

**Texte de la 182<sup>ème</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 30 juin 2000.**

**Les grandes questions de la cosmologie  
par Jean Audouze**

Au milieu de l'évocation des différentes disciplines du savoir dans ce cycle de conférences, il s'agit ici de nous intéresser à l'Univers dans sa globalité : est-il possible, en termes scientifiques, de le comprendre dans son ensemble, ses caractéristiques et ses rapports avec le temps (Univers immuable et statique ou Univers en évolution) ? C'est effectivement le pari que font les astrophysiciens, spécialistes en cosmologie : bien que nous fassions nous-mêmes, êtres humains (et tout ce qui nous entoure), partie intégrante de cet Univers observable, qui est également et par essence un objet unique, nous, cosmologistes, avons la prétention de lui appliquer les mêmes méthodes que celles qui sont mises en oeuvre dans les autres sciences de la nature : nous faisons partie en effet de « l'expérience ». Cette « expérience » ne peut pas être reproduite et néanmoins nous pensons être capables de comprendre le monde à la manière d'un physicien, d'un chimiste ou d'un biologiste.

La cosmologie, comme les autres domaines du savoir, a une histoire. Celle-ci relate à la fois les bouleversements dans les représentations conceptuelles de l'Univers et reflète les progrès de l'instrumentation et des techniques ainsi que l'émergence de l'évolution des théories physiques (gravité, électromagnétisme, mécanique quantique, relativité... ). L'astronomie a un âge au moins égal à 5 000 ans puisque l'on retrouve les premières traces de l'importance revêtue par l'observation du ciel dans les vestiges laissés par les civilisations mésopotamiennes du troisième millénaire avant notre ère. Malgré la floraison de travaux remarquables comme ceux d'Ératosthène qui fut le premier à mesurer le rayon de la Terre au premier siècle avant J.-C. et des astronomes grecs et arabes qui observèrent et analysèrent entre autres le mouvement des planètes et les configurations des constellations, il faut attendre la Renaissance et la publication en 1543 de l'ouvrage de N. Copernic *de Revolutionibus Orblum Caelestium* pour passer d'un univers géocentrique à une représentation héliocentrique tenant compte du mouvement de la Terre et des planètes autour du Soleil. Il est certain que Copernic a véritablement « inventé » cette représentation nouvelle qui ne sera adoptée par la communauté des scientifiques et presque à contrecœur que près d'un siècle après sa publication et non sans connaître de célèbres vicissitudes tel que le procès intenté à Galilée par l'Église. Néanmoins, cet héliocentrisme avait déjà été proposé par Aristarque de Samos dès les années 310-230 avant J.-C.

C'est au XVII<sup>e</sup> siècle qu'apparaissent les premières lunettes astronomiques et les télescopes. Isaac Newton formule la théorie de la gravitation universelle en se fondant sur les travaux de Galilée et de Kepler. Ce dernier, en effet, énonça les lois du mouvement des planètes autour du Soleil qui restent encore valides aujourd'hui. Mais l'Univers, bien qu'héliocentrique, restera « étriqué » jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. C'est l'astronome américain Harlow Shapley qui démontra au cours des années 1914-1920 que le Soleil ne se trouve pas au centre de notre Galaxie, la Voie Lactée, mais qu'au contraire, il s'en trouve éloigné d'une distance de l'ordre de 30 000 années lumière. Cette démonstration est fondée sur la distribution dans l'espace des amas d'étoiles dits « amas globulaires » qui sont constitués d'environ un million d'étoiles dont l'âge est particulièrement élevé (**Figure 1**). Cette distribution devient isotrope si le centre de la Galaxie est placé à cette distance dans la direction de la constellation du Sagittaire. H. Shapley démontre aussi que plusieurs corps nébulaires comme la nébuleuse d'Andromède ne sont rien d'autre que des galaxies analogues à notre Voie Lactée et situées à de très grandes distances de nous (deux millions d'années lumière dans le cas de cette galaxie) qui fait pourtant partie du « groupe local des galaxies » auquel appartiennent la Voie Lactée et le grand et le petit Nuage de Magellan. Le Système

Solaire occupe désormais une région ordinaire et insignifiante de l'Univers observable qui est constitué d'au moins un milliard de galaxies, chacune contenant quelques centaines (200 pour la Voie Lactée) de milliards d'étoiles comme le Soleil.



Pour observer l'Univers dans son ensemble et aussi dans ses composants les plus grands et les plus ténus, nous disposons depuis une trentaine d'années de moyens de plus en plus performants qui mobilisent non seulement les techniques de l'astronomie du visible mais aussi celles de l'invisible. Nos yeux ne peuvent en effet que percevoir le rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 400 (violet) et 800 (rouge) nm (nm = nanomètre). Les rayonnements de ce type ayant des longueurs d'onde plus grandes sont moins énergétiques : ils correspondent à l'infrarouge, au millimétrique et aux ondes radio dont les longueurs d'ondes sont comprises entre quelques centimètres pour aller jusqu'à plus de dix mètres. Les rayonnements plus énergétiques que le visible sont l'ultraviolet et les rayonnements X et gamma. Seuls le visible et les ondes radio sont détectables depuis la Terre (on les observe en radioastronomie depuis la fin de la deuxième guerre mondiale). Les autres rayonnements ne sont accessibles que depuis l'espace (ballons et surtout satellites artificiels qui se sont multipliés depuis le premier vol Sputnik en 1957) : les télescopes optiques sont de plus en plus grands : ils ont des diamètres qui peuvent atteindre aujourd'hui la dizaine de mètres et permettent de voir des objets très lointains donc que nous observons dans un passé de plusieurs milliards d'années, compte tenu du caractère fini de la vitesse de la lumière. Le Télescope spatial Hubble qui fut lancé en 1990 et qui est pleinement opérationnel depuis 1993 a la grande faculté d'observer le ciel dans le visible, le proche ultraviolet et le proche infrarouge à une altitude de 500 km, ce qui l'affranchit des limitations à l'observation imposées par l'atmosphère terrestre.

Les astrophysiciens ne se contentent pas d'observer ces rayonnements électromagnétiques. Ils s'intéressent aussi aux rayonnements cosmiques particuliers. Ce sont d'abord les rayons cosmiques constitués principalement de noyaux d'atomes très énergétiques donc animés de très grande vitesse qui ne cessent de bombarder la Terre (donc nous-même !). Ils détectent aussi depuis une date récente des particules qui conservent encore leur mystère que sont les neutrinos. Ceux-ci sont émis par les régions centrales des étoiles et donc du Soleil où se déroulent des réactions nucléaires qui les produisent ou encore au cours des explosions violentes d'étoiles de grande masse (phénomènes de l'explosion des supernovae).

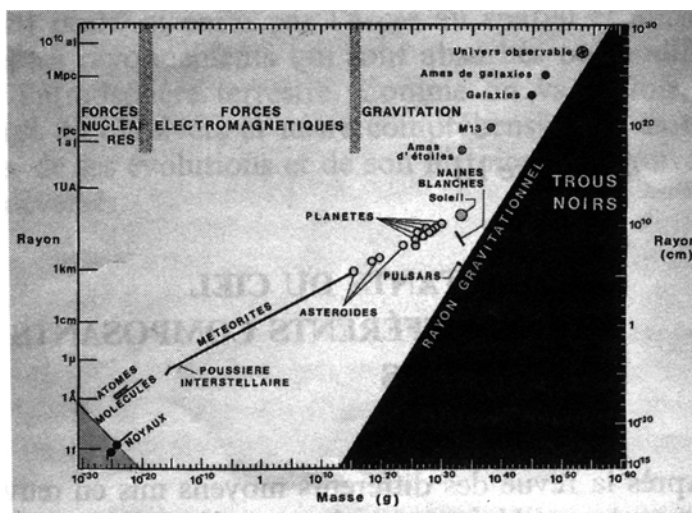
La détection des ondes gravitationnelles (particulièrement difficiles à mettre en évidence en raison de la faiblesse relative de l'interaction gravitationnelle par rapport aux trois autres l'électromagnétisme et les deux interactions nucléaires, forte et faible) susceptibles d'être émises au cours des explosions d'étoiles ou de leur disparition à l'intérieur des trous

noirs est suivi le point d'être possible en Europe et aux USA en attendant leur observation depuis l'espace dans les années 2010-2020. Par ailleurs, pour les raisons qui sont développées plus loin, des expériences de physique des particules comme celles qui sont ou qui seront entreprises avec les accélérateurs présents et futurs du CERN doivent également permettre de comprendre la nature de la matière constituant l'Univers dans son ensemble.

Disposant donc de ces moyens d'investigation de l'infiniment grand et de l'infiniment petit ainsi que des deux théories fondamentales de la physique que sont la mécanique quantique et la relativité et qui ont été formalisées au début du XX<sup>e</sup> siècle, nous pouvons nous risquer à énoncer les questions fondamentales de la cosmologie et à tenter d'y répondre.

Avant cela, il convient de passer en revue les quelques faits pertinents dont nous disposons et dont on constatera le faible nombre au regard de la complexité des problèmes soulevés par la cosmologie. Ces faits sont au nombre de trois :

1) *L'Univers est « structuré » à toutes les échelles* depuis les éléments microscopiques que sont les particules élémentaires et les noyaux des atomes jusqu'aux astres de dimension « astronomiques » que sont les étoiles, les galaxies et leurs amas (**figure 2**) : on obtient un proton ou un neutron avec trois quarks. Un proton est constitué de 2 quarks u (u pour « up ») de charge  $+2/3$  et d'un quark d (d pour « down ») de charge  $-1/3$ , ce qui lui donne une charge  $+1$ , un neutron est constitué de un u et de deux d ; il est donc neutre, de charge 0. Le passage de l'un à l'autre s'effectue par la transformation d'un quark u en un quark d (ou vice versa) avec émission d'un positon (l'anti-électron) et d'un neutrino ; le quark d se transforme en u avec émission d'un électron et d'un antineutrino. Ces transformations de quarks procèdent de l'interaction nucléaire faible puisqu'elles font intervenir les électrons (ou positons) et neutrinos (ou antineutrinos). La fusion des quarks en nucléons relève de l'interaction nucléaire forte. Avec un ou plusieurs nucléons (proton et neutron), on obtient un noyau d'atome que l'on complète par son cortège électronique.



Une espèce chimique déterminée (hydrogène, carbone, fer par exemples) est faite d'atomes dont le nombre de protons (dit numéro atomique) est toujours le même : 1 pour l'hydrogène, 6 pour le carbone, 26 pour le fer. Un atome est électriquement neutre quand son cortège électronique contient un nombre d'électrons égal au numéro atomique de l'élément chimique considéré. Si cela n'est pas le cas, on a affaire à un ion, positif s'il manque des électrons ou négatif s'il y a un surplus d'électrons. Une même espèce chimique peut rassembler des noyaux d'atome de masses atomiques différentes, c'est à dire avec des nombres

différents de neutrons puisque cette masse atomique représente la somme des nucléons du dit noyau. On caractérise ainsi des isotopes ayant les mêmes propriétés chimiques mais dont les propriétés nucléaires sont différentes : le deutérium est l'isotope lourd de l'hydrogène, le carbone existe dans la nature sous la forme de  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  ; le  $^{14}\text{C}$  est radioactif et sa désintégration est utilisée comme « chronomètre » par les archéologues par exemple.

Avec des atomes, on constitue la matière dont nous sommes nous-mêmes façonnés, ainsi que tout ce qui nous entoure. On passe ensuite aux planètes, aux étoiles, aux galaxies jusqu'aux grandes structures de l'Univers.

Les étoiles occupent une place particulière dans cette énumération puisqu'elles sont, selon la formule de Michel Cassé, des réacteurs à fusion thermonucléaire fonctionnant grâce à leur « confinement gravitationnel ». Les étoiles brillent en effet de façon très stable pendant des périodes dont la longueur peut dépasser la dizaine de milliards d'années dans le cas d'étoiles de masse inférieure ou égale à celle du Soleil. En effet, les réactions de fusion thermonucléaire qui se déroulent dans leurs régions centrales transforment lentement une partie de la matière nucléaire en rayonnement lors du passage de l'hydrogène à l'hélium, de l'hélium au carbone et à l'oxygène... Rappelons que la plupart des éléments chimiques dont nous sommes formés sont synthétisés lors des explosions des étoiles au moins cinq à huit fois plus massives que le Soleil, lors du phénomène des supernovae. Nous sommes donc des débris d'étoiles massives ayant la chance d'orbiter autour d'une étoile de faible masse comme le Soleil, qui évolue donc très lentement, ce qui a donc permis à des processus aussi complexes que l'émergence de la vie de se produire à la surface de la Terre.

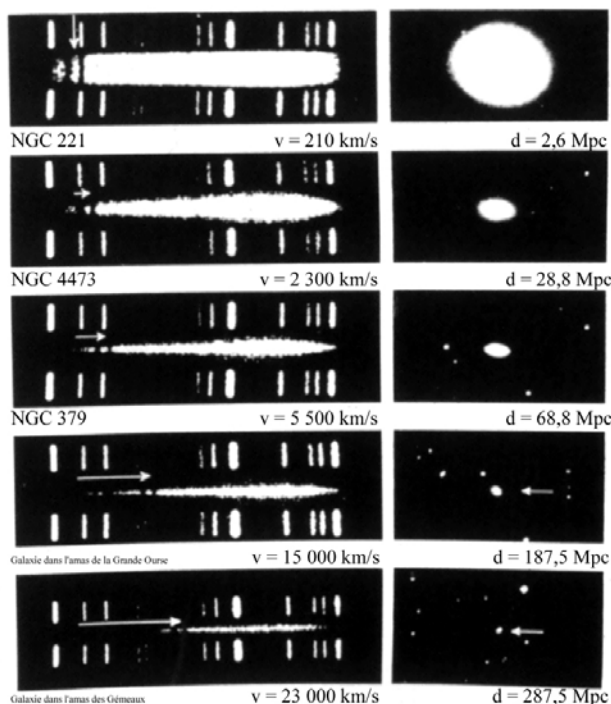
On peut interpréter cette structuration de l'Univers par le fait que deux forces fondamentales, la force nucléaire forte (qui assure la cohésion de la matière nucléaire) qui assemble les quarks entre eux dans les noyaux d'atomes et la force nucléaire faible qui régit la transformation de certains quarks en d'autres, des protons en neutrons (et vice versa) et qui est à l'origine du phénomène de la radioactivité, agissent à très petite échelle (l'intérieur d'un noyau d'atome). Les deux autres, qui nous sont plus familières, l'interaction gravitationnelle et l'interaction électromagnétique, « modèlent » l'Univers à grande échelle.

2) *L'Univers observable est pour ainsi dire le même, quel que soit le lieu considéré* : de ce point de vue, contrairement à la vision géocentrique de nos aïeux, la Terre et ses constituants et le Système Solaire sont des éléments de l'Univers tout à fait ordinaires et qui n'ont pas de caractéristiques particulières. C'est pour cette raison que l'on pense que la vie intelligente doit être présente ailleurs que sur Terre, même si les distances qui doivent séparer les lieux où elle a pu se développer ne permettent pas de confirmer cette hypothèse. Tout porte également à croire que les lois de la physique qui s'appliquent aujourd'hui à nous-mêmes et notre environnement immédiat sont celles qui régissent le comportement de l'Univers dans son ensemble, et à toute époque. Un physicien aussi talentueux que le britannique Paul Dirac a essayé sans succès d'élaborer une théorie cosmologique fondée sur la variation avec le temps de la constante de la gravité. Ses successeurs n'ont pas réussi davantage !

Rappelons à ce point que plusieurs cosmologistes, à la suite de Brandon Carter de l'Observatoire de Meudon, ont invoqué ce qu'ils appellent le « principe anthropique » selon lequel l'Univers a été construit pour aboutir à la vie et à l'homme. A ce principe anthropique dit « fort » auquel quasiment personne, y compris B. Carter, ne croit vraiment, on lui substitue un principe anthropique « faible » qui stipule simplement que notre propre existence est une conséquence naturelle des propriétés spécifiques de l'Univers. Cette dernière proposition que j'adopte volontiers, est appuyée par la constatation que l'Univers observable ne serait absolument pas le même si l'une des constantes de la physique (constante de la gravité  $G$ ,

quantum élémentaire d'énergie  $h$ , apparaissant dans la mécanique quantique, masse du proton et de l'électron, durée de vie du neutron... ) avait été différente.

3) *L'Univers est en expansion à grande échelle* : l'astronome américain Edwin Hubble utilisa les observations de ses prédécesseurs, en particulier celles de Miss Henrietta Leavitt et de Vesto Slipher et Francis Pease pour montrer au cours des années 1920 que les galaxies lointaines s'éloignent les unes par rapport aux autres et que leur vitesse relative d'éloignement est proportionnelle à leur distance (**figure 3**). Après beaucoup de discussions, voire de disputes entre astrophysiciens, la valeur de la constante de Hubble  $H$  apparaissant dans la relation  $v = H \times d$  exprimant la proportionnalité observée entre la vitesse de fuite  $v$  d'une galaxie éloignée d'une distance  $d$  par rapport à nous est  $H = 60$  km par seconde et par megaparsec (1 megaparsec correspond à une distance de 3 millions d'années lumière). Cette dernière proposition constitue ce que les cosmologistes appellent la loi de Hubble et permet de déterminer un « âge » pour l'Univers de l'ordre de 15 milliards d'années. La constatation selon laquelle le nuit est noire, comme sous le nom du paradoxe d'Olbers mais que l'écrivain américain Edgar Poe a très clairement explicité dans son essai « Eureka » (traduit en français par Ch. Baudelaire), implique que l'Univers est soit « daté » (c'est à dire qu'il a un début et qu'il n'existe pas de toute éternité), soit il est en expansion. On affirme généralement aujourd'hui qu'il est à la fois daté et en expansion. L'âge de l'Univers peut également être ni déterminé par deux méthodes indépendantes, la première due à Allan R. Sandage, un élève de E. Hubble, qui permet de déterminer l'âge des premières générations d'étoiles constituant ce que les astronomes appellent des amas globulaires et la seconde fondée sur l'analyse par des méthodes chimiques de la teneur de la matière cosmique en éléments chimiques radioactifs à très longue durée de vie tels que  $^{232}\text{Th}$  ou  $^{238}\text{U}$  par exemple. Cette dernière technique s'est beaucoup développée, en particulier grâce à Claude Allègre et à l'américain Gérard J. Wasserburg qui ont reçu ensemble le prix Crafoord de l'Académie des Sciences de Suède en 1986.



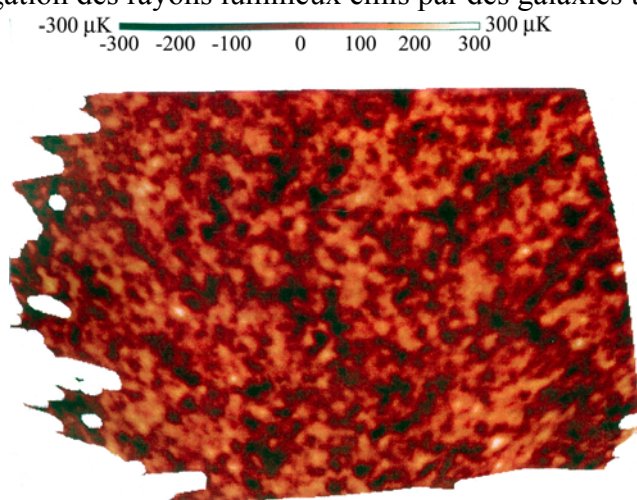
Ces trois façons de déterminer ces âges donnent des résultats similaires, à quelques exceptions près que les théories cosmologiques sont aujourd'hui capables d'expliquer. En bref, l'Univers observable est structuré. Il est le même partout et il est actuellement en expansion.

Les questions cosmologiques que l'on peut maintenant énoncer et évoquer sont donc :

### **L'Univers est-il en évolution, a-t-il une histoire ou au contraire est-il immuable ?**

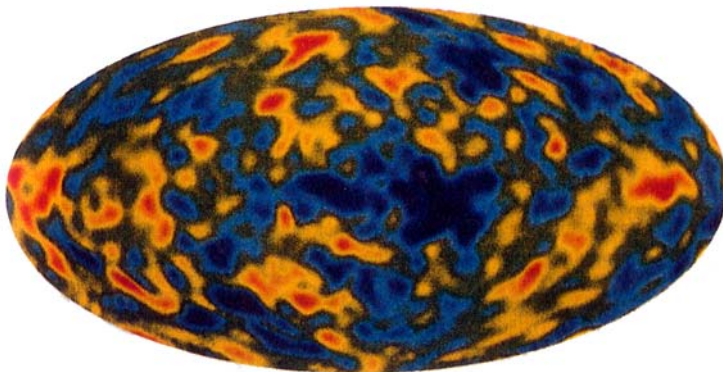
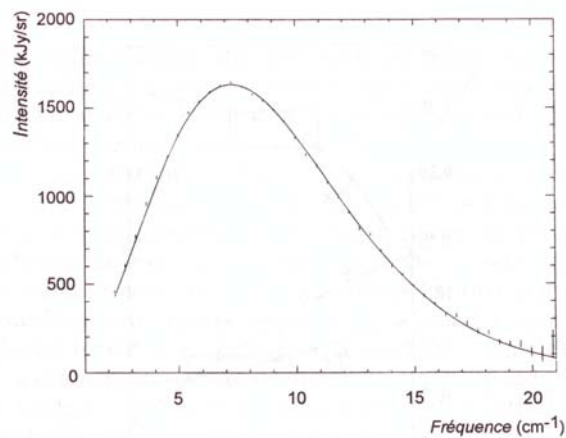
En d'autres termes, le temps a-t-il prise sur l'Univers dans son ensemble ? La découverte de l'expansion de l'Univers par E. Hubble aurait dû en principe convaincre tous les cosmologistes de l'époque que l'Univers a une histoire et qu'il évolue au cours du temps. De fait, à l'exception de l'abbé Georges Lemaître, le cosmologiste belge qui émit à cette époque la théorie de « l'oeuf cosmique » qui préfigure celle du Big Bang, la majorité des cosmologistes jusqu'en 1965 préféra suivre Hermann Bondi, Thomas Gold et Fred Hoyle. Ceux-ci proposèrent dans les années 1940 l'hypothèse de la création continue de matière permettant de continuer à imaginer que l'Univers en expansion conserve néanmoins une densité de matière constante. En 1965, l'observation en radio du rayonnement fossile diffus par Arno Penzias et Robert Wilson, tous deux Prix Nobel de Physique en 1978, montre que l'Univers dans son ensemble est traversé par cette radiation, correspondant à une température de 2,73 K, ruina l'hypothèse de la création continue et fût l'argument décisif en faveur de la théorie du Big Bang selon laquelle l'Univers observable connut il y a une quinzaine de milliards d'années une phase très dense et très chaude depuis laquelle il s'est dilaté et donc refroidi (à l'échelle globale).

La théorie du Big Bang rencontre actuellement de très grands succès puisqu'elle rend bien compte de tous les tests observationnels, y compris les plus récents comme ceux qui ont été publiés ce printemps même et qui résulte d'observations précises de l'anisotropie de ce rayonnement diffus par le vol ballon italo-américain « Boomerang » (**figure 4**) ou encore les observations par des chercheurs de l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP) - Yannick Mellier, Bernard Fort, Francis Bernardeau et collaborateurs - des effets gravitationnels sur la propagation des rayons lumineux émis par des galaxies très lointaines.



La mission ballon « Boomerang » a permis d'observer les inhomogénéités du rayonnement cosmologique du fond diffus à 2,73 K avec une résolution angulaire 60 fois meilleure que celle atteinte par la sonde américaine COBE (**figure 5**) qui donna ses résultats en 1992 en étant seulement capable de distinguer des angles supérieurs ou égaux à 7°. Avec cette cartographie de ces inhomogénéités, mais qui ne correspondent pour l'instant qu'à une

région déterminée du ciel, on peut déterminer non seulement la valeur de la densité globale de l'Univers mais aussi la nature des particules qui y contribuent (voir plus loin). Il est intéressant de constater que cette détermination est en accord d'une part avec les résultats obtenus par les chercheurs de l'IAP qui observent des effets d'astigmatisme cosmique ou encore les courbures subies par la lumière soumise à des champs gravitationnels induits par la présence de la matière ; d'autre part, avec d'autres déterminations indépendantes des caractéristiques du mouvement d'ensemble d'expansion à partir de l'observation des explosions des supernovae de type Ia dont la luminosité intrinsèque est pratiquement la même puisqu'elle correspond dans chaque cas à la désintégration de masses égales de  $^{56}\text{Ni}$  en  $^{56}\text{Fe}$  qui libèrent toujours des énergies comparables dans le même temps. Malgré ces succès très actuels, la théorie du Big Bang est « mortelle » et peut être invalidée dans le futur. Il restera néanmoins que l'Univers est en évolution, qu'il n'est pas immuable et qu'il subit donc la flèche du temps.



**Que percevons-nous de l'Univers ? Quelle est la nature de la matière qui le constitue ? Peut-on prédire son évolution future ?**

Pour cette deuxième catégorie de questionnements, les cosmologistes sont vraiment convaincus que la matière nucléaire visible dont nous sommes fournis ne représente qu'une part infime du contenu matériel global de l'Univers. En fait, la théorie de la relativité générale, comme l'ont démontré Stephen Hawking et Roger Penrose, implique que l'Univers est nécessairement en mouvement d'expansion continue si l'Univers a une densité égale ou inférieure à une densité critique égal à  $7 \times 10^{-30}$  g par  $\text{cm}^3$  pour une constante de Hubble égale à

60 km par seconde et par mégaparsec. Si la densité de matière est supérieure à cette valeur, l'Univers, qui est actuellement en expansion, connaîtra ultérieurement une phase de contraction : son comportement serait alors « cyclique ». À un « Big Bang » survenu il y a une dizaine de milliards d'années et suivi d'une expansion, succéderait un « Big Crunch » d'autant plus proche que la densité globale de matière serait plus grande.

Les trois séries d'observations évoquées plus haut :

- La mesure de l'anisotropie du rayonnement fossile par le vol ballon « Boomerang » qui a succédé à la sonde spatiale COBE (dont les résultats furent rendus publics en 1992) et qui sera suivie par les sondes MAP (américaine, envoi prévu en 2001) et PLANCK SURVEYOR (européenne, envol prévu vers 2006-2008),

- les mesures des propriétés visibles des galaxies et de leurs amas, auxquels on ajoute les déterminations de la morphologie et de la géométrie des grandes structures de l'Univers dont l'aspect hétérogène (qui contraste avec les très faibles anisotropies du rayonnement fossile) est amplement démontré,

- les caractéristiques précises du mouvement d'expansion d'ensemble de l'Univers telles qu'elles sont révélées par l'observation des explosions des supernovae de type Ia...

donnent actuellement une description cosmologique assez concordante : *la théorie du Big Bang serait le scénario plausible concernant l'histoire de l'Univers*. Celui-ci aurait une densité globale strictement égale à la densité critique (les cosmologistes disent que l'Univers est « plat »), ce qui est en accord avec les modèles « inflationnaires » (proposés au début des années 1980 par le physicien américain Alan Guth et plusieurs autres chercheurs) impliquant une accélération brutale de l'expansion de l'Univers dans ses toutes premières phases. Cette densité globale serait due pour 70 % à l'énergie du vide (décrite par la constante cosmologique introduite par Einstein dans ses équations de la dynamique de l'Univers dérivées de la théorie de la relativité générale) et à 30 % de matière principalement sous forme de particules non nucléaires beaucoup plus massives que les nucléons (proton et neutron) et dont l'agitation thermique est donc faible. On dit alors que la matière sombre de l'Univers serait « froide » pour expliquer la morphologie des grandes structures de celui-ci. Les physiciens des particules ont la charge de la preuve de l'existence de ces particules ! Les physiciens du CERN qui auront la chance dans quelques années de mener des expériences avec le futur LHC (Large Hadron Collider, grand collisionneur à hadrons) détecteront peut-être le fameux « boson de Higgs », particule encore hypothétique qui serait à l'origine de la très grande différence de masse entre celle des nucléons et celle de l'électron. Si tel était le cas, ce « boson de Higgs » relativement massif, sera peut-être le candidat idéal pour constituer la matière sombre froide de l'Univers.

La cosmologie moderne qui utilise les méthodes de l'astronomie et celles de la physique des particules offre donc aujourd'hui un ensemble de réponses cohérentes aux questions relatives à l'Univers dans son ensemble. En admettant que les observations nouvelles continueront à conforter ces images et ces représentations de l'Univers, de nombreux mystères continueront à subsister : les relations entre l'Univers et le temps, la description complète de la phase « Big Bang », l'existence éventuelle d'Univers « parallèles ». En ce qui me concerne, j'aime à penser que l'horizon du temps de Planck de  $10^{-43}$  sec en deçà duquel le physicien ne peut plus rien dire, correspond plutôt à la limite imposée par notre ignorance (ou nos limitations) qu'une véritable « origine » ou « création » de l'Univers. Mais il y a fort à parier que les réponses à ces questions demeureront longtemps à l'extérieur du champ de la science.

## **Bibliographie**

J. Audouze, L'Univers - Que sais-je ? n°687 - PUF ; 1997



R. Bélen Barreiro, *New Astronomy Review*, vol. 44, page 179 ; 2000  
P. de Bernadis et coll., *Nature* 404 page 955 (numéro du 27 avril 2000)  
J. Blai-nont, *Le chiffre et le songe* - Odile Jacob -, 1993  
A. Burrows, *Nature* 403 page 727 (numéro du 17 février 2000)  
J. Silk, *Le Big Bang* - Odile Jacob, 1997  
Site à consulter <http://www.iap.fr/>

---

## Légendes

Figure 1 : Amas globulaire M13 (13<sup>e</sup> objet du catalogue de Messier) observé dans la direction de la constellation Hercule (photo prise avec le télescope de 193 cm de l'observatoire de Haute-Provence du CNRS). Cet amas situé à 25 000 années-lumières de nous a un diamètre de 33 années-lumières et comprend plus de 100 000 étoiles dont l'âge d'environ 15 milliards d'années est comparable à celui de l'Univers observable.

Figure 2 : La structuration de l'Univers.

Les différentes structures constituant l'Univers sont reportées sur ce diagramme en fonction de leur masse (en abscisses) et de leur dimension (en ordonnées). Les coordonnées sont, bien sûr, logarithmiques. Le domaine de droite concerne les trous noirs ; il est bordé par la célèbre limite de Schwarzschild. On constate sur ce diagramme que l'Univers est structuré et que les différentes structures sont gouvernées par les quatre interactions fondamentales de la physique : la gravité et l'électromagnétisme pour les grandes structures et les deux forces nucléaires pour les particules subatomique.

Figure 3 : Pour une série de Galaxies dont les photos se trouvent à droite et dont on a déterminé la distance, on peut voir à gauche le décalage vers le rouge subi par les raies d'absorption de l'hydrogène. Le décalage est représenté par la flèche dirigée de gauche à droite. On remarque que la vitesse de fuite par rapport à nous de la dite Galaxie est proportionnelle à sa distance (ceci constitue les fondements de l'expansion de l'Univers par Hubble au cours des années 1920).

Figure 4 : La carte de la partie du ciel établie par les chercheurs de BOOMERANG fait apparaître les nombreuses fluctuations du fond cosmologique (document BOOMERANG).

Figure 5 : Les résultats du satellite (1992) concernant le rayonnement radio diffus.

Cette figure monte le caractère parfaitement thermique du rayonnement radio qui correspond à une température de 2,7 K résultant du refroidissement par dilatation d'un rayonnement ultraviolet ayant été émis lors de la formation des atomes d'hydrogène (en haut) (spectre publié par l'*Astrophysical Journal*) le 20 décembre 1996 et obtenu par D. J. Fixsen, E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer et E. L. Wright. La deuxième partie de la figure montre les légères inhomogénéités dans ce rayonnement (de l'ordre de quelques cent millièmes) qui s'explique par la présence de la matière (cliché NASA).