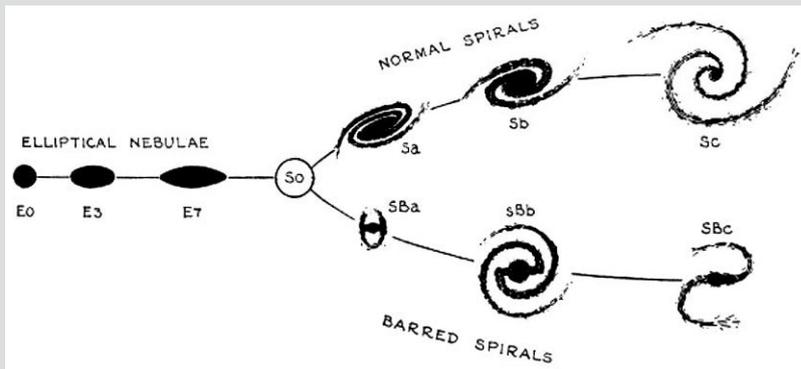
Encadré 1 - Comment évaluer la distance des objets astronomiques : magnitude et luminosité

La première tentative connue visant à établir une échelle de luminosité des étoiles a été effectuée par Ptolémée, dans son *Almageste* rédigé au cours de la première moitié du II^e siècle avant J.-C. Les étoiles étaient divisées en six groupes, donc six degrés de magnitude différente, une magnitude plus petite exprimant une luminosité plus grande. Ainsi, les étoiles du premier groupe étaient environ 2,5 fois plus lumineuses que celles du deuxième, $(2,5)^2 = 6,25$ fois plus lumineuses que celles du troisième, $(2,5)^3 = 16$ fois plus lumineuses que celles du quatrième, et ainsi de suite jusqu'au sixième.

Les degrés de magnitude sont par conséquent inversement proportionnels non pas directement à la luminosité mais au *logarithme* de la luminosité. Si nous adoptons la suggestion de Pogson de 1856 selon laquelle on devrait utiliser le chiffre 2,51189... plutôt que 2,5 pour exprimer le rapport de luminosité entre les six magnitudes, le sixième groupe serait exactement $(2,51189...)^5 = 100$ fois moins lumineux que le premier. Inversement, une multiplication par 100 de la luminosité correspond à une régression de 5 degrés dans l'échelle des magnitudes (de 6 à 1, par exemple), selon la relation « $0,4 (m - m_0) = \text{Log } L_0/L$ », puisque si L est 100 fois plus lumineux que L_0 , on obtient : $m = m_0 - 5$.

Mais une évaluation précise de la magnitude et de la luminosité ne nous permet malheureusement pas de déterminer la distance d'un objet astronomique, puisque ceux-ci (les étoiles et les galaxies, par exemple) peuvent être de taille et de luminosité très différentes.

Hubble réussit, à partir d'une classification méticuleuse des galaxies et de certains critères comme leur diamètre et leur orientation dans l'espace, à déterminer une luminosité moyenne valable pour toutes les classes. Cela permit, avec d'autres informations complémentaires, d'établir une échelle des distances et d'étudier la distribution générale des galaxies dans l'univers. Ci-dessous, un dessin de Hubble décrivant les différents types de galaxies, notamment elliptiques et spirales.



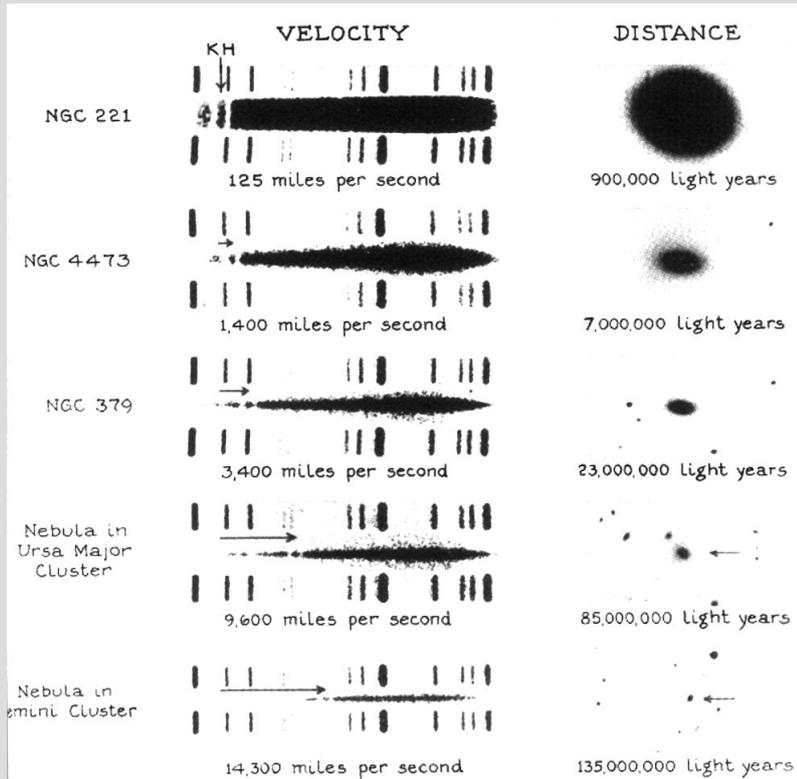


Figure 1. Le décalage vers le rouge. Cet assemblage de différentes spectroscopies est constitué de cinq bandes centrales noires (entrecoupées des raies spectrales K et H du calcium), provenant de la lumière de cinq galaxies observées. Les petites raies en haut et en bas de chaque spectroscopie sont celles de l'hélium, utilisé comme élément de comparaison. Nous voyons comment le décalage des raies spectrales K et H du calcium vers la droite (ou la partie rouge du spectre) s'accroît avec la distance. Les échelles indiquent l'ampleur du décalage, qui devient plus important lorsque les galaxies sont plus éloignées. Nous avons ici des galaxies situées à une distance, selon les estimations de l'époque, de 900 000 à 135 000 000 années-lumière. Notons que l'amincissement de la bande centrale indique la baisse de luminosité liée à l'accroissement de la distance.

Le décalage vers le rouge est exprimé par le ratio $d\lambda/\lambda$, indiquant l'accroissement de la longueur d'onde de la lumière reçue par rapport à sa longueur d'onde originale.

Le décalage vers le rouge des galaxies dépassait rarement, jusqu'à récemment, la valeur de 1, considérée comme la valeur à partir de laquelle des galaxies n'auraient pu se former, puisqu'un tel éloignement aurait impliqué qu'elles naissent à un moment trop rapproché du Big Bang lui-même. Des astronomes de l'université de Durham ont cependant réussi, en utilisant des techniques spécialisées dans la recherche de galaxies très lointaines, à trouver plusieurs galaxies présentant des décalages de 4 ou même de 6.

Alpha du Centaure – est aujourd'hui estimée à 4,5 années-lumière de notre Soleil, et la galaxie la plus proche – Andromède – à 2,8 millions d'années-lumière. La portée maximale du télescope du mont Wilson où travaillait Hubble était de $1,4 \times 10^8$ années-lumière pour une galaxie de luminosité moyenne, c'est-à-dire $1/600^e$ du rayon calculé.

Sa percée suivante fut la découverte d'une relation linéaire directe entre la distance des galaxies et leur décalage vers le rouge. Vesto Slipher avait réussi, dès 1912, à mesurer la vitesse radiale de la galaxie d'Andromède (M31), c'est-à-dire la composante de la vitesse parallèle à la droite nous reliant à la galaxie observée. Il le fit en analysant son spec-

tre d'émission et en déterminant le degré de déplacement des lignes d'absorption, dont le décalage par rapport à leur position normale indiquait la vitesse de rapprochement ou d'éloignement. Slipher supposait bien entendu que le décalage vers le rouge résultait d'une sorte d'effet Doppler appliqué à la lumière, mais cela reste une supposition, comme nous allons le voir plus loin.¹ Après de multiples améliorations apportées aux instruments d'observation, Slipher a calculé, en 1925, la vitesse de 45 galaxies. Les vitesses variaient entre -304 et +1 800 km/s, avec une vitesse moyenne de +600 km/s. Ces vitesses étaient supérieures à celles de tous les corps célestes connus à l'époque.

On tenta dans un premier temps d'expliquer ce phénomène par la vitesse de rotation du Soleil autour du centre de notre galaxie. Après avoir déterminé et soustrait la vitesse du Soleil, on pensait, comme ce fut le cas pour les autres étoiles, que les vitesses résiduelles des galaxies seraient nettement plus faibles et qu'elles seraient diversifiées, tantôt positives, tantôt négatives. Or tel ne fut pas le cas ; toute tentative d'ordonner selon une règle claire les différentes vitesses échouèrent. En réexaminant et en sélectionnant, avec Milton Humason, les distances des galaxies les plus fiables, Hubble fut le premier à montrer de façon certaine l'existence d'une relation entre le décalage vers le rouge et la distance des galaxies.

S'il est vrai que le décalage vers le rouge des raies d'absorption a été interprété dès le départ comme une indication de la vitesse radiale, il n'était cependant pas évident que cette interprétation tiendrait face à une situation où la très grande majorité des galaxies s'éloignaient de nous, avec une vitesse d'autant plus grande qu'elles étaient plus éloignées (**figure 1**).

Hubble avait par ailleurs constaté que la densité dans la distribution des galaxies avait tendance à diminuer avec la distance, un phénomène incompatible avec la distribution uniforme à laquelle on s'attendrait d'un point de vue théorique. D'où venait cet écart avec la théorie ? Il pensa dans un premier temps pouvoir expliquer le phénomène par le décalage vers le rouge, intrinsèquement responsable

d'une perte d'énergie et donc de luminosité des galaxies, ce qui laissait supposer que cette perte d'énergie serait d'autant plus grande que les galaxies seraient éloignées, étant donné que le décalage s'accroissait avec la distance. Cet « effet-énergie » permettrait donc de corriger les données obtenues par l'observation et de rétablir la règle de l'uniformité, ce qui fut en effet le cas.

Une interprétation du décalage comme indicateur d'un mouvement de récession des galaxies venait toutefois considérablement compliquer la question. En effet, si le décalage était interprété comme un effet Doppler et qu'en conséquence on concluait que les galaxies s'éloignent de nous, la densité des photons nous parvenant se verrait diminuée et elles nous paraîtraient moins lumineuses qu'elles ne le seraient en réalité, impliquant ainsi qu'elles seraient plus proches qu'on ne le pensait. Nous aurions ainsi une surcorrection dans la loi de distribution des galaxies, avec une densité s'accroissant en fonction de la distance (**encadré 2**).

Cette surcorrection pourrait cependant être corrigée à son tour, si l'on prenait en compte le fait que les galaxies observées ne sont pas toutes de la même époque, c'est-à-dire que la lumière qui nous parvient a quitté les galaxies les plus lointaines il y a plus longtemps que celles qui sont plus proches. Et comme les galaxies se sont éloignées entre-temps, elles nous paraissent plus proches qu'elles ne le sont en réalité, et ce d'autant plus qu'elles sont éloignées. Mais comment réduire toutes les données à la même époque ? Qui nous dit que leur vitesse ait été constante dans le temps, ou qu'elle le soit toujours aujourd'hui ?

Hubble et le mathématicien Richard Tolman se sont tournés vers la théorie de la relativité, et ont choisi, parmi les modèles pouvant être dérivés des équations d'Einstein, un modèle approprié aux observations alors disponibles.

En postulant un univers homogène, isotrope et en expansion, on pouvait réduire le problème des époques à une simple question de « courbure de l'espace-temps ». Ainsi, en introduisant dans les calculs une « courbure » suffisamment grande, il devenait possible de corriger les résultats pour rétablir une

distribution homogène des galaxies. Mais puisque selon la théorie de la relativité, la courbure de l'espace-temps est déterminée par le champ gravitationnel qu'il contient, l'intro-

duction d'une quantité de courbure nécessaire au rétablissement de l'homogénéité dans la distribution des galaxies entraînait la présence d'une masse plus importante, une densité

Encadré 2 - La loi de distribution des galaxies dans l'espace

Nous rappelons d'emblée que la magnitude d'une étoile, d'une galaxie ou de tout autre objet astronomique, est proportionnellement inverse à sa luminosité. Ainsi, plus un objet est lumineux, plus sa magnitude est petite, et vice versa. On peut en outre supposer que plus la magnitude d'une galaxie de taille moyenne est élevée, plus sa distance par rapport à nous est grande.

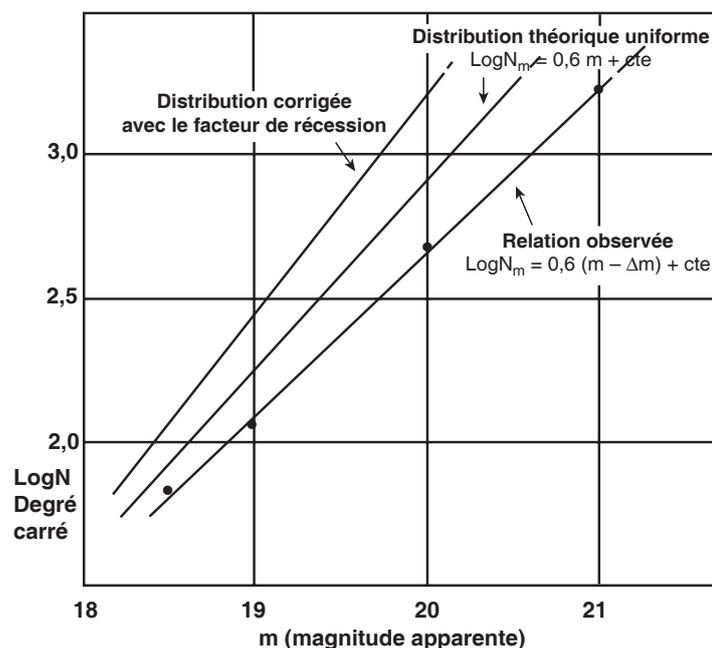
La formule théorique nous permettant de déterminer le nombre total de galaxies (N_m) situées en dessous d'une magnitude limite donnée (m), et donc en dessous d'une distance moyenne donnée, est : $\text{Log}N_m = 0,6 m + \text{cte}$.

Cette formule suppose une distribution uniforme (et théorique) des galaxies dans l'espace, qui correspond à la droite « distribution théorique uniforme » sur le graphique.

Dans le cadre de ses observations, Edwin Hubble obtenait cependant une baisse du nombre de galaxies avec la distance, selon la relation : $\text{Log}N_m = 0,6(m - Dm) + \text{cte}$, où Dm indiquait la correction nécessaire à apporter pour compenser la perte apparente de luminosité qui devenait plus importante à mesure que la distance s'accroissait (voir la droite « relation observée »).

Si la correction nécessaire incluait seulement un facteur lié à une perte d'énergie (et par conséquent de luminosité), nous reviendrions à la courbe théorique normale. Mais une interprétation du décalage vers le rouge comme découlant d'un effet Doppler (c'est-à-dire résultant d'un facteur de récession des galaxies) nous donnerait une courbe « surcorrigée » (voir la troisième droite sur le graphique), qu'il faudrait de nouveau corriger dans l'autre sens pour revenir à la distribution théorique. Hubble se vit ainsi obligé, si l'on désirait garder l'interprétation liée à l'effet Doppler, de recourir à la théorie de la relativité et d'introduire un facteur supplémentaire, celui de « courbure de l'espace-temps ».

Ci-dessous, la loi de la distribution des galaxies selon l'observation, la théorie et en prenant en compte le facteur de récession.



de masse beaucoup plus grande que celle associée aux galaxies – c'est la « masse manquante » de l'univers. De plus, le rayon de l'univers calculé selon l'hypothèse d'une récession des galaxies devient beaucoup plus petit que lorsque nous interprétons le décalage autrement que par la récession. Hubble obtint en effet un rayon de 470 millions d'années-lumière, une quantité du même ordre de grandeur ou même plus petite que la portée maximale du télescope de 2,5 mètres du Mont Wilson, dont les performances ont été depuis largement dépassées !

Néanmoins, même si elle menait à des résultats difficiles à justifier, l'hypothèse de la récession ne pouvait pas être éliminée. Hubble en conclut qu'il était difficile, étant donné le manque de fiabilité des observations de l'époque, de trancher d'une façon décisive. De plus, il était possible que la luminosité des galaxies évolue dans le temps, remettant ainsi en cause l'évaluation des distances, surtout si l'on se rappelle que la lumière qui nous parvient des galaxies les plus éloignées les a quittés depuis bien longtemps.

Il était cependant clair, pour lui, que si les décalages vers le rouge étaient interprétés autrement que par une récession des galaxies, il fallait avoir recours à un principe physique nouveau. Il refusa de trancher pour ou contre le mouvement de récession jusqu'à la fin de sa vie, que ce soit en public ou en privé. Même si l'interprétation « récessionniste » du décalage est celle qui est officiellement acceptée aujourd'hui, nombre de scientifiques reconnus pensent qu'il devrait être expliqué par une perte supplémentaire d'énergie de la lumière tout au long de son parcours, une perte d'énergie peut-être liée à l'effet Compton ou bien à un autre effet inconnu.

Or cela ne constitue qu'un des problèmes les plus immédiats auxquels sont confrontés les astrophysiciens dans leur quête d'une théorie valable pour expliquer l'origine de l'univers.

Il y a aussi les questions liées à la validité des fondements relativistes, reliant la courbure à la densité massique de l'espace-temps, dont Hubble s'est servi pour ses calculs ; si ceux-ci ne constituaient, pour lui, qu'un moyen temporaire de départager entre les deux interprétations

possibles des décalages, ils allaient être par la suite intégrés à la théorie sans qu'il ne se soit définitivement prononcé sur l'opportunité d'une telle démarche, ni sur l'existence d'une alternative. Nous allons d'abord examiner ces fondements de plus près, ainsi que les questions d'ordre philosophiques sous-jacentes, en nous référant essentiellement au célèbre philosophe allemand Gottfried Leibniz (1646-1716) et à ses nombreuses contributions sur les questions de l'espace, du temps, de la substance, du continu et du discontinu, de la dynamique et du calcul différentiel. Les écrits de Leibniz sont caractérisés par une grande rigueur épistémologique et peuvent, de ce fait, constituer un bon point de départ à nos investigations.

Leibniz et la relativité d'Einstein

L'idée qu'il y ait un début à l'espace-temps n'est tout d'abord pas si choquante que cela. Leibniz avait affirmé, dans sa célèbre correspondance avec Clarke, que l'espace et le temps n'avaient rien d'absolu, qu'ils étaient simplement relatifs. Leibniz estimait que l'espace n'était qu'un ordre des coexistences », et le temps un « ordre des successions ». Face aux objections de Clarke, selon qui Dieu pouvait avoir créé le monde, s'il en avait eu envie, des millions d'années plus tôt qu'il ne le fit, avec pour conséquence que les choses auraient été créées dans le même ordre et que personne n'aurait vu la différence, Leibniz répondit que si Dieu avait créé l'univers, sans raison valable, avant tout temps assignable, cela aurait signifié que le monde fut éternel. Or, pour Leibniz, le commencement sera toujours le commencement, y compris le commencement du temps.

Quant à la constitution de l'espace même, Leibniz soutenait qu'il ne pouvait y avoir de *vacuum*, que l'espace ne pouvait être vide. L'un des éléments de preuve qu'il apporta reposait sur le fait que si l'espace était vide ou un corps en soi, quelque chose s'y passerait sans qu'il ne soit justifié par le principe de raison suffisante. En effet, si l'espace était quelque chose d'absolument uni-

forme, les lieux qui le forment ne pourraient être distingués les uns des autres et les choses qui y seraient placées, dans la mesure où elles garderaient leurs positions relatives, pourraient être disposées d'« est en ouest » plutôt que dans le sens contraire, et en cela personne n'y verrait de différence et le choix serait ainsi tout à fait arbitraire, ce qui violerait le principe de raison suffisante. Or si l'espace n'était que l'ordre des choses coexistantes en elles-mêmes, il n'y aurait point de dichotomie possible entre le contenant et son contenu, et il n'y aurait par conséquent qu'une seule disposition possible.

Ces deux principes semblent avoir été repris par Einstein dans sa théorie de la relativité générale. Celle-ci affirme en effet que l'univers serait en quelque sorte un continuum spatio-temporel associé à un champ gravitationnel qui en définit les coordonnées. L'espace-temps ne jouissant pas d'une indépendance vis-à-vis de ce qui le remplit, il dépend des coordonnées, elles-mêmes déterminées par le champ de gravitation. Einstein affirme que « *si le champ de gravitation est éliminé, il ne subsiste absolument rien, pas même un espace topologique* ». Cela semble nous rapprocher de la conception de Leibniz, dans la mesure où, premièrement, l'espace(-temps) d'Einstein ne serait pas vide et où le contenant ne serait pas indépendant du contenu, puisqu'il serait rempli par le champ gravitationnel et, deuxièmement, il aurait un commencement, lié à la formation de ce champ, lui-même dépendant de l'existence du couple matière-énergie, une quantité qui non seulement semble se conserver depuis le début mais qui a dû, on l'imagine, avoir été créée à un moment déterminé. Soulignons ici que la théorie du Big Bang ne nous informe pas sur l'origine de cette quantité primordiale d'énergie (qui va peu à peu se transformer en matière), mais seulement sur l'évolution de la matrice espace-temps et de son contenu depuis l'explosion originelle.

L'analogie entre les conceptions d'Einstein et de Leibniz ne peut toutefois être poussée plus avant. Examinons d'abord ce qu'est le vide. Nous avons dit qu'Einstein ne considérait pas l'espace-temps (en dehors de la matière et/ou de l'énergie)

↳ comme étant vraiment vide, puisqu'il est lié à ce champ qui en détermine les coordonnées. Mais quelle est la nature de ce champ ? Einstein avait isolé ce dernier du concept d'éther, à l'origine identifié à une espèce de substance devant constituer le support du champ. Dans un premier temps, Einstein avait rejeté l'idée que l'éther puisse être le siège de l'énergie électromagnétique puisqu'il avait établi que l'énergie était de nature particulaire et se déplaçait par paquets ou quanta. Ensuite, en raison du principe de relativité selon lequel il ne pouvait y avoir de référentiel au repos absolu, l'éther ne pouvait exister parce qu'il avait

comme principale propriété « mécanique » d'être au repos absolu. Ainsi, dans la théorie d'Einstein, la substance se trouve remplacée par le couple énergie-masse, représentatif du discontinu, et le champ reste seul, sur un pied d'égalité avec le couple matière-énergie, mais représentant le continu puisqu'il détermine les coordonnées du continuum espace-temps. On peut donc conclure que, puisque le champ n'est pas substantiel, l'espace-temps est, en dehors de la masse et de l'énergie, essentiellement vide.

Or Leibniz avait prévu que l'espace, n'étant que l'ordre des coexistences, ne pouvait être vide et devait

par conséquent être rempli d'une substance. En fait, il prévoyait plus précisément l'existence de deux substances, l'une pondérable et l'autre plus subtile : « *Si certains corps apparaissent plus denses que d'autres, cela vient du fait de ce que leurs pores sont plus abondamment remplis de la matière propre au corps, tandis qu'à l'inverse les corps plus raréfiés ont la nature de l'éponge, de telle sorte qu'il se répand dans leurs pores une autre matière plus subtile, laquelle ne compte pour rien dans le corps, et ne suit pas son mouvement ni ne s'y prête.* »²

Quant à la nature de ces deux substances, il n'est pas dit qu'elles

Encadré 3 - La relativité

1. La théorie de la relativité restreinte

La théorie de la relativité restreinte vise d'abord à décrire les relations entre des systèmes de référence (ou de coordonnées) considérés comme rigides et se déplaçant les uns par rapport aux autres à une vitesse uniforme. En effet, toute description d'événements dans l'espace nécessite l'emploi d'un corps rigide auquel ces événements doivent être rapportés, que l'on appelle « système de coordonnées ».

Selon la loi de l'inertie, « *un corps suffisamment éloigné d'autres corps persiste dans son état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme* ». Tout système de coordonnées dont l'état de mouvement est conforme à la loi de l'inertie est appelé « système de coordonnées galiléen ». Il en découle qu'un corps animé d'un mouvement rectiligne et uniforme par rapport à un système de coordonnées galiléen K sera également animé d'un mouvement rectiligne et uniforme dans un système de coordonnées galiléen K'.

Selon le principe de relativité, « *Si K' est relativement à K un système de coordonnées qui effectue un mouvement uniforme sans rotation, les phénomènes de la nature se déroulent, relativement à K', conformément aux mêmes lois générales que relativement à K* ». Ce principe repose sur l'hypothèse qu'il n'est pas possible de pouvoir identifier un système de référence « au repos absolu » par rapport à tous les autres, dans lequel les lois de la nature seraient formulées d'une manière plus simple que toutes les autres. En particulier, la validité de ce principe dépend de l'absence de toute anisotropie dans l'espace, c'est-à-dire que l'expression de lois fondamentales de la nature comme la gravité ou la vitesse de la lumière, par exemple, ne devrait pas changer lorsque le « référentiel Terre » se déplace dans l'espace, ou par rapport à un référentiel qui serait considéré comme absolu. Beaucoup de scientifiques remettent toutefois en cause cette affirmation aujourd'hui, dans la mesure où ils ont constaté, à plusieurs occasions, des manifestations d'anisotropie.

Einstein a construit sa théorie de la relativité restreinte en élevant la constance de la vitesse de la lumière au niveau d'une loi fondamentale de la nature. En effet, dans la

mesure où l'on utilisait, d'après la mécanique classique, le théorème de l'addition des vitesses pour calculer la vitesse de la lumière dans différents systèmes de coordonnées galiléens, la vitesse de la lumière dans le vide était variable et ne constituait pas, d'après le principe de relativité, une loi générale de la nature.

Einstein a réconcilié le principe de relativité et la loi de la vitesse de la lumière dans le vide, en se basant sur deux principes :

1) En introduisant la relativité de la notion de temps entre deux systèmes de coordonnées galiléens. Comme la trajectoire d'un corps en mouvement non uniforme peut être différente selon le système de coordonnées utilisé (par exemple un objet que l'on jette par la fenêtre d'un train aurait une trajectoire rectiligne selon le passager et une trajectoire parabolique selon un observateur situé à côté de la voie ferrée), on peut imaginer que le temps ne soit pas le même selon deux observateurs dans deux systèmes de coordonnées différents. Il s'agit ici de la relativité de la simultanéité, mise en évidence par rapport à la vitesse maximale de propagation de la lumière.

2) En introduisant la relativité de la notion de distance spatiale, entre deux systèmes de coordonnées galiléens.

Einstein a utilisé la transformation de Lorentz (constituée des quatre équations ci-dessous) pour calculer les changements de distance et de temps entre deux systèmes de coordonnées galiléens, sur la base de la constance de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. Plus la vitesse de déplacement relative des deux systèmes augmente, plus le temps s'allonge et plus les distances diminuent. Ces changements ne sont, en vertu du principe de relativité, que des changements réciproques (c'est-à-dire égaux entre eux) et apparents :

$$\begin{array}{ll} 1) x' = (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2} & 3) z' = z \\ 2) y' = y & 4) t' = (t - (v/c^2)x) / \sqrt{1 - v^2/c^2} \end{array}$$

En résumé, la théorie de la relativité restreinte affirme que « *les lois générales de la nature sont invariantes relativement à la transformation de Lorentz* ». Elle remplace l'action instantanée à distance de Newton, ou l'action à distance avec une vitesse de propagation infinie, par l'action à distance avec la vitesse de la lumière c, telle que

soient, contrairement à ce que semblent affirmer nos sens, discontinues. Leibniz affirme qu'« *il y a deux sortes de continus, les uns successifs, comme le temps et le mouvement, les autres simultanés, c'est-à-dire consistant dans la coexistence des parties, comme l'espace et le corps* ». Mais puisque cette « coexistence des parties » qu'est l'espace est continue, il faut que ce qui la constitue – la matière pondérable et la matière non pondérable, « plus subtile », à l'opposé d'une substance simple et indivisible dont nous parlerons plus loin – soit continue. Il écrit : « *Au commencement, lorsque je m'étais affranchi du joug d'Aristote,*

j'avais donné dans le vide et dans les Atomes, car c'est ce qui remplit le mieux l'imagination. Mais en étant revenu, après bien des méditations, je m'aperçus qu'il était impossible de trouver les principes d'une véritable unité dans la matière seule ou dans ce qui n'est que passif, puisque tout n'y est que collection ou amas de parties jusqu'à l'infini. »

Ainsi, pendant longtemps, les physiciens ont considéré que le discontinu était le propre de la matière alors que, selon les variantes, le continu était le propre soit de l'éther, soit du réceptacle qui le contiendrait – l'espace euclidien. Einstein a, quant à lui, tout simple-

ment précisé que l'espace-temps de la relativité générale n'était pas, tout en étant vide et continu, de nature euclidienne. Or nous soulignons de nouveau que, pour Leibniz, l'espace n'est pas un réceptacle : il n'est que l'« ordre des coexistences » et est de ce fait continu à l'image de la matière qui le constitue, elle-même étant divisible à l'infini.

S'il en est ainsi, alors qu'est-ce qui constituerait le discontinu ? Leibniz explique qu'il existe trois sortes de points : des points physiques, qui sont réels mais multiples et divisibles, des points mathématiques, exacts et virtuels, et des points métaphysiques, qui sont exacts et réels.

modifiée par la théorie de la relativité générale.

Cette théorie implique aussi une conception du « monde » à quatre dimensions puisque le temps se voit privé de son indépendance, comme le montre la quatrième équation de la transformation de Lorentz. D'après cette équation, la différence de temps Dt' de deux événements par rapport à K' ne s'annule généralement pas, même si leur différence de temps Dt s'annule par rapport à K . Par ailleurs, la distance spatiale de deux événements par rapport à K peut avoir pour conséquence un intervalle de temps des mêmes événements par rapport à K' .

2. La théorie de la relativité générale

En première approximation, la théorie de la relativité générale peut-être résumée comme suit : « Tous les corps de référence, quel que soit leur état de mouvement, sont équivalents pour la description de la nature. »

Cette théorie est construite sur la base de l'équivalence entre masse inerte et masse pesante, dans la mesure où Einstein a constaté que « *les corps qui se meuvent sous la seule influence du champ de gravitation subissent une accélération qui ne dépend aucunement de la matière ni de l'état physique du corps* ».

Un homme situé dans une cabine fermée (ou tout autre corps de référence) soumise à une accélération peut, par conséquent, conclure que sa cabine est immobile mais située dans un champ de gravitation, variable ou non dans le temps.

Dans un corps de référence en rotation K' (un grand disque, par exemple), un observateur interpréterait la force centrifuge à laquelle seraient soumis les objets comme un champ de gravitation variable selon leur emplacement (le champ serait dans ce cas-ci plus faible vers le centre et plus fort vers la périphérie du disque). De plus, une horloge placée au centre du disque (qui serait au repos par rapport à K) marcherait, selon la théorie de la relativité restreinte, plus rapidement par rapport à K qu'une horloge placée à la périphérie (animée d'une grande vitesse par rapport à K). Aussi, par rapport à K , une règle placée de façon tangentielle près du centre du disque serait plus longue qu'une autre placée de la

même façon mais plus près de la périphérie (car elle serait animée d'une vitesse tangentielle plus grande par rapport à K).

Puisque tous les corps en mouvement rectiligne et uniforme dans un système de référence K décrivent, dans un système de référence accéléré ou soumis à l'influence d'un champ gravitationnel, une trajectoire curviligne, les rayons lumineux devraient, eux aussi dans un champ de gravitation, se propager en décrivant des trajectoires curvilignes et leur vitesse devrait varier selon le lieu. La nature du lieu et du temps serait par conséquent variable pour un corps de référence soumis à un champ gravitationnel. Etant donné que la vitesse de la lumière devrait toujours, s'il existait un champ de gravitation, dépendre des coordonnées de lieu et de temps, nous devons conclure, conformément au principe de relativité générale, que le continuum d'espace-temps ne peut pas être considéré comme un continuum rigide, euclidien. La description du continuum espace-temps devrait par conséquent s'effectuer au moyen d'un autre système de coordonnées que le système euclidien, moins rigide et prenant en compte la variation des géodésiques selon la présence d'un phénomène venant en perturber la morphologie, comme un champ gravitationnel par exemple.

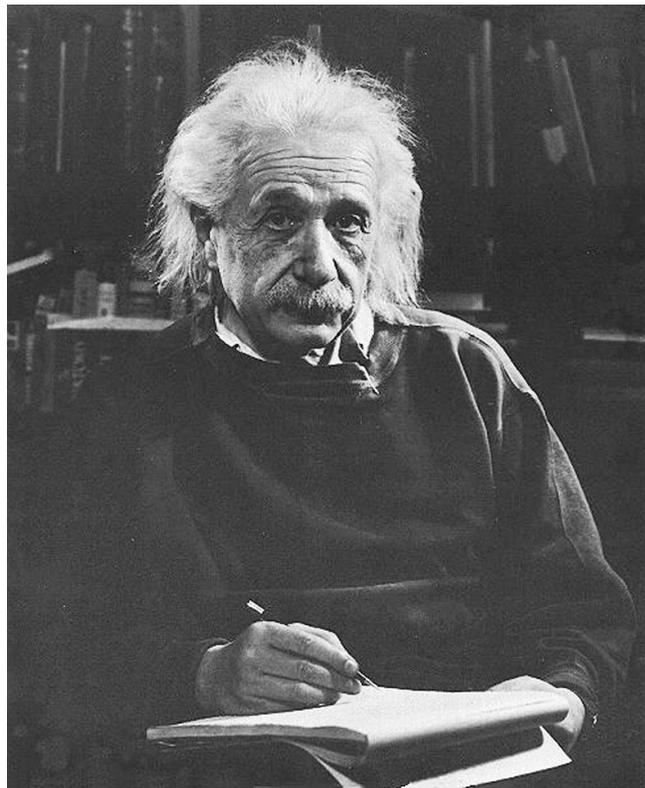
Le système des coordonnées de Gauss est conforme à cette exigence et c'est pourquoi la théorie générale de la relativité peut être énoncée exactement comme suit : « *Tous les systèmes de coordonnées de Gauss sont en principe équivalents pour la formulation des lois générales de la nature.* »

La physique newtonienne attribuait au temps et à l'espace une existence indépendante de ce qu'il contient. Selon Newton, si la matière disparaissait, seuls l'espace et le temps resteraient. Or, selon la théorie de la relativité générale, l'espace-temps ne jouit pas d'une indépendance vis-à-vis de ce qui le remplit, il dépend des coordonnées, elles-mêmes déterminées par le champ de gravitation. Si le champ de gravitation est éliminé, il ne subsiste absolument rien, pas même un espace topologique car les fonctions mathématiques définissant le champ, définissent aussi simultanément les propriétés de structure, topologiques et métriques, de la multiplicité. Un espace vide, c'est-à-dire un espace sans champ n'existe pas.

Il écrit : « *Il n'y a que les atomes de substance, c'est-à-dire les unités réelles et absolument dépourvues de parties, qui soient les sources des actions, et les premiers principes absolus de la composition des choses, et comme les derniers éléments de l'analyse des choses substantielles. On les pourrait appeler points métaphysiques : ils ont quelque chose de vital et une espèce de perception, et les points mathématiques sont leurs points de vue, pour exprimer l'univers. Mais quand les substances corporelles sont resserrées, tous leurs organes ensemble ne font qu'un point physique à notre égard. Ainsi les points physiques ne sont indivisibles qu'en apparence : les points mathématiques sont exacts, mais ce ne sont que des modalités : il n'y a que les points métaphysiques ou de substance qui soient exacts et réels, et sans eux il n'y aurait rien de réel, puisque sans les véritables unités il n'y aurait point de multitude.* »

Ces points métaphysiques sont ce que Leibniz appelle les « substances simples » – les « monades ». Il y en a trois sortes : les monades caractérisées par une activité inorganique, que Leibniz appelle les « entéléchies », les monades caractérisées par une activité organique, les « âmes » brutes dotées seulement de mémoire, et les monades caractérisées par une activité cognitive, les « esprits » qui sont des âmes dotées de raison. Nous ne discuterons pas davantage cet aspect des travaux de Leibniz car cela nous éloignerait trop de notre sujet. Nous voudrions cependant souligner que ce sont ces substances simples qui sont à l'origine du « mouvement », comme Leibniz l'affirme dans le passage suivant : « *Je connais point ces masses vaines, inutiles et dans l'inaction dont on parle. Il y a de l'action partout, et je l'établis plus que la philosophie reçue, parce que je crois qu'il n'y a point de corps sans mouvement, ni de substance sans effort.* » Il précise ailleurs : « *Aussi suis-je persuadé que, suivant les lois de la nature, le corps fait toujours des efforts pour agir et qu'une matière sans aucune action ou effort est aussi chimérique qu'un lieu sans corps.* »

Pour Leibniz, il n'y a dans un certain sens pas de référentiel absolu puisqu'il n'y a pas d'espace ni de temps absolus et, à première vue, Einstein semble en cela le rejoindre. Néanmoins, cela n'empêche



Albert Einstein.
Sa théorie de la relativité laisse en suspens une question essentielle : pourquoi le champ gravitationnel, plus que le champ électromagnétique, déterminerait-il la courbure de l'espace-temps ?

en rien l'existence de cette matière « subtile » constituant la trame de l'espace. De plus, l'approche leibnizienne nous paraît beaucoup plus rigoureuse, dans la mesure où elle permet d'éviter le paradoxe entre le continu et le discontinu qui a longtemps hanté les physiciens et qui, visiblement, n'est toujours pas résolu. Une question persiste toutefois : quelle serait la relation entre cette matière « subtile » dont parle Leibniz et la matière pondérable qui, à défaut d'être discontinue, se présente à nos sens de façon discrète ? L'hypothèse qu'a développée Jonathan Tennenbaum dans un article intitulé « Un modèle topologique de la génération des particules », nous permet de concevoir une alternative intéressante.³ La matière « subtile », non pondérable et continue, caractérisée par une activité de type ondulatoire pourrait passer, sous l'action des substances simples (les monades), par une phase d'« onde de choc » et se transformer en particules. Ces particules, discrètes et pondérables en apparence, « transporteraient avec elles » leur propre matière subtile et non pondérable. Elles seraient en réalité formées de matière continue, habitées par une substance simple discontinue, tout en ayant l'apparence d'être discontinues. Le paradoxe onde-particule

se trouverait résolu par la même occasion.

Il serait intéressant de s'attarder quelques instants sur les liens pouvant exister entre cette matière non pondérable et les phénomènes de la gravitation, de la propagation de la lumière et de la chaleur. Le grand mathématicien allemand Bernhard Riemann (1826-1866), à qui nous devons, dans son discours d'habilitation *Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie*, la première tentative de développer une méthode permettant de déterminer les véritables caractéristiques métriques de l'espace « physique », s'est grandement inspiré des conceptions de Leibniz. Dans ses fragments philosophiques (III^e partie)⁴, Riemann suppose l'existence d'une « substance qui remplit l'espace » et qui est « un fluide homogène incompressible, sans inertie ». Cela nous évoque quelque chose ressemblant à cette matière « subtile » dont parlait Leibniz. Riemann conclut que si l'effet de la gravitation universelle sur un atome pondérable peut être exprimé à l'aide de la pression de cette substance qui remplit l'espace dans le voisinage immédiat de l'atome, il s'ensuit que cette même substance « doit propager les vibrations que nous percevons comme étant la lumière et la chaleur ». Ainsi, il en

arrive à la conclusion que les phénomènes de gravitation et d'électromagnétisme doivent être expliqués par le même concept. Ceci est contraire à l'approche de Maxwell, qui allait développer un concept d'éther purement basé sur la propagation de l'énergie électromagnétique et à partir duquel il était impossible d'expliquer le phénomène de la gravitation universelle (ni même l'existence de l'électron que l'on allait découvrir plus tard !). Elle est également contraire à celle d'Einstein qui allait postuler un champ gravitationnel privé de toute substance (comprise ici comme matière non pondérable). Riemann précise : « [...] tous les effets provoqués par les corps pondérables sur les corps pondérables à travers l'espace vide doivent être propagés par cette substance. De ce fait, toutes les formes de mouvement dans lesquelles consistent la lumière et la chaleur, que les corps célestes se transmettent les uns aux autres, doivent également être des formes de mouvement de cette substance. Cependant, ces deux phénomènes, la gravitation et le mouvement de la lumière à travers l'espace vide, sont les seuls qui doivent être uniquement expliqués au moyen des mouvements de cette substance. »

Nous constatons, à la lumière de ce qui vient d'être dit, que la théorie de la relativité d'Einstein laisse en suspens une question que nous estimons être essentielle : pourquoi le champ gravitationnel, plus que le champ électromagnétique, déterminerait-il la courbure de l'espace-temps ? Quelle est la nature exacte de la relation entre gravitation et électromagnétisme ? Aussi, on ne voit pas pourquoi un simple calcul de la densité massique de l'univers devrait nous permettre d'en déterminer la courbure ou le rayon, sans prendre en compte l'existence de cette matière non pondérable qui serait, si Leibniz et Riemann avaient raison, à l'origine des phénomènes gravitationnels et électromagnétiques que nous pouvons observer.

Les origines de la dynamique

Nous arrivons ici au terme de notre enquête préliminaire. S'il semble

d'emblée acquis qu'il faille revoir les fondements (au moins métaphysiques, sans parler des fondements physiques qui ont déjà été discutés dans d'autres articles de *Fusion*) de la relativité, cela se signifie pas que l'on doive pour autant revenir à un espace et à un temps absolus, c'est-à-dire à un contenant caractérisé par une métrique euclidienne pour ce qui concerne l'espace, ou à nier la possibilité que l'univers ait un commencement pour ce qui concerne le temps. De plus, l'idée selon laquelle l'origine de l'univers se résumerait à une histoire de Big Bang ou de Big Crunch, ou à une succession de ces deux phases, à une sorte d'« univers accordéon », ne nous permet certainement pas de dégager un concept d'évolution, ni même de développer les critères nécessaires à l'évaluation du progrès accompli depuis le début. D'ailleurs, le processus d'expansion et/ou de contraction de l'univers obéirait-il seulement à des considérations mécaniques, ou y aurait-il une autre cause d'action dans l'univers ? C'est ici que Leibniz se porte, une fois de plus, à notre secours : « Quoique je sois persuadé que tout se fait mécaniquement dans la nature corporelle, je ne laisse pas de croire aussi, que les principes même de la mécanique, c'est-à-dire les premières lois du mouvement, ont une origine plus sublime que celle que les mathématiques peuvent fournir. »

La nécessité de développer une « science de la dynamique » complète est d'ailleurs ce qui a mené Leibniz, indépendamment de sa volonté de définir des substances simples qui soient vraiment indivisibles, à « réhabiliter les formes substantielles, si décriées aujourd'hui » : « Je trouvai donc que leur nature consiste dans la force et que de cela s'ensuit quelque chose d'analogique au sentiment et à l'appétit ; et qu'ainsi il fallait les concevoir à l'imitation de la notion que nous avons des âmes. [...] Aristote les appelle entéléchies premières, je les appelle peut-être plus intelligiblement forces primitives, qui ne contiennent pas seulement l'acte ou le complément de la possibilité, mais encore une activité originale. Je voyais que ces formes et ces âmes devaient être indivisibles, [...] et que toute substance simple qui a une véritable unité, ne pouvant avoir son commencement ni sa fin que par miracle, il s'ensuit qu'elles ne sau-

raient commencer que par création ni finir que par annihilation. Ainsi j'étais obligé de reconnaître qu'il faut que les formes constitutives des substances aient été créées avec le monde, et qu'elles subsistent toujours. »

Les parties matérielles pondérables et non pondérables de l'univers obéiraient sans doute à des processus mécaniques mais, selon Leibniz, le siège de l'activité se trouve localisé dans ses monades, alors que celui de la passivité se situe dans la matière. Cette activité, qu'il appelle « force », est autre chose que la quantité de mouvement puisque Leibniz avait démontré, au grand désespoir des cartésiens, que seule la force se conservait. Ce concept préfigure la notion moderne d'énergie mais il est plus riche dans la mesure où il est associé à l'existence des trois types de monades. Soulignons à ce propos que les partisans de la théorie du Big Bang, pas plus que ceux d'autres théories cosmologiques ou que Leibniz lui-même, ne seraient en mesure d'expliquer d'où provient la quantité d'énergie ou de force dynamique originale, mais il est clair que quelque chose se conserve alors qu'en même temps quelque chose évolue. Leibniz rejetait la possibilité pour le monde matériel d'un mouvement perpétuel mais il refusait aussi, comme il l'a précisé dans sa correspondance avec Clarke, que Dieu soit obligé d'intervenir à tout moment pour remonter « l'horloge qu'il avait créée ». Ses monades constituaient en quelque sorte le moteur du monde, dotées au moment de leur création d'une activité indépendante.

En conséquence, comme le pensaient Pasteur, le scientifique russe Vernadski et comme le pense aujourd'hui l'économiste américain Lyndon LaRouche, les trois processus inorganique, organique et cognitif doivent être présents dans l'univers dès le début. Si les lois de la mécanique indiquent que l'univers est condamné à une mort thermique soit « chaude », soit « froide », selon les différents scénarios découlant d'une interprétation mécaniste du second principe de la thermodynamique, comment pouvons-nous alors expliquer la présence de l'homme dans l'univers ? Quel est d'ailleurs son rôle ou quelle est la nature de sa relation avec cet univers qui, ne l'oublions pas, le contient ? Cela constitue le cœur de

↳ l'approche philosophique développée par Lyndon LaRouche. Ainsi, toute cosmologie qui se respecte devrait tenir compte non seulement de tous les processus présents dans l'univers, c'est-à-dire inorganiques, organiques et cognitifs, mais aussi du continu et du discontinu, du passif et de l'actif : c'est la seule façon d'éviter que se révèlent, au moment le moins propice, des contradictions fondamentales.

Nous ajoutons que Leibniz estimait que l'on ne pouvait se contenter, si l'on voulait obtenir des réponses satisfaisantes, d'avoir recours aux causes efficientes. Il faut aussi faire appel aux causes finales car, selon lui, « souvent la fin et l'usage fait deviner le comment, parce qu'en connaissant la fin, on peut mieux juger des moyens ».

Précisons ici que lorsque nous parlons de causes finales, il ne s'agit pas ici de chercher une cause externe à l'univers, mais tout simplement une raison d'être pour tout ce qui s'y trouve, en particulier pour les trois processus que nous avons identifiés. Les objectifs de la physique sont, il est vrai, relativement limités dans la mesure où on la cantonne au domaine de la mécanique. Toutefois, cela ne signifie pas que l'on doive pour autant ignorer les processus vivants et cognitifs car ils font partie, que nous le voulions ou non, de l'univers. Or il semble bien que la tâche qui consiste à comprendre comment ces trois phénomènes interagissent et pourquoi ils existent, ait échoué, ne serait-ce que par défaut, à la philosophie. Ceci pourrait évidemment constituer aux yeux de certains une brèche au bon fonctionnement de la science (définie dans son acception la plus restrictive) mais nous estimons devoir inclure ce type de considérations dans la mesure où toute physique repose, en fin de compte, sur des conceptions philosophiques et même métaphysiques.

Caractéristiques des grands modèles cosmologiques

La plupart des modèles cosmologiques dérivent d'un nombre particulièrement limité de paramètres comme la constante de Hubble H ,

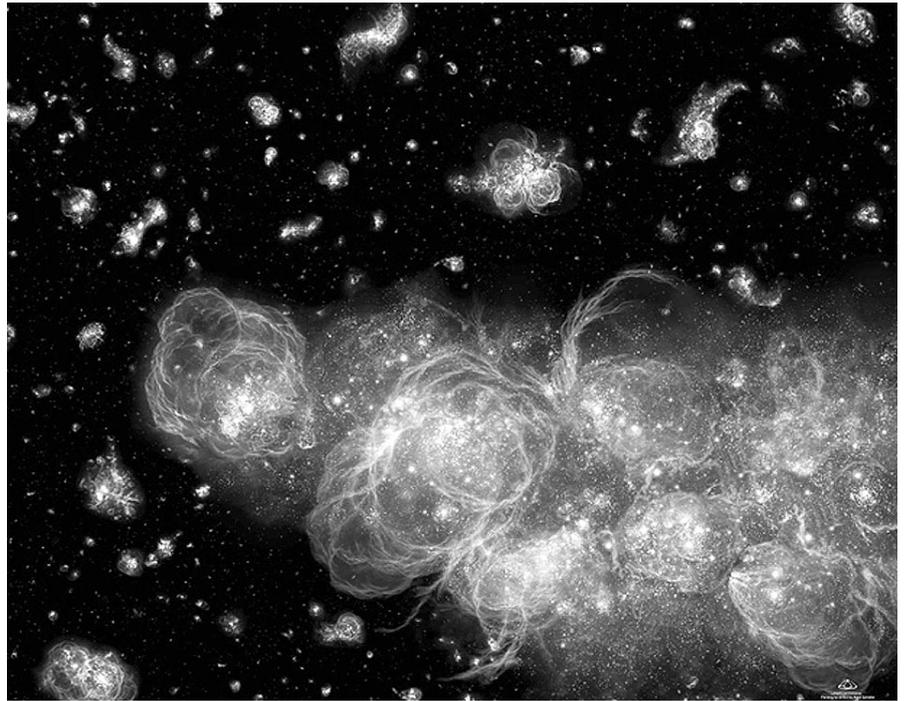


Illustration d'artiste de ce qu'aurait été l'univers jeune de 1 milliard d'années.

la constante cosmologique Λ , la densité critique ρ_{crit} , le paramètre de décélération q et la courbure de l'univers κ , qui sont reliés par un système d'équations mathématiques. H est le rapport entre la vitesse de récession des galaxies et leur distance par rapport à nous puisque, comme nous l'avons vu plus haut, il existe une relation linéaire entre le décalage vers le rouge et l'éloignement des galaxies. Nous supposons évidemment encore ici, dans le cadre des modèles dérivés du Big Bang, que le décalage vers le rouge est une indication de la vitesse de récession. Lorsque nous considérons des galaxies tellement éloignées que leur vitesse de récession atteint la vitesse limite de la lumière, le temps que met leur lumière pour arriver jusqu'à nous correspond à l'âge maximal de notre univers, le « temps de Hubble » $1/H_0$ (l'indice « 0 » indique qu'il faut utiliser ici la valeur actuelle de la constante de Hubble, puisqu'elle varie dans le temps). La densité critique ρ_{crit} correspond à la densité de matière nécessaire pour passer d'un univers en expansion à un univers en contraction, selon des conditions que nous allons expliciter plus loin, et définit ainsi la limite entre certaines catégories de modèles.

Le Big Bang et ses dérivés

Einstein fut l'un des premiers, à l'aide de sa théorie de la relativité, à essayer de calculer les caractéristiques physiques de l'univers. Il allait, à cette fin, formuler en 1915 ses célèbres « équations de champ ». En raison de leur très grande complexité, Einstein ne pensait pas qu'il serait possible de résoudre ces équations et d'en tirer des informations pratiques sur la nature de l'univers. Cependant, après que Schwarzschild eut réussi en 1916 à en percer le mystère, il allait lui-même essayer d'en déduire un modèle concret. Celui-ci impliquait que l'univers soit en expansion mais il rejeta d'abord cette possibilité. C'est pourquoi il fut amené à introduire dans ses équations la constante cosmologique Λ , afin d'obtenir un univers statique et uniforme. Ce résultat était par ailleurs prévisible puisque la matière se serait agglutinée en raison de la gravitation et seule une force inconnue, à défaut d'une dynamique d'expansion, aurait permis de prévenir une situation aussi fâcheuse. Ses calculs allaient, avec ceux de De Sitter effectués eux aussi en 1917, constituer ce qui allait être appelé plus tard, à la suite d'une synthèse effectuée en 1932, le modèle Eins-

tein-De Sitter. Ce modèle implique, contrairement au modèle original d'Einstein, un univers de dimension infinie et ayant une courbure globale nulle. Il mène aussi à un univers en expansion puisque, ayant finalement adopté l'interprétation récessionniste du décalage vers le rouge, on a attribué à la constante cosmologique Λ une valeur égale à zéro.

La deuxième catégorie est constituée des modèles de type Friedmann-Lemaître, lesquels se divisent en deux sous-catégories : la première est celle des univers de volume fini, fermés et dont le rayon de courbure est positif si la densité massique est plus grande que la densité critique ρ_{crit} ; la deuxième est composée des univers de volume infini, ouverts et de rayon de courbure négatif si la densité massique est plus petite que la densité critique ρ_{crit} . Friedmann avait en effet déterminé que si la constante cosmologique était égale à zéro, on obtenait l'univers Einstein-De Sitter dans le cas où la densité était égale à la densité critique ρ_{crit} , et l'une des deux sous-catégories précédentes selon que la densité fut plus grande ou plus petite que la densité critique ρ_{crit} . Nous voyons maintenant pourquoi il est important pour les astrophysiciens de déterminer la densité massique actuelle de l'univers.

Tous ces modèles reconnaissent donc implicitement ou explicitement un univers en expansion à partir d'un Big Bang originel. Certains d'entre eux nous conduisent toutefois vers une mort thermique par « congélation », alors que d'autres aboutissent à un Big Crunch, à savoir une mort thermique par « embrasement », dans le cas où la phase d'expansion serait suivie d'une phase de contraction.

Ces modèles nous donnent un univers âgé, selon les sources et les différentes estimations de la constante de Hubble H_0 , de 9 à 15 milliards d'années. La valeur actuelle de la constante de Hubble est aujourd'hui très débattue car s'il est vrai qu'il est relativement facile de calculer la vitesse de récession des galaxies (en fonction du décalage vers le rouge), il n'en va pas de même pour leur distance qui demande d'avoir recours à des techniques impliquant de plus grandes incertitudes. Ainsi, on situe aujourd'hui la valeur de H_0 dans la fourchette de 60 à 75. Ceci explique

l'incertitude en ce qui concerne l'âge de l'univers calculé à partir de ces modèles.

Quoiqu'il en soit, le problème majeur, en termes physiques, réside dans le fait que la fenêtre d'opportunité pour la formation des galaxies semble quasiment inexistante. En effet, les galaxies n'auraient pas pu se former avant que ne se soient écoulées quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang, puisque, avant cette période, la pression due à l'expansion de l'univers était encore trop élevée ; par la suite, la matière aurait été trop dispersée pour donner naissance aux galaxies actuelles.

Quant au problème philosophique plus profond, à savoir qu'elle est l'origine du monde, selon tous les modèles dérivés de la théorie de la relativité générale, l'instant $t = 0$ constitue, dans les équations utilisées à cette fin, une singularité pour laquelle les équations n'offrent aucune solution car les caractéristiques métriques du continuum espace-temps s'effritent. Ainsi, le Big Bang en tant que tel ne compte pas parmi les événements physiques constituant la trame de l'espace-temps car l'instant $t = 0$ se trouve, pour ainsi dire, « en dehors de l'espace-temps ».

De plus, en ce qui concerne l'origine du couple énergie-matière, il n'y aurait en vertu de ce que nous venons de dire tout simplement pas d'origine puisque les choses ne peuvent avoir leur origine que dans le temps ; or le temps n'existe pas au moment $t = 0$. Si l'on raisonnait en termes plus « physiques », en ayant recours au principe de la conservation de l'énergie (et de la matière qui lui est associée) pour voir vers ce que nous obtiendrions, nous serions amenés à supposer que celui-ci puisse être violé au moment $t = 0$ afin de permettre la création de cette énergie originelle ; or nous avons non seulement établi que $t = 0$ n'est pas dans le temps mais nous devons aussi ajouter que, à l'instant $t = 0$, les « équations-mères » n'attribuent au terme énergie aucune définition. Cela signifie que le principe de conservation de l'énergie n'entre pas en compte puisque quelque chose ne peut se conserver que dans le mesure où il est défini et où il est dans le temps. Nous concluons donc que le Big Bang et les modèles dérivés de

la relativité générale ne nous disent pas grand-chose sur l'origine de l'espace-temps. En effet, puisque le Big Bang ne fait pas partie de l'espace-temps, comme nous l'avons établi précédemment, nous ne sommes pas en mesure d'en déterminer les caractéristiques. Et même si nous admettions, contrairement à ce nous avons dit, qu'il en fit partie, il n'expliquerait pas l'origine de l'espace et du temps.

L'univers stationnaire

L'autre grand groupe est constitué des modèles d'univers stationnaires, développés en opposition à la théorie du Big Bang en 1948. Ils ont leur origine dans les travaux de Hoyle, Bondi et Gold, qui avaient postulé un univers infiniment vieux, sans commencement ni fin, mais qui était en expansion constante.

En termes physiques, cette théorie repose sur le « principe cosmologique parfait », qui exige que l'univers soit homogène (il doit être le même partout) et isotrope (il doit apparaître comme étant le même dans toutes les directions), aussi bien d'un point de vue spatial que temporel. Il en découle que les lois de la physique doivent demeurer constantes. Cela ne signifie pas pour autant que l'univers soit statique car il atteindrait rapidement, dans ce cas, un état d'équilibre thermique, ce qui serait contraire au second principe de la thermodynamique ou à la « flèche du temps ». Si tout est en mouvement et que l'univers demeure malgré tout isotrope, il faut alors supposer que tout est en expansion ou, au contraire, en contraction. Si l'on choisit l'expansion, afin de rester conforme à l'interprétation récessionniste du décalage vers le rouge, cela signifie que de l'espace neuf doit être continuellement créé en même temps que de la matière nouvelle, car le principe cosmologique parfait exige que la densité massique de l'univers demeure toujours la même. La constante de Hubble est interprétée ici comme le taux de création de matière nouvelle, et doit demeurer constante dans le temps. Cette théorie stipule que la matière est créée au rythme de 10^{-43} g/s.cm³, ce qui est malheureusement trop peu pour que l'on puisse détecter le phénomène et lever le doute par l'expérience.

Si l'univers est en expansion, il

↳ faut aussi admettre, en vertu du principe cosmologique parfait, que son rayon de courbure soit constant, donc infini, ou, ce qui revient au même, qu'il n'ait aucune courbure. Dans ce cas, nous aurions affaire à un univers plat.

Ce modèle a été rejeté par la majorité des astrophysiciens pour des raisons liées à diverses observations astronomiques, mais il est toujours défendu par une minorité active et a été mis à jour pour le rendre compatible notamment avec le principe de conservation de l'énergie.

Examinons maintenant la question du point de vue philosophique.

D'abord, le fait que l'univers obéisse au second principe de la thermodynamique (et ne soit pas de ce fait en équilibre thermique) implique-t-il nécessairement qu'il soit en expansion ? Si l'on tenait compte de l'expansion de la noosphère, c'est-à-dire de la sphère liée à l'activité humaine, et si l'on supposait que cette expansion non seulement se confirme mais qu'elle s'accélère dans le temps, l'univers ne pourrait-il pas dans ce cas être statique sans jamais atteindre l'équilibre thermique ? L'activité humaine constituerait, dans ce cas, l'une des composantes principales de la flèche du temps.

Il semble donc que l'expansion ne soit pas nécessaire du point de vue philosophique. Rappelons que le phénomène d'expansion « observé » par les astronomes ne découle que d'une simple interprétation récessionniste du décalage vers le rouge.

Ainsi, la création continue d'espace-matière n'est envisagée que pour répondre aux exigences liées à une interprétation particulière du second principe de la thermodynamique et des résultats expérimentaux. L'idée de création continue soulève par ailleurs une autre objection, encore plus fondamentale : si l'on accepte que la matière soit créée en même temps que l'espace, conformément à l'exigence de Leibniz, comment cela peut-il se faire de façon continue puisque si l'on crée quelque chose de continu (comme l'espace), on ne peut le faire que d'un seul coup et non par parties. Il aurait donc fallu que l'espace soit créé dès le début. Nous apportons cependant une distinction importante : nous pourrions peut-être concevoir



Le physicien suédois Hannes Alfvén. Il avait prédit en 1961 l'existence de structures filamenteuses (semblables aux filaments de plasma observés en laboratoire) à l'échelle astronomique, des structures qui ont été en effet découvertes en 1991.

la « création » continue de matière pondérable, à l'opposé de la matière non pondérable qui aurait été, si l'on veut demeurer fidèle à Leibniz, créée « de façon consubstantielle » à l'espace dès l'origine. Il en découlerait que la densité massique de l'univers augmenterait avec le temps, ce qui serait certainement contraire au principe cosmologique parfait. Mais rien ne nous dit que ce principe soit fondamental.

Nous préférons donc garder de la théorie du Big Bang l'idée d'un commencement à l'espace et au temps, et de la théorie stationnaire l'idée que la matière pondérable n'ait pas été créée d'un seul coup, selon la distinction supplémentaire que nous avons ajoutée. Pour ce qui concerne la dimension totale de notre univers et sa courbure, le rejet d'un rayon de courbure total fini ne signifie pas que l'on doive nécessairement en conclure que l'univers est euclidien, sans courbure. L'idée qu'une courbure à l'échelle microscopique définisse une courbure globale découle en effet de la théorie de la relativité, qui ne considère que le champ gravitationnel comme facteur déterminant les caractéristiques du continuum espace-temps. Quant à l'expansion, qu'elle se fasse par étirement ou par ajout, elle nous semble difficile à justifier et ne constitue en aucun cas un critère nous permettant de définir en

quoi notre univers évoluerait.

L'univers plasma

La théorie de l'univers plasma a été développée par le scientifique suédois Hannes Alfvén, qui avait prédit en 1961 l'existence de structures filamenteuses (semblables aux filaments de plasma observés en laboratoire) à l'échelle astronomique, des structures qui ont été en effet découvertes en 1991. Il part du point de vue que 99,999 % de la matière observable dans l'univers est constituée de plasma. Celui-ci peut se trouver à des températures allant pratiquement du zéro absolu jusqu'au milliard de degrés, avec des densités (en termes du nombre d'ions et d'électrons par mètre cube) très diverses. Cette théorie accorde aux phénomènes magnétiques et électriques une place aussi importante que la gravitation, et permet d'expliquer de façon satisfaisante la formation de galaxies plus ou moins inhabituelles comme les quasars, ainsi que l'existence d'un grand nombre d'étoiles doubles et multiples.

Elle met l'accent sur la grande hétérogénéité de l'univers, inexplicable par la théorie du Big Bang. L'univers serait divisé en cellules plus ou moins isolées du point de vue électrique, présentant d'importantes différences au niveau du magnétisme,

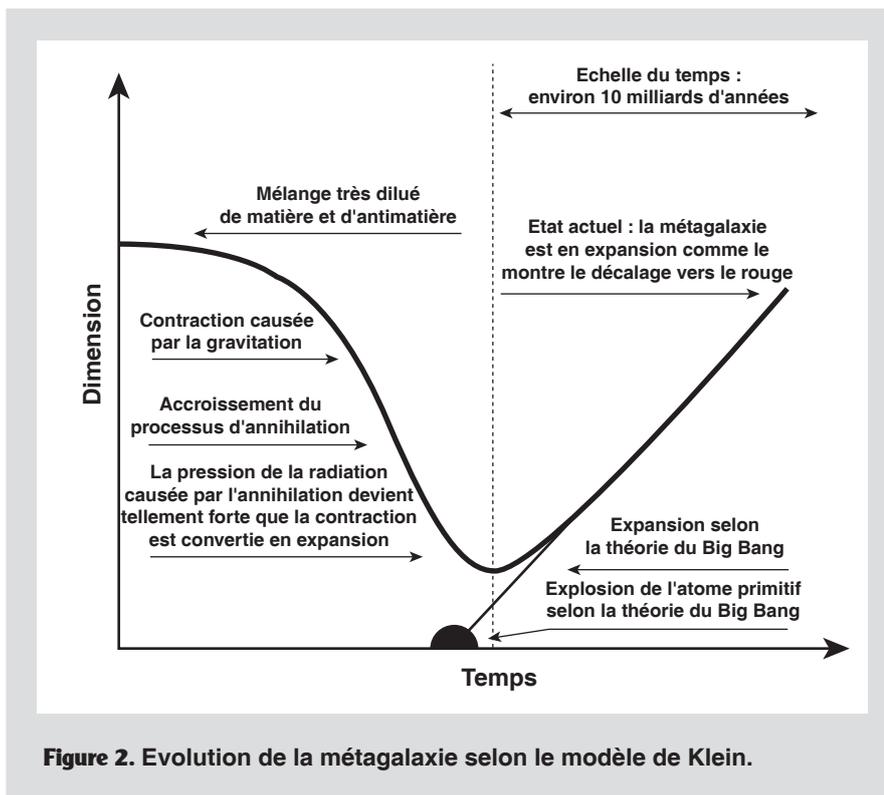


Figure 2. Evolution de la métagalaxie selon le modèle de Klein.

de la température, de la densité et même de la composition chimique. L'univers pourrait aussi connaître des transferts d'énergie sur de très grandes distances et montrer des signes d'agitation importante en raison du comportement non linéaire des plasmas.

S'inspirant des travaux de Klein ⁵, Alfvén envisage la possibilité que l'univers puisse être constitué, à l'opposé des cosmologies dérivées du Big Bang et de la création continue, d'une quantité égale de matière et d'antimatière. Cela serait possible dans la mesure où sa structure « cellulaire » permettrait une « coexistence » paisible de matière et d'antimatière, chaque cellule ne contenant que l'une des deux formes. Alfvén propose de concevoir un univers selon les spécifications suivantes :

- il doit être symétrique du point de vue de la matière et de l'antimatière ;
- l'expansion de Hubble doit être expliquée par des processus connus (comme la libération d'énergie par le processus d'annihilation de la matière et de l'antimatière) et couvrir une région de 10 milliards d'années-lumière ;
- il ne doit pas y avoir de quantité importante de masse manquante ;
- il doit être non homogène et

avoir une structure cellulaire.

La cosmologie de Klein stipule que l'univers consistait il y a longtemps en une large sphère de plasma de matière et d'antimatière qui se serait contractée pendant un certain temps sous l'effet de la gravitation, jusqu'à ce que la matière et l'antimatière soit suffisamment dense pour que se produise un important phénomène d'annihilation. L'énergie produite par ce phénomène aurait ensuite, à partir d'un point de retournement, provoqué une expansion, celle que nous semblons observer aujourd'hui (figure 2).

Alfvén suggère de reconstruire l'histoire de cette évolution jusqu'au point de retournement, et de laisser de côté les spéculations sur la partie antérieure de la courbe, y compris celles concernant l'origine de notre univers. Cette approche pragmatique peut sans doute être très utile, mais la question est maintenant de savoir jusqu'où nous pouvons aller sans faire d'hypothèse sur l'origine de la matière-antimatière, de l'espace et du temps.

La grande variété d'interactions et le grand nombre de processus auxquels sont soumis les plasmas nous semblent particulièrement intéressants (et peuvent probablement satisfaire notre appétit pour un certain temps). Il nous reste ce-

pendant à déterminer s'il existe une directionnalité dans leurs modes d'organisation qui nous permette de définir les caractéristiques d'une évolution générale de l'univers.

La cosmologie quantique

La dernière grande famille à examiner est celle de la cosmologie quantique qui, contrairement à la cosmologie dérivée de la relativité générale, s'intéresse plus particulièrement au microcosme. La mécanique quantique donne malheureusement souvent lieu à des interprétations plutôt abstraites, servant de base à une succession (d'ailleurs très rapide) de modèles très ésotériques.

L'un des modèles récents, celui de Mario Cosentino ⁶, se démarque par son approche plus concrète. Il s'appuie sur une étude attentive des « étalons naturels » de la physique quantique comme la longueur, le temps et la masse de Planck, et permet de déduire certaines valeurs absolues comme la température de l'univers et, entre autres choses, d'apporter une explication crédible au décalage vers le rouge. Il fait par ailleurs appel aux notions « classiques » de la cosmologie quantique, comme celles de vide plat, de faux vide et de vrai vide.

Selon ce modèle l'univers serait à l'origine formé d'un faux vide, plein d'énergie et de mini-trous noirs de la masse de Planck. Des ondes de choc (provenant d'une cause extérieure) se déplaceraient ensuite à la vitesse de la lumière depuis chacun des mini-trous noirs, « polarisant » graduellement l'ensemble de l'univers pour donner naissance à la lumière et aux particules de matière et d'antimatière. Le faux vide se transformerait du même coup en vrai vide, subsistant avec une énergie minimale déterminée par les lois de la mécanique quantique. Ce modèle suppose une première période d'« expansion » de 18 milliards d'années (liée à la propagation de l'onde de choc), suivie d'une période statique de 60 milliards d'années, menant jusqu'à aujourd'hui. Cela donnerait le temps nécessaire, malgré la grande homogénéité de départ, à la formation des grandes structures cosmiques que nous observons aujourd'hui, comme le Grand Mur de galaxies qui représente environ un seizième du ciel observable.

Si nous admettons qu'il soit *a priori* possible de concilier le concept de faux vide « plein d'énergie et de mini-trous noirs » avec celui de « matière non pondérable » défendu par Leibniz, il est par contre évident que le vrai vide n'est pas compatible avec sa définition de l'espace comme « ordre des coexistences ». Quant à la notion d'onde de choc polarisante, l'idée nous semble légitime mais elle n'explique que l'existence de l'énergie (entendue ici comme « énergie du vide » ou quintessence), de la lumière et de la matière, et non celle des processus organiques et cognitifs que nous supposons être présents dès l'origine. Quant à la question de l'origine de l'univers en tant que telle, ce modèle n'apporte pas de réponse satisfaisante, pas plus d'ailleurs que les autres théories quantiques.

Conclusion

Ainsi, non seulement les modèles ou théories cosmologiques sont-ils incapables de décrire de façon satisfaisante l'ensemble des paramètres définis par l'observation astronomique, mais ils sont de plus incapables de résoudre la question de l'origine de notre univers, ni celle de l'existence de celui-là même qui effectue les observations, c'est-à-dire l'homme. Nous pouvons facilement concéder que la question de l'ori-

gine de l'univers est une hypothèse ne pouvant être démontrée que par la philosophie. Mais pour ce qui concerne l'existence de l'homme, le silence des théories actuelles est beaucoup plus embêtant. Il est vrai que le Big Bang a souvent été utilisé par les partisans d'un néopositivisme pour qui l'origine de l'univers peut être expliquée sans avoir recours à un quelconque principe de transcendance. L'existence de l'homme ne pose pour eux aucun problème, puisqu'elle n'est que la résultante de processus chimiques et mécaniques, indépendamment de toute finalité. Toutefois, le Big Bang a aussi servi de référence aux cercles mystiques qui y voient, dans la mesure où il attribue à l'espace-temps physique un commencement, une preuve directe de l'existence de Dieu. L'existence de l'homme ne pose pour eux pas de problème non plus car elle découle simplement de la volonté immédiate de Dieu. Mais aucune de ces deux approches n'est véritablement satisfaisante. La volonté de se libérer de ces deux formes de déterminisme a, quant à elle, mené plusieurs penseurs à se diriger, en raison du principe d'incertitude d'Heisenberg et de l'indéterminisme qu'il contient, vers les théories d'origine quantique qui ont été reprises à maintes occasions par les partisans du Nouvel Age et les Gnoses (dont la Gnose de Princeton). Nous estimons pour notre part que la rigueur épistémologique de Leibniz nous permet d'échapper à ce genre

de dilemme car elle ne repose ni sur la logique cartésienne ni sur le mysticisme, qui ne peuvent ni l'un ni l'autre servir de base à une approche véritablement scientifique. Il reste donc à élaborer une approche plus compétente et nous espérons que le bref examen des axiomes sous-jacents que nous avons entamé ici se révélera utile. ■

Notes

1. En 1842, Johann Christian Doppler, un mathématicien et physicien viennois, avait prévu que si un observateur était en mouvement relatif par rapport à une source d'ondes, la longueur d'onde mesurée par cet observateur changerait. Cette prévision théorique fut vérifiée expérimentalement par le savant hollandais Buys Ballot en 1845, lorsqu'il s'aperçut que le sif et d'une locomotive à vapeur était plus aigu lorsqu'elle s'approchait et plus grave lorsqu'elle s'éloignait.

2. Toutes les citations de Leibniz proviennent de textes contenus dans *Système nouveau de la nature et de la communication des substances*, Garnier-Flammarion, 1994. Les textes auxquels nous nous référons ici sont : « Système nouveau de la nature » et les trois éclaircissements qui l'accompagnent, la « Lettre sur la question si l'essence des corps consiste dans l'étendue », avec trois appendices, et « De la nature du corps et de la force motrice ».

3. *Collection Fusion*, Vol. 1, Editions Alcuin, 2001.

4. Ce troisième fragment est publié dans ce numéro de *Fusion*, p. 57.

5. Hannes Alfvén, « Cosmology in the Plasma Universe : an Introductory Exposition », in *IEEE Transactions on plasma science*, Vol. 18, n°1, février 1990.

6. Mario Cosentino, *Le New Big-Bang*, Editions Chiron, Paris, 2001.

Bibliographie

Edwin Hubble, *The observational approach to Cosmology*, Oxford at the Clarendon Press, 1937.

Edwin Hubble, « Extra-Galactic Nebulae », *Astrophysical Journal*, 1926.

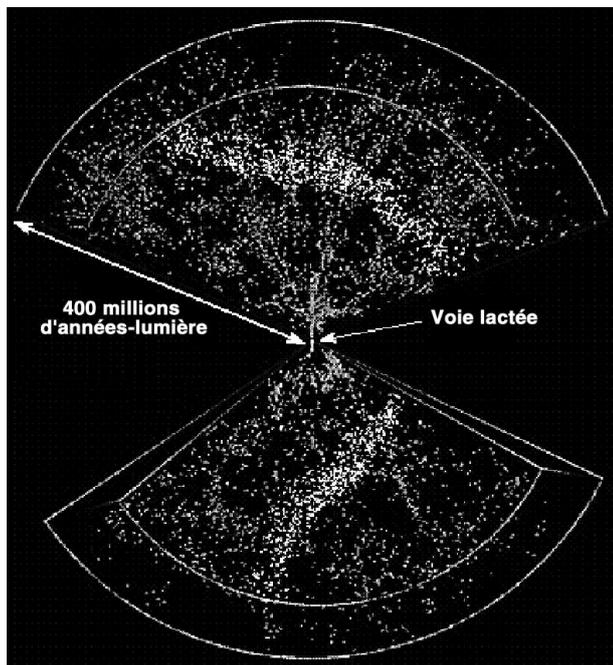
Edwin Hubble, *The Realm of the Nebulae*, Yale University Press, 1982.

Allan Sandage, Edwin Hubble 1889-1953, *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. 83, No. 6 December 1989 Whole n°621. Disponible sur internet à : http://antwpr.gsfc.nasa.gov/diamond_jubilee/d_1996/sandage_hubble.html.

Françoise Balibar, *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, Presses universitaires de France, 1992.

Albert Einstein, *La relativité*, Petite Bibliothèque Payot, 1963.

Adresse du site *The plasma universe*: <http://public.lanl.gov/alp/plasma/TheUniverse.html>



Répartition des galaxies jusqu'à une distance de 400 millions d'années-lumière. On peut distinguer le Grand Mur (en blanc).