

Cosmologie et théorie du Big Bang : un état des lieux

Par Denis GIALIS, astrophysicien

La cosmologie a connu ces dernières années une évolution sans précédent : l'avènement de nouveaux instruments d'observation, comme - par exemple - les satellites *WMAP* ou *Planck*, a permis de rassembler un exceptionnel ensemble de nouvelles données scientifiques qu'il convient d'analyser, de comprendre et d'expliquer. La confrontation régulière entre ces données et la mise en place théorique de modèles cosmologiques cohérents est à l'origine d'une effervescence scientifique remarquable dans une discipline encore et toujours en plein essor. Le modèle standard cosmologique, construit autour de l'idée centrale que constitue le Big Bang, a connu de nombreux ajustements au cours des dernières décennies. S'accordant souvent avec succès aux nouvelles contraintes observationnelles, il reste tout de même certaines (de trop nombreuses !) zones d'ombre que ce modèle ne parvient pas à mettre en lumière et qui sont la source d'intenses débats dans la communauté scientifique. C'est la raison pour laquelle ce modèle a des détracteurs : cependant, aucun de ces détracteurs n'est aujourd'hui en mesure d'apporter un modèle scientifique aussi satisfaisant qui expliquerait l'ensemble des observations réalisées depuis un siècle. Alors que faire ? Plusieurs voies sont possibles aujourd'hui : doit-on, et si oui, comment peut-on améliorer ce modèle ? Faut-il, pourquoi pas, changer totalement notre vision de l'Univers ? Ou bien, faut-il réinventer toute une partie de la physique dans une approche unificatrice ? Toutes ces questions sont délicates et restent parmi les plus difficiles de la science moderne.

Mais avant d'aller plus loin, rappelons ce que l'on appelle la *cosmologie*.

La cosmologie s'intéresse à l'étude globale de l'Univers, ce dernier étant défini comme l'ensemble de tout ce qui existe physiquement. Son objet est de comprendre et d'expliquer la formation des différentes structures (galaxies, amas de galaxies, superamas, ...) que l'on observe aujourd'hui dans l'Univers et d'établir les liens existants entre ces dernières tout en les replaçant dans un contexte d'étude globale de l'Univers, de son histoire et de son évolution. Cette vision globale atteint son

paroxysme lorsque certains cosmologistes ne s'intéressent qu'à la forme géométrique ou à la topologie de l'Univers sans avoir trop besoin de se soucier de la nature des objets qu'il contient, mais seulement, peut-être, de son contenu énergétique. C'est d'ailleurs le sens même des équations d'Einstein : la géométrie et le contenu énergétique de l'espace-temps sont étroitement liés. D'autres cosmologistes, en revanche, s'intéressent plus au contenu « moyen » de l'Univers, c'est-à-dire à l'abondance relative, et à son évolution au cours du temps, de ses différents constituants possibles. De la même façon, certains essaient, par exemple, de déterminer la répartition dans l'Univers de son contenu visible et invisible par des observations directes et indirectes : on parle alors de cosmologie observationnelle, et ses limites sont celles de l'Univers observable. Enfin, une partie des cosmologistes est spécialisée dans les aspects théoriques liés à la naissance même de l'Univers et à sa première seconde d'existence (!). On parle alors de cosmologie primordiale et le Big Bang est son point de départ. Les compétences requises font alors appel aux disciplines fondamentales de la physique : physique des particules, théorie quantique, et ainsi que toutes les théories émergentes (théorie des cordes et supercordes, gravité quantique à boucles...).

Pour mieux comprendre les limites du modèle standard, il est bon de se demander comment, de façon générale, se construit un modèle cosmologique.

L'objet physique étudié, l'Univers, a la particularité, par définition, d'être unique et non reproductible ce qui, contrairement à de nombreux autres phénomènes physiques, empêche toute comparaison et toute démarche expérimentale de nature statistique. En outre, nous sommes des observateurs placés en un point précis de l'Univers, c'est-à-dire à l'intérieur de l'objet que l'on veut étudier, que ce soit en matière de position spatiale ou bien d'instant d'observation. La vision que nous pouvons avoir de l'Univers est de ce fait très particulière et très limitée. En effet, la finitude de la vitesse de transmission d'informations - via la lumière, par exemple - fait que l'Univers observable ne constitue

qu'une toute petite partie de l'Univers tout entier. Cette posture scientifique, fondamentalement limitée, est donc peu confortable. Comment, dès lors, imaginer et concevoir ce qui se passe ailleurs et partout dans l'Univers et à toute autre instant de son histoire ? C'est l'un des problèmes fondamentaux de tout modèle cosmologique. Il en résulte au moins deux postulats de départ : le premier est que tout modèle cosmologique se doit de proposer une solution scientifique probable permettant de rendre compte de l'ensemble des observations effectuées. Cette solution peut très bien ne pas être unique et rien ne permet, d'ailleurs, de prouver une éventuelle unicité.

Le second postulat est que les lois de la physique que l'on observe localement - sur Terre, dans les laboratoires et dans notre environnement proche - sont valables en tout autre point de l'Univers et à tout autre instant de son histoire. Cette hypothèse est non triviale et surtout, non démontrée. C'est d'ailleurs une conséquence directe du fameux principe d'équivalence d'Einstein. Sans même changer les lois, différents paramètres peuvent néanmoins évoluer et changer. Ainsi, de nombreuses expériences ont été menées pour mesurer l'ordre de grandeur d'une éventuelle variation au cours du temps de la constante universelle de la gravitation ou bien de la constante de structure fine. Plusieurs modèles théoriques, comme la théorie des cordes, tiennent compte de ces possibles variations sur de grandes échelles de temps. Ce qu'il faut retenir est que les lois de la physique à l'échelle subatomique sont essentielles, bien que non suffisantes, à la construction d'un modèle cosmologique cohérent : leur universalité reste néanmoins un postulat, pratique certes, mais discutable.

Outre ces deux postulats de départ, le modèle standard cosmologique s'est construit autour de quatre hypothèses principales : la première est la théorie de la relativité générale, donnant une explication cohérente aux phénomènes gravitationnels que l'on observe et dont les prédictions sont en extraordinaire accord avec les mesures effectuées (sauf dans le cas particulier des courbes de rotation des galaxies, voir ci-après). Toutefois, il existe aujourd'hui de nombreuses théories qui, bien que profondément différentes de la relativité générale, aboutissent aux mêmes prédictions mais différent lorsqu'il s'agit de décrire les débuts de l'Univers. Car le problème est bien là : le modèle standard utilise deux théories aux fondements incompatibles, la théorie de la relativité générale pour la géométrie à « grande échelle » de l'espace-temps et la

physique quantique pour le comportement microscopique du contenu de cet espace-temps. C'est un affrontement direct entre une physique du « continu » dans laquelle l'espace-temps est conçu comme une surface (ou variété) lisse et une physique du « discontinu » où l'espace-temps a une structure que l'on pourrait qualifier de « granulaire », voire indescriptible en-dessous de la longueur de Planck (environ 10^{-33} cm) qui représente en quelque sorte la taille des plus petits grains décrits par nos théories physiques. Et le problème devient insurmontable lorsque l'on se rapproche de l'instant zéro de la création de l'Univers, car aucune des deux théories n'est suffisante pour décrire le comportement de l'Univers au voisinage du Big Bang. Leurs domaines respectifs de validité sont tout simplement dépassés et le physicien a besoin d'autres outils pour comprendre.

La deuxième est la description qui est faite de la matière par les lois physiques. Par exemple, les courbes de vitesses de rotation des galaxies, la dynamique des galaxies au sein des amas ou encore les grandes structures, ne sont explicables, via la relativité générale, que grâce à l'introduction de la matière noire. De même, l'expansion accélérée de l'Univers ne peut être comprise, dans le modèle standard, qu'en supposant une constante cosmologique non nulle, c'est-à-dire en postulant l'existence d'une énergie sombre (ou noire) qui représente environ 70% du contenu total en énergie de l'Univers. L'introduction de ces paramètres cosmologiques a évidemment une influence directe sur un autre modèle standard qui est celui des particules : quelle est la nature de cette matière noire et de cette énergie sombre ? Faut-il découvrir de nouvelles particules ? Ces questions marquent encore le lien profond qui existe entre la physique de l'infiniment grand et celle de l'infiniment petit.

La troisième hypothèse invoque des propriétés de symétrie de l'espace-temps permettant de résoudre les équations d'Einstein de la relativité générale. Elle est le reflet de l'isotropie observée en ce qui concerne, par exemple, le fond diffus cosmologique ou bien la distribution des galaxies sur de grandes échelles. Cela se traduit par une réduction drastique du nombre des possibilités quant à la détermination de la métrique universelle. En fait, il n'y a plus que deux possibilités : soit notre Univers est à symétrie sphérique et nous sommes situés proche de son centre, soit il est spatialement isotrope en chacun de ses points, ce que l'on traduit également par l'Univers est homogène et spatialement isotrope. Cette seconde possibilité constitue ce que l'on

appelle le *principe cosmologique*. A défaut de pouvoir trancher via des observations, c'est celle-ci qui est retenue comme postulat en supposant que nous n'avons aucune raison d'être des observateurs ayant une place privilégiée dans l'Univers, autrement dit, en invoquant le principe de Copernic. Cela conduit à une métrique dite de Friedmann-Lemaître (appelée aussi métrique de Friedmann-Robertson-Walker-Lemaître) qui nous dit que localement les tranches d'espace sont homogènes et isotropes et que leur géométrie ne peut être que de trois types différents, à savoir, sphérique, euclidienne ou hyperbolique.

La quatrième et dernière hypothèse, enfin, concerne la structure globale de l'Univers dont l'unicité n'est aucunement nécessaire pour garantir la géométrie localement observée. Par exemple, un cylindre a la même métrique ou la même géométrie qu'un plan, mais sa topologie, ou sa forme, est différente. Le problème est qu'il est très difficile, voire impossible, de déterminer, grâce à des observations, la forme de l'Univers, surtout lorsque celui-ci a une taille qui dépasse le rayon de Hubble (défini comme le rapport c/H , où c est la vitesse de la lumière dans le vide et H la constante de Hubble actuelle).

Revenons à présent sur la construction historique du modèle standard ou théorie du Big-Bang des origines, datant du début du siècle dernier, à nos jours.

Nous avons vu le rôle central de la relativité générale dans l'élaboration d'un modèle cosmologique : il n'est pas étonnant dès lors que l'un des premiers à s'être intéressés à l'évolution de l'Univers est Albert Einstein. En 1917, il imagine un Univers statique dont la topologie spatiale est celle d'une sphère, et cela, grâce à l'introduction d'une constante cosmologique *ad hoc* dont on ne savait alors pas trop quoi penser. Dans les années 1920, ce sont Alexandre Friedmann (1888-1925) et Georges Lemaître (1894-1966) qui développent indépendamment des solutions plus générales aux équations d'Einstein tout en montrant qu'elles impliquent que l'Univers est en expansion. Lemaître fut le premier à prédire que cette expansion doit produire un décalage vers le rouge des raies spectrales produites par des objets lointains, le fameux *redshift cosmologique*. Il faut savoir qu'à cette époque, la distance des galaxies n'avait pas été déterminée et que celles-ci étaient classées comme des nébuleuses faisant partie de la Voie Lactée. Mais, en 1929, les observations d'Edwin Hubble confirment la

prédiction de Lemaître tout en montrant que la Voie Lactée n'est pas la seule galaxie dans l'Univers ! L'Univers est désormais en expansion et son taux d'expansion, la constante de Hubble, peut être mesuré. Mais les travaux de Lemaître et Friedmann, lorsque l'on remonte dans le passé, impliquent également que l'Univers a connu une phase de son existence pendant laquelle la densité et la température devaient être incroyablement élevées : Lemaître appela cette idée la *théorie de l'atome primitif*. C'était, bien sûr, l'ancêtre de ce qui allait devenir la théorie du Big Bang. Cette théorie naissante allait pourtant connaître un certain nombre de détracteurs parmi lesquels le plus célèbre est sans conteste Fred Hoyle (1915-2001) avec sa *théorie de l'état stationnaire*. Paradoxalement, c'est ce même détracteur qui, lors d'une émission radio sur la BBC en mars 1948, qualifia de *Big Bang* ce que la théorie de l'expansion nous apprenait de la naissance de l'Univers. La notoriété de la théorie du Big-Bang était désormais inscrite dans les esprits. C'est alors qu'entrent en scène les physiciens Ralph Alpher, Hans Bethe et George Gamow qui, dans un célèbre article de 1948, évoquent pour la première fois le problème de la nucléosynthèse primordiale c'est-à-dire la formation des premiers noyaux atomiques dans l'histoire de l'Univers. La même année, avec Robert Herman, Alpher prédit même l'existence et la température (2,7 K) du fond diffus cosmologique, rayonnement émis au moment où l'Univers est devenu transparent au rayonnement électromagnétique, environ 380000 ans après le Big Bang. La confirmation observationnelle de ce fond diffus cosmologique attendra 1964 et la découverte fortuite des radio-astronomes Arno Penzias et Robert Wilson. Face à ce succès, les opposants à la théorie du Big Bang allaient alors être beaucoup moins nombreux... Mais en cette fin des années quarante, la théorie du Big Bang connue également un important développement théorique initié par Evgeny Lifshitz (1915-1985), ancien élève et collaborateur du célèbre Lev Landau. A partir des équations d'Einstein, il étudia comment de faibles perturbations de densité, dans les premiers instants de l'Univers, pouvaient conduire aux grandes structures que l'on observe aujourd'hui (amas de galaxies, superamas, filaments et grands espaces vides). Ces travaux sont à l'origine d'un élément essentiel du modèle standard actuel, à savoir, *la théorie de l'inflation*, dont les arguments utilisent à la fois la physique quantique et la relativité générale et dont les conséquences peuvent être mesurées – par

exemple – dans l'anisotropie de la température du fond diffus cosmologique. Rappelons que la théorie de l'inflation est apparue à la fin des années soixante-dix avec les travaux de François Englert, Robert Brout et Edgar Gunzig, puis ceux d'Alexei Starobinsky ou encore d'Alan Guth à partir de 1981. L'inflation est une phase d'expansion accélérée de l'Univers primordial, lorsque celui-ci était proche d'un espace dit de *de Sitter*, qui se serait produite juste avant la phase de domination du rayonnement. Elle marque la fin de la période dite de *Grande Unification* et les débuts d'une nouvelle force, l'interaction forte. L'Univers change littéralement d'état (comme lorsque de l'eau se transforme en glace...): on appelle cela une *transition de phase*. Associée à une brisure de symétrie, la libération d'énergie est simplement colossale. L'inflation fait intervenir un nouveau champ scalaire, appelé *inflaton*, qui est à l'origine de l'accélération prodigieuse de l'expansion de l'Univers. C'est au cours de cette expansion que les fluctuations quantiques ont été amplifiées jusqu'à permettre la formation des grandes structures. En seulement 10^{-32} s, la taille de l'Univers a augmenté d'un facteur de plus de 10^{50} . A titre de comparaison, la taille de l'Univers de la période qui a suivi l'inflation jusqu'à aujourd'hui n'a varié que d'un facteur mille. Cette théorie a fourni pour la première fois une explication cohérente des premiers instants de l'Univers que la théorie initiale n'était pas en mesure de décrire. Elle apporte une solution à deux problèmes principaux qui ne sont rien d'autre que des conséquences des équations de la relativité générale. Il y a tout d'abord le problème dit de la *platitude* qui veut que l'Univers ait quasiment ou exactement la densité requise pour avoir une courbure nulle. Schématiquement, pendant l'inflation, la courbure de l'Univers s'annule très rapidement. Puis, il y a le *problème de l'horizon* qui soulève le paradoxe de l'homogénéité d'un Univers constitué de zones causalement déconnectées remplies d'un même fond diffus cosmologique. Enfin, l'inflation sert aussi de point d'ancrage à la *théorie des multivers* ou *univers bulles* (Andreï Linde, célèbre chercheur russe, emploie même le terme de *mousse d'univers*) créés de façon continue par des processus inflationnaires sans début ni fin...
Ce qui est sûr, c'est que l'amélioration des techniques de détection des ondes gravitationnelles et les nouveaux projets instrumentaux, qui verront le jour dans les prochaines années, font que l'inflation pourra bientôt être soumise à de nouveaux tests observationnels : l'idée sera en effet la

détection directe ou indirecte d'un spectre unique d'ondes gravitationnelles produites durant la phase inflationnaire et présentes dans tout l'Univers.

En résumé, le modèle cosmologique standard actuel semble ne pas pouvoir se passer d'une phase inflationnaire précédent ce que l'on appelle la phase chaude du Big Bang (voir encadré). Il intègre la notion de matière noire et d'énergie sombre en supposant une constante cosmologique non nulle, notée traditionnellement Λ . Sa formulation date de 1995 et elle est due à Jeremy Ostriker et Paul Steinhardt : on parle alors de modèle Λ CDM (CDM pour *Cold Dark Matter*). Il est corroboré par trois observations principales que sont l'homogénéité du fond diffus cosmologique, l'abondance relative des différents éléments chimiques présents dans l'Univers et, bien sûr, l'expansion de l'Univers. Dans ce modèle, l'histoire de l'Univers post-inflationnaire peut se scinder en trois phases d'expansion, distinctes d'un point de vue thermodynamique : une première phase pendant laquelle l'Univers est dominé par l'énergie du rayonnement, une deuxième dominée par l'énergie associée à la matière baryonique et enfin, une troisième, celle dans laquelle nous sommes, dominée par l'énergie sombre.

En 1998, une autre observation, que l'on peut qualifier d'historique, et concernant les supernovæ de type *Ia* marqua un tournant important dans la cosmologie moderne et conforta ce modèle. Les supernovæ de ce type sont couramment utilisées comme étalon de distance : or, il s'est avéré que les plus éloignées d'entre elles étaient moins lumineuses et situées à une distance plus grande que ce qui était prévu par la théorie. La seule explication plausible dans le cadre du modèle standard fut que l'Univers est en expansion accélérée depuis plusieurs milliards d'années ! Cette observation appuie donc aujourd'hui l'idée d'une constante cosmologique non nulle et d'une énergie sombre dominante agissant comme une force répulsive à l'échelle de l'Univers.

Comme nous l'avons vu, un modèle cosmologique se doit d'expliquer les observations que l'on peut faire aujourd'hui de notre Univers, tout en proposant un scénario historique plausible et, évidemment, tout en se rattachant aux connaissances physiques que l'on a du contenu de l'Univers. Nous allons essayer à présent de voir quelles sont ces observations et, surtout, quelles sont leurs limites.

Les observations astronomiques ont ceci de particulier que les informations que l'on perçoit des objets que l'on veut étudier sont toujours relatives au passé de ces derniers: en d'autres termes, la finitude de la vitesse de la lumière fait que, selon la formule consacrée, plus on regarde loin, plus on regarde tôt dans le passé. Il est équivalent de dire que les seules informations sur le passé lointain de l'Univers sont fournies par des objets spatialement très éloignés de notre position actuelle. Si l'on a pris conscience des échelles de distances cosmologiques uniquement à partir des années 1920-1930, une vraie avancée, dans les observations, a eu lieu dans les années soixante lorsque de nombreux instruments, équipés de technologies nouvelles, ont permis peu à peu de sonder l'Univers dans toutes les gammes de fréquence du spectre électromagnétique allant du domaine radio au rayonnement gamma. De nos jours, le nombre de données observationnelles est d'ailleurs tel que les scientifiques ont souvent du mal à analyser et à interpréter tout ce que leurs instruments ont enregistré. L'avantage est que les modèles théoriques peuvent plus rapidement qu'auparavant être mis à l'épreuve des observations et, le cas échéant, être mis en défaut. Mais quelles sont les principales observations ?

1 - *L'isotropie* - Tout d'abord, ce qui est frappant est que, quelle que soit la direction dans laquelle on regarde l'Univers, la distribution spatiale et la nature des objets qu'il contient semblent être les mêmes. Cette isotropie se retrouve, comme nous l'avons déjà évoqué, dans le fond diffus cosmologique dont les variations relatives de température sont inférieures à 10^{-4} . Ce fait constitue un argument solide quant à l'hypothèse d'un Univers homogène et isotrope aux échelles cosmologiques et donc à l'utilisation de la métrique de Friedmann-Lemaître.

2 - *L'abondance relative des éléments chimiques* (voir aussi l'encadré) : la nucléosynthèse primordiale est la synthèse des éléments chimiques qui a suivi la période inflationnaire. C'est un des arguments les plus forts appuyant la théorie du Big Bang. Elle commence entre 1 et 2 secondes après le Big Bang lorsque la température de l'Univers descend en-dessous du MeV et elle ne devient vraiment efficace qu'à partir de la troisième seconde. Le deutérium, constitué d'un proton et d'un neutron se forme très tôt, mais cet isotope de l'hydrogène est également rapidement détruit après la nucléosynthèse primordiale : c'est pour cette raison que la

détermination de son abondance requiert d'observer des nuages de matière possédant des redshifts élevés tout en étant sur la même ligne de visée que des quasars encore plus lointains dont ils absorbent la lumière. Bien que difficile, ces observations ont conduit à une détermination précise de son abondance primitive relative qui s'élève à 10^{-5} (autrement dit, il y a 10^5 plus d'hydrogène que de deutérium dans l'Univers primordial). Un autre élément, l'hélium 4 est lui beaucoup plus abondant. Comme sa production a continué tout au long de l'histoire de l'Univers, essentiellement au sein des étoiles lorsqu'elles sont dans la séquence principale, son abondance primitive, égale à environ 25 %, a été déduite d'observations de régions dite *HII*, c'est-à-dire constituées principalement par de l'hydrogène ionisé, qui sont situées dans des galaxies bleues compactes. L'abondance du lithium primitif est quant à elle déduite d'observations d'étoiles ayant une faible métallicité et situées en périphérie de notre Galaxie, dans son halo. La raison est la suivante ; on suppose simplement que leur surface n'est pas polluée par du lithium produit par d'autres étoiles ayant évoluées en supernovæ. Cependant, les résultats semblent montrer un désaccord manifeste entre l'abondance mesurée et celle prédite par le modèle théorique de la nucléosynthèse primordiale suite aux observations du fond diffus cosmologique. Il n'existe actuellement aucune solution à la différence observée et cela reste donc un problème inexplicé dans le modèle standard qui est désormais connus sous le nom de *problème du lithium*.

3 - *Les distances et les âges des objets* : pour une étoile relativement proche – par exemple - la distance peut facilement être évaluée directement par la méthode de la parallaxe. En revanche, cette méthode ne fonctionne plus dès que les objets sont situés plus loin, typiquement au-delà de 200 années-lumière : on dispose alors d'un certain nombre d'étalons qui permettent de déduire la distance de façon indirecte. On peut citer les étoiles variables céphéïdes, les supernovæ de type Ia ou les supergéantes rouges les plus brillantes. Ces mesures sont parfois appuyées par des relations du type distance-luminosité pour des amas globulaires ou des nébuleuses planétaires ou bien, on utilise des relations du type Tully-Fisher pour certaines galaxies. Le problème dans cette démarche est que les objets lointains sont difficilement observables en ce sens que leur lumière, en traversant le milieu intergalactique, peut être plus ou moins absorbée, ou encore déviée par des effets de

lentilles gravitationnelles, ce qui fausse l'estimation de leur distance. Même l'émission intrinsèque de ces objets peut être anisotrope ce qui signifie que deux objets identiques situés au même endroit peuvent avoir des luminosités complètement différentes suivant l'angle sous lequel on les observe, et même, ils peuvent très bien ne pas présenter le même spectre électromagnétique. Le redshift est également un indicateur de distance, mais il est difficile de distinguer ce qui est dû à un mouvement intrinsèque de l'objet observé (redshift cinématique) et ce qui est dû à son éloignement (redshift cosmologique). Il reste que l'importance de la mesure des distances est cruciale notamment pour déterminer la constante de Hubble, c'est-à-dire le taux d'expansion actuel de l'Univers. Cette constante permet d'estimer la taille de l'Univers observable ainsi que son âge. Elle est donc tout à fait cruciale dans le modèle cosmologique standard. L'âge de l'Univers que l'on obtient aujourd'hui (13,8 milliards d'années) fournit ainsi une limite haute de l'âge des objets que l'on peut voir dans l'Univers. L'observation de certains objets lointains (ayant des redshifts élevés) a pu confirmer que leur âge était bien inférieur à celui de l'Univers, même si certains objets ont pu faire l'objet de controverses comme – par exemple – le quasar *APM 08279+5255* ou, plus récemment, certaines galaxies très lointaines.

4 – *L'accélération de l'expansion de l'Univers* : Nous avons vu que l'observation des courbes de lumière de supernovæ de type *la* dans des galaxies lointaines font d'elles ce que l'on appelle des *chandelles standards*. Plus précisément, la corrélation qui existe entre leur pic de luminosité et la décroissance de leur courbe de lumière permet de déterminer leur distance. De façon inattendue, cela a permis de montrer que l'Univers est en expansion accélérée et que cela implique dans le modèle standard que la constante cosmologique est non nulle et voisine de 0,7. Même si la nature de cette accélération n'est pas encore claire, il semble qu'elle concerne les objets jusqu'à des redshifts de l'ordre de 0,33 : autrement dit, l'expansion de l'Univers s'accélère, mais seulement depuis quelques milliards d'années. L'hypothèse qui semble le mieux s'adapter aux observations est celle d'un champ scalaire de nature inconnue ayant une pression effective négative : ce champ a été appelée *énergie sombre* ou *noire* et contient (comme l'indique la valeur 0,7 de la constante cosmologique) près de 70% (69,2% d'après les mesures les plus récentes) de l'énergie totale de l'Univers. La détermination de sa nature est

fondamentale aussi bien pour le modèle standard cosmologique que pour la physique des particules.

5 – *La cinématique de la matière visible* : les galaxies semblent toutes regroupées en amas et superamas donnant l'impression de vastes *murs*, mais aussi de grands vides intergalactiques qui sont des zones immenses presque dépourvues de galaxies. C'est le mouvement des galaxies à l'intérieur même d'un amas ainsi que le mouvement des étoiles en périphérie d'une galaxie donnée qui montrent le mieux que les caractéristiques du champ gravitationnel ne sont pas celles que l'on attendrait si l'on ne considérait que la matière visible. Ainsi – par exemple – on observe que les étoiles conservent des vitesses orbitales bien trop élevées lorsque l'on s'éloigne du centre galactique et même de la partie visible de la galaxie qui les abrite. Cela ne peut se produire que si la quantité de matière à l'intérieur de l'orbite de ces étoiles continue de croître lorsque l'on s'éloigne du centre. C'est de ces observations qu'est née la nécessité d'introduire de la matière noire entourant chaque galaxie et modifiant, par conséquent, toutes les interactions gravitationnelles (voir l'encadré). La quantité de matière noire est loin d'être négligeable puisqu'elle dépasse de loin celle de la matière visible : en termes d'énergie, et d'après les derniers résultats de la mission Planck, elle représente près de 26% de l'énergie totale de l'Univers alors que la proportion de matière ordinaire plafonne juste en-dessous des 5%.

6 – *Le fond diffus cosmologique* : cette émission électromagnétique perçue aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes a été émise lorsque l'Univers devint brusquement transparent c'est-à-dire lorsque la matière et le rayonnement se sont découplés. Il n'était alors âgé que de 380000 ans environ et sa température était voisine des 4000 K. Son spectre, identique à celui d'un corps noir, n'est que le reflet de l'équilibre entre les photons et la matière qui a précédé son émission. L'expansion de l'Univers, de plus d'un facteur 1000 depuis cette époque, a fait qu'il s'est refroidi jusqu'à ce que le rayonnement corresponde à celui d'un corps noir de seulement 2,75 K. Les très faibles anisotropies que l'on observe dans son spectre aujourd'hui constituent les traces des faibles inhomogénéités qui existaient dans l'Univers primordial et qui sont à l'origine des grandes structures. De même, l'étude de la polarisation du fond diffus cosmologique donne non seulement des indications précises sur les

ondes gravitationnelles émises dans la période inflationnaire, mais elle permet aussi de déterminer l'âge du début de la période de réionisation - ou âge d'apparition des premières générations d'étoiles (population III) constituées uniquement des premiers éléments légers (hydrogène, hélium et quelques traces de lithium). C'est ainsi que des observations de *WMAP*, on a pu déduire que cette période, qui marque également la fin de la période dite des *âges sombres de l'Univers*, a commencé autour du redshift $z=17$, c'est-à-dire très tôt dans l'histoire de l'Univers. Notons que c'est ce résultat qui a rendu peu réaliste ou peu probable les modèles utilisant de la matière noire chaude.

Ainsi, l'importance des informations contenues dans le fond diffus cosmologique est telle que son observation est cruciale dans la détermination des paramètres cosmologiques utilisés dans le modèle standard qui permettent de déterminer les différentes phases conduisant à l'Univers que l'on connaît aujourd'hui.

En conclusion, le modèle standard cosmologique est un modèle permettant d'expliquer relativement simplement l'ensemble des observations dont on dispose actuellement, depuis la dynamique des galaxies jusqu'à la formation des grandes structures en passant par l'abondance relative des différents éléments et l'isotropie du fond diffus cosmologique. Néanmoins, il souffre de nombreuses zones d'ombre qu'il est absolument nécessaire d'éclaircir : parmi elles, la nature et les propriétés physiques de ce que l'on a appelé matière noire est un point crucial qu'il faut étudier, le problème de la constante cosmologique, ou l'introduction d'une énergie sombre dominant complètement le contenu énergétique de l'Univers, en est un autre. Comme nous l'avons vu, il y a également le problème du lithium et de son abondance primitive qui ne semble pas correspondre aux observations. Mais le modèle standard cosmologique souffre également des incertitudes concernant la période inflationnaire, sa connexion avec la période chaude de l'Univers et la naissance des grandes structures. Plus près encore de l'instant même du Big Bang, le problème est alors celui de la physique dans son ensemble, car il concerne les propriétés de la matière à des échelles et à des énergies qui vont au-delà des domaines d'application des deux principales théories physiques que l'on connaît, la théorie quantique et la théorie de la relativité générale. Il est alors nécessaire de faire appel à une théorie plus générale qui

engloberait ces deux théories, comme il y a un siècle la théorie de la gravitation de Newton fut absorbée par celle d'Einstein. Plusieurs solutions semblent exister qui ont fait l'objet d'intenses développements théoriques ces dernières décennies : parmi elles, on peut citer les théories des cordes et des supercordes, et la gravité quantique à boucles, même s'il reste à définir – par exemple – comment ces théories peuvent conduire à une phase inflationnaire dans l'histoire de l'Univers. De plus, les tests expérimentaux permettant de conclure à leur validité nous font encore défaut et semblent parfois impossible à imaginer ! Enfin, une autre question importante qui surgit concerne les valeurs des constantes fondamentales que l'on rencontre en physique comme, par exemple, la constante de structure fine ou la constante gravitationnelle, dont il a été prouvé qu'une infime variation annihilerait toute possibilité quant à l'émergence des systèmes physiques complexes comme ceux que l'on rencontre en chimie et en biologie.

Petite histoire de la matière noire...

Tout commence en 1933 lorsqu'un astronome suisse du nom de Fritz Zwicky (1898-1974) se lance dans l'étude d'un petit groupe de sept galaxies situées dans l'amas de la constellation de la Chevelure de Bérénice, ou plus simplement, amas de Coma. Son idée était d'étudier le comportement dynamique des galaxies en mesurant leurs vitesses et ceci, afin d'en déduire, grâce aux lois de Newton, la masse totale de l'amas. Une fois cette masse déterminée, il souhaitait la comparer à celle obtenue en se basant uniquement sur la matière qui était visible, c'est-à-dire à la quantité de lumière reçue de cet amas. On obtenait en quelque sorte une masse dite *dynamique* par la première méthode et une masse dite *lumineuse* dans l'autre cas. Quelle ne fut pas sa surprise lorsqu'il constata que les vitesses observées étaient très élevées ! Pour éviter que l'amas ne se disloque et que les galaxies ne se séparent, il était absolument nécessaire de considérer que sa masse dynamique était énorme, plus de 400 fois la masse lumineuse que l'on pouvait déduire de l'observation de l'amas ! Bien que ses conclusions étaient numériquement surestimées en raison de l'utilisation d'une constante de Hubble bien trop élevée, Zwicky n'avait pas tort pour autant sur la réalité du phénomène et, dans une publication de 1937, il propose même la recherche de lentilles gravitationnelles afin de sonder certains amas de galaxies. Le caractère excentrique de Zwicky ne joua pas en sa faveur et sa découverte fut accueillie fraîchement par la communauté scientifique de l'époque qui doutait encore de la stabilité gravitationnelle des amas de galaxies. Pourtant, en 1936, Sinclair Smith fit lui aussi le même type de mesures, mais cette fois sur l'amas de la Vierge. Il aboutit aux mêmes conclusions ! Trois ans plus tard, en 1939, Horace Babcock entreprend, quant à lui, de mesurer la vitesse de rotation de la galaxie d'Andromède, la plus grande voisine de la Voie Lactée et trouve une valeur trop élevée et qualifiée d'« anormale ». L'histoire de ce problème semble alors s'arrêter, mais pendant vingt ans, la théorie du Big Bang s'affine et la constante de Hubble devient plus précise. En 1959, Kahn et Woltjer font part de leurs mesures concernant notre amas local de galaxies : celles-ci mettent en évidence une masse manquante pour laquelle aucune explication n'est trouvée. Parallèlement et la même année, Louise Volders observe que la vitesse de rotation des étoiles au sein de la galaxie voisine M33 ne diminue pas avec la distance comme le prévoit les lois de Newton et en supposant que toute la matière est concentrée dans les zones qui émettent de la lumière. L'idée de matière noire, ou sombre, commençait à intéresser un nombre croissant de scientifiques. Citons les travaux de Vera Rubin sur les vitesses de rotation dans la galaxie d'Andromède, ou encore ceux de Ostriker et Peebles qui démontrèrent dès 1973 que les disques galactiques sont instables en l'absence d'un halo étendu de matière noire. Qu'en est-il aujourd'hui ? Cette matière noire n'a toujours pas été directement observée. Néanmoins, elle semblerait représenter plus de 90% de la masse des galaxies et entourerait chaque galaxie d'un immense halo de forme sphérique, seule configuration possible pour expliquer la stabilité des structures visibles. Récemment, il a même été observé une galaxie, nommée Dragonfly 44, dont la masse, comparable à celle de la Voie Lactée, est composée de 99,99% de matière noire ! De nombreuses hypothèses ont été formulées quant à la nature de cette matière noire, mais aucune n'a été trouvée de preuves suffisantes. La première hypothèse serait de considérer que la matière noire est composée de tous les objets trop peu lumineux pour être observés avec nos instruments à savoir, les naines brunes, les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs isolés. Cette hypothèse semble fragile : en effet, le nombre de ces objets invisibles devrait être beaucoup trop élevé. D'autres ont même suggéré d'abandonner l'idée de la matière noire et de considérer plutôt une modification de la loi de Newton à grande distance, mais sans succès... La solution se trouve peut-être du côté de la physique des particules. Plusieurs indices observationnels récents ont montré que la matière noire semble interagir très peu (en dehors de l'interaction gravitationnelle), voire pas du tout, avec la matière *baryonique* ordinaire (protons, neutrons). Elle serait donc de nature différente, c'est-à-dire *non-baryonique*. Aussi, il existe de nombreux modèles de matière noire que l'on qualifiera tantôt de chaude, froide, tiède, floue, répulsive, annihilante, instable ou encore, en auto-interaction forte... Parmi ceux-ci, on peut citer deux principales théories : l'une fait appel à de la matière noire dite chaude, c'est-à-dire à des particules légères et relativistes (c'est-à-dire dont la vitesse est proche de celle de la lumière). On pense alors bien évidemment aux neutrinos, particules insaisissables ou presque, mais ces derniers ne semblent pas conduire à une solution cosmologique satisfaisante. L'autre théorie considère de la matière noire dite froide c'est-à-dire composée de particules plus massives et plus lentes. Les candidats hypothétiques les plus célèbres composant la matière noire froide sont les *WIMPs*, signifiant *Weakly Interacting Massive Particles*, nom générique donné à des particules issues des théories supersymétriques, mais aucune détection directe n'a été effectuée à ce jour ! Ces deux théories se distinguent notamment dans ce qu'elles

impliquent dans l'histoire de l'Univers et, plus particulièrement, dans la formation des grandes structures comme les amas et les superamas de galaxies peu de temps après le Big Bang et sa phase inflationnaire. La matière noire chaude conduit à la formation d'amas de galaxies par fragmentation de superamas tandis que la matière noire froide favorise plutôt, dans l'ordre, la formation de galaxies, puis d'amas et enfin de superamas, et c'est ce dernier scénario que semble confirmer les données récentes fournies par *WMAP*. Il reste que la cosmologie d'aujourd'hui fournit des contraintes observationnelles remarquables pour le modèle standard des particules, et que la course pour déterminer la nature de la matière noire se joue également dans les laboratoires.

Zoom sur la période chaude du Big Bang

Dans le modèle standard cosmologique, cette période débute à la fin de l'inflation sans que l'on connaisse vraiment les mécanismes de transition entre ces deux phases distinctes. La température de l'Univers est alors supérieure à 100 MeV (soit 10^{12} K), ce qui implique qu'il est entièrement dominé, sur le plan énergétique, par des particules relativistes à l'équilibre comme les électrons, les positrons, les neutrinos et bien sûr, les photons. Les protons et les neutrons n'ont alors qu'un rôle négligeable. Lorsqu'au bout de quelques secondes l'Univers s'est suffisamment refroidi ($T < 1$ MeV soit 10^{10} K) les premiers noyaux atomiques de deutérium, d'hélium et de lithium se forment à partir des nucléons (protons et neutrons). Les neutrinos se découplent tandis que les neutrons libres (instables) se transforment en protons. Mais la température est encore bien trop haute pour que des atomes puissent se former : les photons, les électrons et les noyaux atomiques légers sont donc en équilibre thermodynamique. Les électrons interagissent fortement avec les photons via des processus de diffusion Compton ce qui rend l'Univers complètement opaque aux photons. Au bout de 380000 ans - ce qui correspond à une redshift d'environ 1100 - l'expansion de l'Univers a fait baisser sa température suffisamment (environ 4000 K) pour que les noyaux atomiques capturent des électrons, c'est-à-dire pour que des atomes se forment. Les interactions photons-électrons libres disparaissent alors, ce qui a pour conséquence de rendre l'Univers transparent aux photons. Ces premiers photons, libérés de toute interaction, ont un spectre énergétique identique à celui d'un corps noir qui aurait la même température que l'Univers. C'est ce qui marque la naissance du fond diffus cosmologique que l'on observe aujourd'hui et qui est constitué de ces photons que l'expansion de l'Univers a refroidi au cours des presque 14 milliards d'années qui ont suivi cette période. C'est également à ce moment-là que la transition s'opère entre un Univers dominé par le rayonnement et un Univers dominé par la matière.

Pour aller plus loin

Issues in the Philosophy of Cosmology, G. F. R. Ellis, 2006, *arXiv:astro-ph/0602280v2*.

The big-bang theory : construction, evolution and status, J.-P. Uzan, 2016, *arXiv:1606.06112v1*.

Cosmologie primordiale, P. Peter & J. P. Uzan, 2005, Ed. Belin.

Principes de la cosmologie, J. Rich, 2002, Ed. de l'École Polytechnique.

Initiation à la cosmologie, M. Lachièze-Rey, 2005, Ed. Dunod.

Quelques sites web

<http://public.planck.fr/>

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

<http://saf-astronomie.fr/cosmologie/>

<http://blogs.futura-sciences.com/barrau/>