

Les débuts de l'univers (*)

Prof. P. LEDOUX

Institut d'astrophysique, Université de Liège

La notion même d'univers s'est extraordinairement élargie au cours des âges. Pour les anciens, le soleil, les planètes, la lune, peut-être quelques comètes et novae constituaient, avec la terre, l'essentiel de l'univers significatif. Le ciel étoilé n'était guère, pour la plupart d'entre eux, qu'une toile de fond commode pour repérer les mouvements des composantes du système solaire. Pourtant, pour Aristarque de Samos (300 av. J.C.) qui professait déjà que toutes les planètes y compris la terre tournent autour du soleil, l'absence de parallaxes stellaires mesurables (déplacement angulaire apparent de la position des étoiles vues de différents points de l'orbite de la terre), impliquait le très grand éloignement des étoiles et partant la possibilité de leur importance malgré leur faible éclat apparent.

Mais ses idées restèrent sans grand écho jusqu'à ce que Copernic les ranime au milieu du 16e siècle et que les travaux subséquents de Galilée, de Kepler et finalement de Newton y gagnent, peu à peu, l'opinion générale. Mais il fallut attendre des progrès décisifs de l'optique et de la construction mécanique avant qu'on puisse enfin construire une première lunette suffisamment précise et rigide pour mesurer en 1838, plus de 2000 ans après la théorie d'Aristarque, la première parallaxe stellaire plus petite qu'une seconde d'arc et confirmer ainsi que même les étoiles les plus proches sont au moins à

(*) Résumé de la conférence donnée le 26 janvier 1978, au Planétarium (Heysel)

4 années lumière de nous soit plus de 200.000 fois la distance terre-soleil et qu'elles déversent toutes dans l'espace d'énormes quantités d'énergie parfois un peu moins que le soleil, parfois beaucoup plus.

Une autre étape fut amorcée vers la moitié du dix-huitième siècle par les vues prophétiques de Kant et de Wright qui, guidés peut-être par l'aspect de la voie lactée, considéraient les étoiles visibles comme formant un amas, immense certes mais limité, univers-îles parmi des myriades d'autres perdus dans les profondeurs de l'espace. Cette fois, il fallut attendre l'érection du grand télescope de 2,5 m au Mont Wilson, c'est-à-dire un peu moins de deux cents ans, pour pouvoir enfin, au cours des années 20, résoudre pour la première fois en étoiles individuelles des nébuleuses extragalactiques assez proches comme la nébuleuse d'Andromède. Sans aucun doute, l'univers est bien formé de galaxies (les univers-îles de Kant) de différents types comptant chacune des centaines de milliards d'étoiles et occupant chacune des volumes ayant des dimensions qui se chiffrent en dizaines ou centaines de milliers d'années-lumière. Distribuées à de grandes distances les unes des autres, ces galaxies montrent encore une tendance à se grouper en gigantesques amas.

Cette fois, la scène était mise pour l'entrée en jeu de théories très générales se proposant d'interpréter l'univers en bloc. D'autre part, l'identité de la masse inerte et de la masse (à proprement parler la charge) gravifique, le paradoxe d'Olbers (luminosité uniforme du ciel si les galaxies sont distribuées de façon homogène dans un espace infini), les critiques de Mach et de Poincaré concernant les fondements de la mécanique classique, l'incompatibilité apparente de celle-ci avec l'électromagnétisme concouraient également au besoin d'une révision des concepts de base.

C'est en s'attaquant à cette tâche avec l'originalité du génie, qu'Einstein réalisa en deux temps une synthèse qui tout en englobant les théories courantes comme premières approximations les dépasse et les prolonge jusqu'à des hauteurs fulgurantes révélant des horizons tout à fait nouveaux. En rejetant les « actions instantanées à distance » et en y substituant des signaux lumineux de vitesse finie, il rend simultanément la mécanique et l'électromagnétisme invariants par rapport à tous les systèmes d'axes en mouvements rectilignes et uniformes et découvre l'équivalence de la masse et de l'énergie. A l'époque, seule la radioactivité confirmait cette équivalence qui, de nos jours, est réalisée à volonté dans les centrales nucléaires mais aussi, hélas, dans les bombes atomiques.

Pour dépasser ce stade, Einstein va ensuite ériger l'équivalence des masses inerte et gravifique en un principe de base qui, couplé

aux résultats précédents, conduit à la théorie de la relativité générale dans laquelle la nature de l'espace lui-même, sa courbure et son évolution sont déterminées par la matière et l'énergie qu'il contient. Dans ce cadre, si l'on cherche à représenter une distribution de matière et d'énergie aussi homogène et isotrope que possible, on obtient des équations qui admettent différentes familles de solutions parmi lesquelles Friedmann, en Russie, et Lemaître en Belgique, isolèrent pour la première fois, celles qui correspondent à des univers en expansion, le plus souvent à partir d'une véritable singularité (rayon nul à un instant origine).

Ces univers, où le temps joue un rôle analogue aux trois coordonnées spatiales, peuvent être fermés (finis comme, dans l'espace à trois dimensions, la surface d'une sphère) ou ouverts (infinis, comme la surface d'un hyperboloïde). Dans le premier cas, l'univers peut même osciller, son mouvement d'expansion faisant place après un certain temps, sous l'action de sa propre gravitation, à une contraction qui ramène son rayon vers zéro, état critique dont il peut rebondir vers de nouvelles phases d'expansion, sans doute, avec moins de force par suite de l'inévitable accroissement de l'entropie dans cet espace fermé qui n'est d'ailleurs défini que par la matière qu'il contient, qui n'existe pas en dehors d'elle et qui s'étend ou se contracte avec elle.

Quoi qu'il en soit, ces possibilités étaient à peine explorées théoriquement que Hubble et Humason au Mont Wilson mettaient en évidence un décalage vers le rouge, $\Delta\lambda$, des raies des nébuleuses extra-galactiques grandissant avec leur distance, d , et qui, interprété comme un effet Doppler $\Delta\lambda/\lambda = V/c$ où V est une vitesse de récession, impliquait une expansion générale de l'univers. Cet accord presque instantané de la théorie et des observations connut un retentissement énorme auprès du grand public aussi bien que des spécialistes, auprès des philosophes aussi bien que des hommes de science.

Cette découverte, en plus de l'acquis qu'elle représente, marque aussi, du moins en astronomie, la première fois où les interactions entre technologie et science fondamentale ont réduit à presque rien le délai entre l'observation et la théorie. Et l'approfondissement et l'accélération de ce va-et-vient entre science et technique conduira avec la radioastronomie et un peu plus tard avec les techniques spatiales à la situation inverse où l'observation livre à la sagacité des chercheurs coup sur coup des objets extraordinaires comme les quasars, certaines sources de rayons X et de rayons γ tout à fait inattendus ou raniment, à quelques années de distance, des concepts envisagés théoriquement mais sans trop de foi comme la radiation

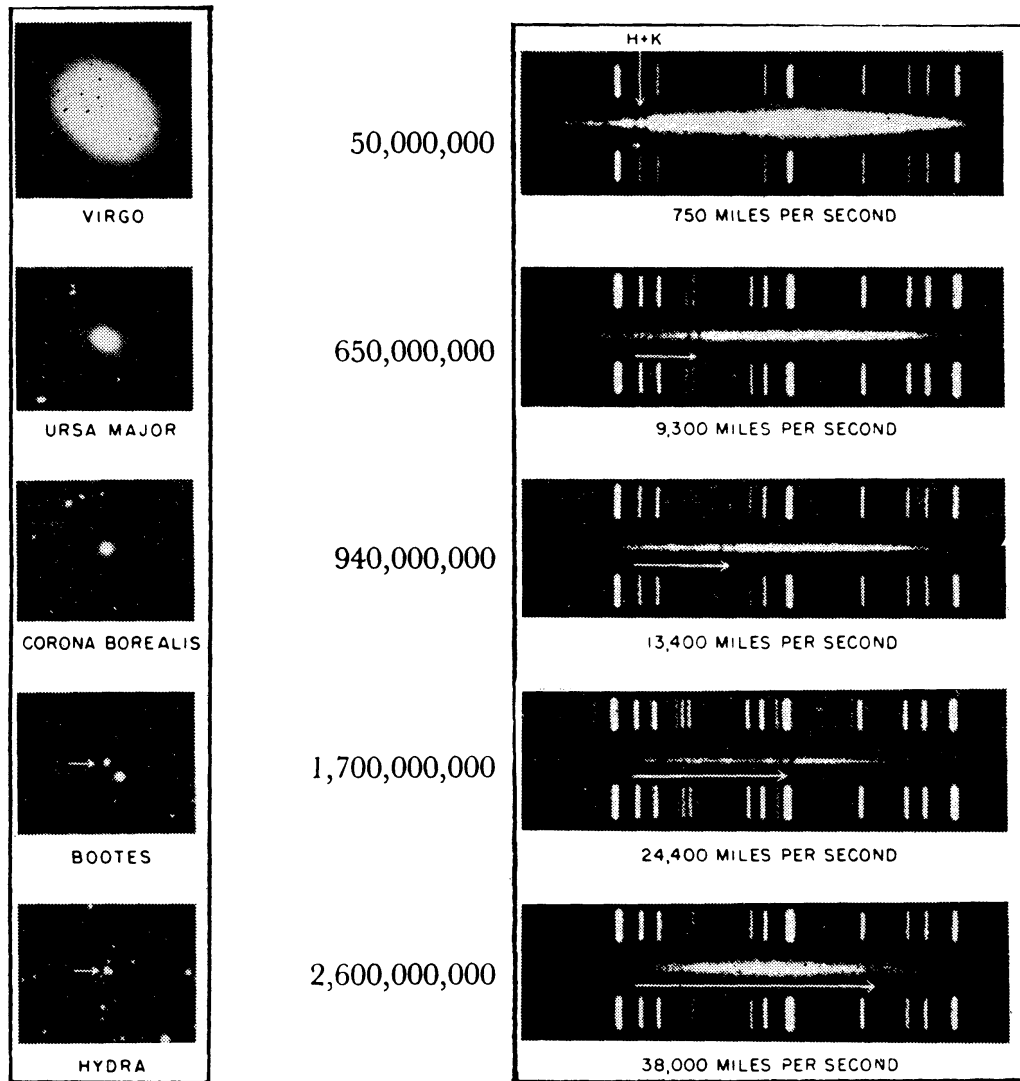


Fig. 1. — Photographies et spectres de galaxies appartenant à des amas de galaxies de plus en plus éloignés (distances en années-lumière) ; les décalages vers le rouge des raies H et K du calcium ionisé indiqués par les flèches augmentent avec la distance. Cependant, la constante H de Hubble dans la relation vitesse radiale — distance, $V = \Delta \lambda / \lambda = Hd$ adoptée pour le graphique est à peu près deux fois trop grande.

de fond à 3°K (Gamow, Alpher et Herman 1948), les pulsars (étoiles de neutrons, Oppenheimer, Volkoff 1939), certaines sources de rayons X (trous noirs, relativité générale).

Revenant à l'expansion de l'univers, il fallut de nombreuses années pour établir avec précision la valeur du facteur de proportionnalité H dans la relation de Hubble $V = Hd$. Pour les galaxies très éloignées, ce facteur H devrait d'ailleurs varier avec la distance et la mise en évidence de cette variation serait un des moyens de discer-

ner si notre univers est fermé ou ouvert. Cependant, à tout instant, l'inverse de H fournit une première approximation du temps écoulé depuis la singularité originelle.

Ainsi s'introduisait, pour la première fois sur le plan scientifique, la notion d'un « âge » de l'univers en bloc. Sans doute, auparavant, le second principe de la thermodynamique avec sa menace de « mort thermique » rendait-il déjà difficilement acceptable une origine infiniment lointaine du moins pour un univers fini. Mais cette dernière notion n'a pas grand sens en physique classique où l'on peut concevoir des univers (c'est-à-dire des cadres spatio-temporels) infinis dans l'espace et dans le temps, les phénomènes, la matière, l'énergie et leurs transformations ne se manifestant à un instant donné que dans une portion spatiale limitée comme une perturbation qui se propagerait indéfiniment au cours du temps ne laissant derrière elle qu'un espace-temps à nouveau calmé sinon vide. Il peut exister en relativité générale et notamment parmi les solutions de Lemaître des univers qui se rapprochent en quelque sorte de cette image, univers infinis ouverts en expansion depuis toujours et qui tendent à s'étendre indéfiniment.

Mais ces types de solutions n'ont guère retenu l'attention parce que les univers (et espaces) finis et en particulier ceux de Friedmann pour lesquels un des paramètres du problème, la constante cosmologique, Λ , est nul ont exercé une espèce de fascination sur les physiciens à commencer par Einstein et que, même Lemaître, parmi toutes ses solutions avec Λ positif, a mis l'accent, avec son « atome primitif », sur celles qui correspondent à des univers naissant d'une singularité à quelque instant précis dans le passé.

Un peu plus tard, dans l'immédiat après-guerre, Gamow, Alpher et Herman tentèrent une interprétation cosmologique de l'origine de tous les éléments chimiques à partir d'hydrogène primitif. Pour cela, l'univers devait être passé par des phases extrêmement chaudes et condensées. Mais ils s'aperçurent bientôt que, même dans ce cas, il était pratiquement impossible de dépasser la formation de l'hélium par suite de l'instabilité des éléments Li^5 et Be^8 . Les astrophysiciens se tournèrent dès lors vers la nucléosynthèse à l'intérieur des étoiles mais, une bonne dizaine d'années plus tard, avec les progrès des connaissances sur l'évolution stellaire, ils durent reconnaître que si cette idée est prometteuse pour tous les éléments plus lourds que l'hélium par contre elle est bien incapable, dans le cas de ce dernier, d'expliquer sa formation et sa répartition dans la matière interstellaire jusqu'aux abondances élevées qu'on y observe. Aussi l'opinion pencha-t-elle de plus en plus en faveur de la formation cosmologique

de l'hélium jusqu'à une abondance vis-à-vis de l'hydrogène de l'ordre de 25 % en masse durant les phases très chaudes et très proches de l'origine de l'univers.

Il en va de même du deutérium rencontré dans la matière inter-stellaire en abondance beaucoup moindre (2×10^{-5} en masse par rapport à l'hydrogène). Mais cette abondance est-elle encore proche de sa valeur originelle ? Ou au contraire, une partie importante en a-t-elle été détruite par spallation ou brûlée dans les étoiles ? Cette incertitude pèse lourdement car la formation du deutérium dépend beaucoup de la densité matérielle du milieu. Si nous étions sûrs de l'abondance originelle du deutérium, nous pourrions repasser à cette densité fixant ainsi un autre paramètre de l'univers dont nous pourrions probablement dire par exemple s'il est ouvert ou fermé. Traitée comme originelle, la valeur de l'abondance citée plus haut conduirait à un univers ouvert.

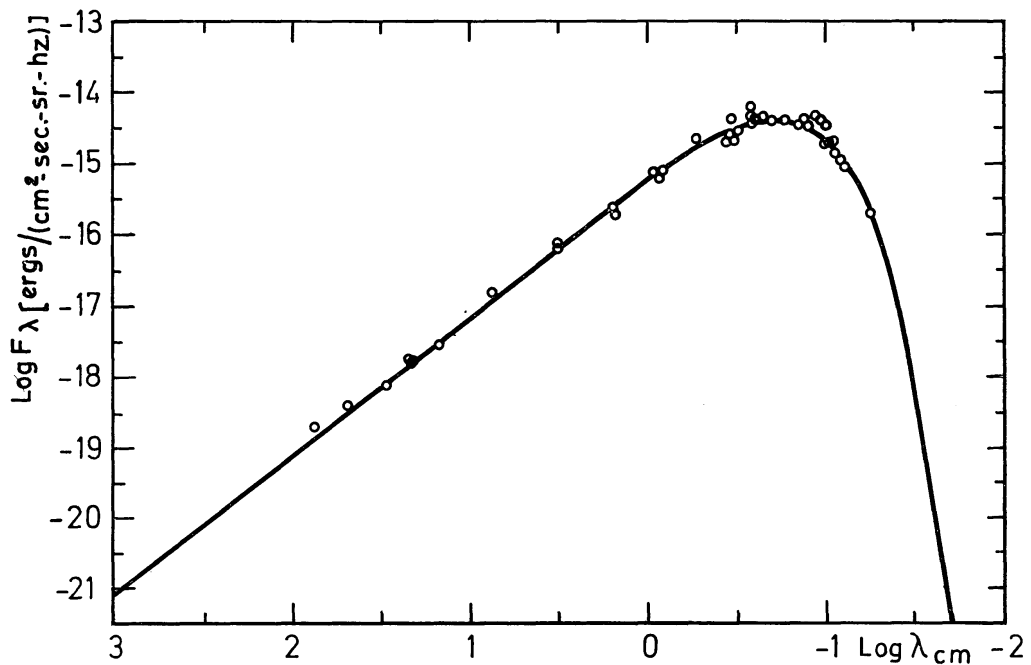


Fig. 2. — Comparaison entre observations (o) de la radiation de fond et la courbe théorique du corps noir à $2,8^{\circ}\text{K}$ en ce qui concerne la répartition du Flux F_{λ} d'énergie en fonction de la longueur d'onde λ .

Cet argument en faveur du « Big Bang » (comme disent les anglo-saxons) fut renforcé d'une manière inattendue par la découverte en 1965 par Penzias et Wilson des laboratoires Bell, d'une radiation de fond extrêmement isotrope et qui, comme on l'a vérifié depuis,