

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 76 (1982-1983)
Heft: 361

Artikel: Cosmologie ou structure et évolution de l'Univers
Autor: Maeder, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-278142>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Cosmologie ou structure et évolution de l'Univers¹

PAR

A. MAEDER²

De tous temps, les hommes ont eu cette préoccupation fondamentale: comprendre l'Univers dans lequel ils se trouvent. C'est ainsi que depuis les Anciens qui imaginaient une Terre plate, surmontée d'une voûte portée par des colonnes aux quatre points cardinaux, jusqu'à la découverte de l'expansion de Hubble et à celle du rayonnement thermique de l'Univers, que nous évoquerons ci-dessous, nos possibilités d'observations et notre connaissance de l'Univers se sont progressivement étendues.

Une étape décisive dans la compréhension de l'Univers a été franchie en 1916, lorsque A. Einstein publia la Théorie de la Relativité générale, qui fournit le contexte mathématique approprié pour étudier la structure et l'évolution de l'Univers. D'autres étapes récentes et capitales jalonnent la découverte de l'Univers. En 1924, l'astronome E. Hubble montra que les «nébuleuses spirales» n'étaient pas des objets locaux, mais des galaxies comme la nôtre. L'Univers était donc beaucoup plus grand qu'on ne l'avait imaginé. Hubble montra aussi, en 1929, que les galaxies participent à un mouvement d'ensemble d'expansion que nous décrivons en détail dans ce texte. Dès 1922, des travaux théoriques très importants, qui permirent par la suite d'interpréter l'expansion découverte par Hubble, avaient été développés sur la base des équations d'Einstein par A. Friedmann, puis dès 1929 par l'abbé G. Lemaître et A. Eddington. Plus près de nous, en 1965, l'extraordinaire découverte par A. Penzias et R. Wilson d'un rayonnement thermique, que l'on interprète comme la chaleur résiduelle de l'explosion initiale de l'Univers, constitue une autre de ces étapes fondamentales.

Pour aborder, de manière simple et directe sans recourir à des développements mathématiques, l'étude de la structure et de l'évolution de l'Univers, cette partie de l'Astronomie que l'on appelle la Cosmologie, nous

¹Conférence faite à la SVSN le 5 juin 1980, dans le cadre de son Cours d'information.

²Observatoire de Genève.

examinerons pour commencer les trois faits cosmologiques essentiels suivants:

- Le paradoxe de Cheseaux-Olbers.
- L'expansion de l'Univers.
- Le rayonnement thermique.

I. *Le paradoxe de Cheseaux-Olbers, ou «Pourquoi le ciel est-il noir la nuit?»*

Les questions les plus simples en apparence cachent parfois les mystères les plus profonds. Depuis toujours, on a pu voir que le soir, après le coucher du Soleil, le fond du ciel devenait noir entre les étoiles qui scintillent. Ce n'est pourtant qu'au XVIII^e siècle, en 1744, qu'il fut réalisé par Loys de Cheseaux que la noirceur du ciel nocturne posait un important problème cosmologique. (Jean-Philippe Loys de Cheseaux était un astronome vaudois, qui vivait à Cheseaux-sur-Lausanne; il fit des contributions fondamentales qu'il publia dans son «Traité de la Comète» à l'âge de 26 ans. De faible santé, il mourut quelques années plus tard. L'histoire de l'Astronomie garde son nom pour deux découvertes importantes: d'une part, le paradoxe qui porte son nom auquel est associé celui de W. Olbers, un médecin allemand qui redécouvrit le même paradoxe en 1823, et d'autre part la première estimation, ingénieuse et correcte, de la distance des étoiles.)

Loys de Cheseaux nota que si l'on fait les hypothèses les plus simples possibles sur la structure de l'Univers, à savoir:

- l'Univers est infini et statique,
- il est uniformément peuplé d'étoiles,

on trouve que le ciel devrait être brillant, comme le Soleil, même la nuit. On peut certes le montrer mathématiquement et rigoureusement, mais il est aussi possible de le concevoir simplement. En effet, si les deux hypothèses ci-dessus étaient réalisées, notre ligne de visée devrait intercepter une étoile à plus ou moins longue distance et cela quel que soit le point de la voûte céleste que l'on observe. En conséquence, en chaque point du ciel observé, il devrait y avoir une étoile et notre ciel devrait être lumineux comme le Soleil.

Or, le ciel n'est pas brillant, heureusement pour nous d'ailleurs; cela signifie que l'une au moins des hypothèses ci-dessus n'est pas satisfaite. Pour tenter de résoudre ce problème, Loys de Cheseaux, puis Olbers, supposèrent que l'espace interstellaire était rempli d'un gaz qui absorbe la lumière des étoiles. (L'existence d'un tel gaz, de densité extrêmement faible, se trouva confirmée par la suite.) Néanmoins, cette explication n'est pas suffisante: après un certain temps, le gaz échauffé devrait émettre autant d'énergie qu'il en reçoit et par conséquent le ciel devrait être tout aussi brillant. Nous verrons plus loin (§ V) que l'explication correcte de cet intéressant problème est liée à l'âge fini de l'Univers (environ 18 milliards

d'années). Ainsi, l'observation élémentaire de la noirceur du ciel nocturne, que chacun a faite sans trop se poser de questions, a une portée et un contenu très profonds.

II. *La récession des galaxies*

Dès 1912, l'astronome W. L. Slipher, de l'Observatoire de Lowell aux Etats-Unis, était parvenu à mesurer la vitesse de certaines nébuleuses, bien avant que leur caractère extragalactique ne fût confirmé. Dès 1925, les travaux de Slipher montrèrent que toutes les galaxies suffisamment distantes semblaient s'éloigner de nous, après corrections des effets dus au mouvement du Soleil dans notre galaxie.

Ici, il nous faut faire un bref rappel sur la mesure des vitesses. On appelle spectre la lumière décomposée suivant ses couleurs (ou longueurs d'onde). Le spectre d'une étoile ou d'une galaxie, comme celui d'une lampe, présente des raies sombres qui sont, en quelque sorte, la signature des éléments chimiques contenus dans la source. Chaque élément a des raies à une longueur d'onde bien précise, définie par la physique atomique. Si la source est mobile, les raies sont déplacées. Elles sont décalées vers le bleu lorsque la source s'approche et vers le rouge lorsque la source s'éloigne. Ce déplacement est appelé décalage spectral. La grandeur de ce décalage permet de mesurer la vitesse de fuite ou d'approche le long de la ligne de visée (vitesse radiale).

C'est sur la base de tels décalages spectraux que Slipher montra le mouvement de fuite des galaxies. Ce mouvement a des caractéristiques extrêmement importantes:

a) *La Loi de Hubble.* Cette loi, très importante, trouvée par Hubble en 1929, dit que la vitesse de fuite d'une galaxie est d'autant plus grande que la galaxie est lointaine. (Cette loi s'écrit $v = H r$, où v est la vitesse mesurée par le décalage spectral et r la distance. H est la constante de Hubble.) Selon les valeurs actuelles de la calibration des distances, cette loi nous dit (fig. 1) que si une galaxie est située à la distance de 10 millions d'années-lumière, sa vitesse de fuite est de 170 km/s. Pour une distance de 20 millions d'années-lumière, on observe une vitesse de 340 km/s et ainsi de suite.

En 1929, la vitesse la plus élevée que Hubble avait observée était de 1200 km/s. Grâce au développement des instruments et en particulier du télescope de 5 m du Mont Palomar, inauguré en 1948, on est parvenu à mesurer des galaxies beaucoup plus lointaines et possédant par conséquent des vitesses de fuite beaucoup plus grandes. En 1956, la vitesse observée la plus élevée était de 60 600 km/s. Aujourd'hui, on a pu observer des galaxies dont le décalage spectral correspond à des vitesses de l'ordre de 150 000 km/s. Enfin, les quasars, dont il a été question dans la conférence précédente, présentent des décalages spectraux considérables, dont les plus élevés correspondent à des vitesses voisines de 90% de la

vitesse de la lumière (compte tenu des effets particuliers survenant à ces vitesses extrêmes).

b) *L'isotropie de l'expansion et le Principe cosmologique.* Quelle que soit la direction du ciel que l'on observe, la vitesse de fuite des galaxies croît de la même manière avec la distance. On parle de l'isotropie de l'expansion, qui est illustrée dans la figure 1.

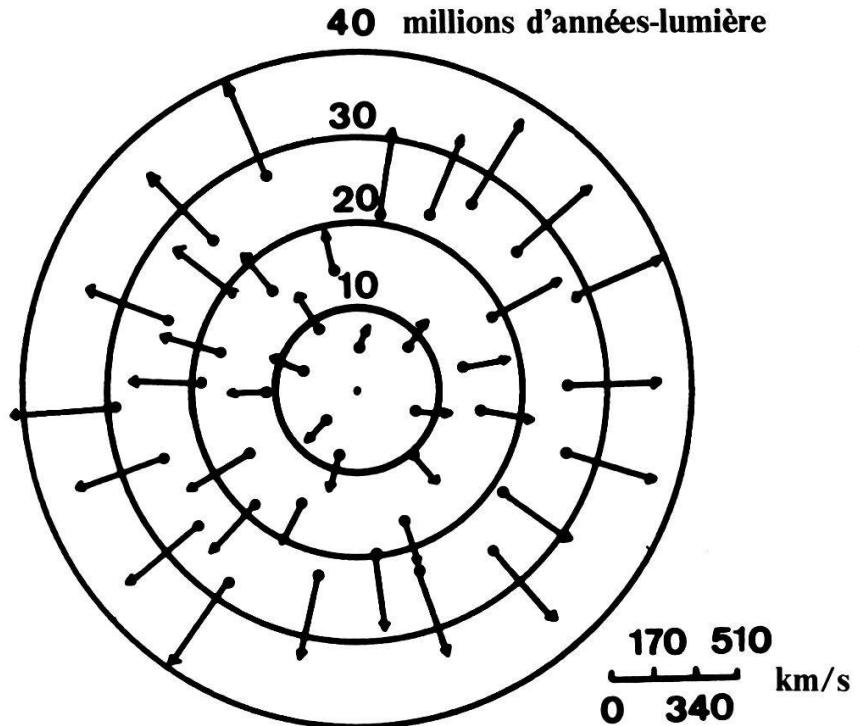


Fig. 1. – Représentation du mouvement de récession des galaxies. Notre galaxie est au centre; les autres galaxies sont représentées par des points, auxquels sont associées des flèches de longueur proportionnelle à la vitesse de fuite. Les propriétés essentielles de l'expansion sont bien illustrées: les vitesses croissent proportionnellement à la distance (loi de Hubble), l'expansion est la même dans toutes les directions (isotropie).

En apparence, tout se passe comme si nous étions au centre d'un mouvement d'expansion. Est-ce à dire que nous sommes revenus à la conception médiévale du géocentrisme? Certainement pas. Il y a une autre explication: celle de l'expansion généralisée, que l'on comprendra bien avec un exemple connu.

Considérons un ballon gonflable sur lequel on a peint des points noirs inextensibles représentant les galaxies. Lorsqu'on gonfle le ballon, chaque point voit les autres s'éloigner. Pour chaque observateur attaché à une galaxie, tout se passe comme s'il était au centre de l'expansion.

L'isotropie de l'expansion nous amène à introduire un concept assez évident, mais très important: le Principe cosmologique. Ce principe dit que l'Univers et son expansion apparaissent isotropes autour de chaque observateur. En d'autres termes, notre galaxie peut se considérer comme étant au centre de l'Univers, mais il en va de même pour chaque galaxie. L'exemple du ballon nous permet donc de comprendre pourquoi nous

avons l'air d'être au centre d'une expansion isotrope, sans pour autant avoir une position privilégiée dans l'Univers.

Jusqu'ici, nous avons examiné les propriétés du mouvement des galaxies dans l'Univers; mentionnons aussi quelques-uns des résultats importants concernant la distribution de la matière dans l'Univers. Les clichés nous révèlent que les galaxies sont généralement groupées en amas de galaxies qui contiennent de quelques dizaines à quelques milliers de galaxies. L'Amas local groupe une vingtaine de galaxies, dont notre Voie Lactée et la Nébuleuse d'Andromède sont les membres les plus importants.

Les amas sont souvent rassemblés eux-mêmes en super-amas de galaxies. Il ne semble pas qu'il existe d'amas de super-amas; la hiérarchie paraît donc s'arrêter aux super-amas. Ces amas et super-amas représentent des inhomogénéités locales importantes dans la distribution cosmique de la matière. C'est ainsi qu'avec des télescopes de moyenne importance, l'Univers extragalactique apparaît essentiellement inhomogène et anisotrope. En particulier, il y a une très faible concentration de galaxies dans la région de Virgo, à environ 60 millions d'années-lumière; cette concentration correspond en fait au centre du super-amas local.

Cependant, lorsqu'on fait des sondages à très grande profondeur avec les télescopes les plus puissants (centaines de millions et milliards d'années-lumière), on observe que la répartition des super-amas de galaxies est homogène. Hormis les effets perturbateurs dus à la matière interstellaire de notre galaxie, l'Univers apparaît identique quelle que soit la direction considérée. Il n'y a plus de concentration préférentielle dans Virgo. Ainsi, les sondages en profondeur nous révèlent que l'Univers à très grande échelle est homogène et isotrope. Ce résultat (qui confirme l'hypothèse déjà faite par Einstein dans son premier modèle d'Univers en 1917) est une autre indication de la validité du Principe cosmologique à très grande échelle.

c) *L'explosion primordiale ou le Big-Bang.* Nous n'avons pas encore tiré tous les renseignements possibles de la loi de Hubble. Reprenons la figure 1 décrivant l'expansion. Supposons pour l'instant que les vitesses d'expansion restent inchangées au cours de l'évolution de l'Univers et voyons ce qui se passe si l'on remonte dans le temps. On réalise que dans le passé les galaxies étaient plus proches les unes des autres et en remontant suffisamment, il arrive un moment où toute la matière qui constitue aujourd'hui les galaxies était concentrée. Le temps qui s'est écoulé depuis cet événement s'appelle le temps de Hubble. Comme nous l'avons dit plus haut, l'expansion est de 170 km/s par 10 millions d'années-lumière; le temps de Hubble s'obtient donc en divisant la distance de 10 millions d'années-lumière par 170 km/s. Cela nous donne une valeur pour le temps de Hubble d'environ 18 milliards d'années.

L'interprétation de la loi de Hubble nous conduit donc à penser qu'il s'est produit, il y a environ 18 milliards d'années, une explosion formida-

ble, que l'on appelle le Big-Bang, et de laquelle est né l'Univers. La densité de l'Univers était infinie, toute la matière étant concentrée. L'expansion que nous observons aujourd'hui est le résultat de cette explosion initiale. Que l'Univers ait commencé par un Big-Bang est une conclusion à laquelle nous n'échappons pas si l'on admet que les lois physiques que l'on connaît maintenant ont été les mêmes à toutes les époques de l'évolution de l'Univers. C'est l'hypothèse généralement admise et c'est aussi celle que nous retenons dans cette présentation générale. De nombreux groupes de chercheurs étudient ces problèmes et divers autres modèles cosmologiques ont été proposés. Nous n'avons évidemment pas la place de les mentionner ici. Le modèle standard, que nous évoquons dans cette conférence, a une valeur immense tant par sa simplicité que comme modèle de référence. Une chose est en tout cas claire, c'est qu'il faut l'avoir bien compris et soigneusement étudié, même dans sa formulation mathématique, avant de chercher à envisager d'autres modèles cosmologiques.

Nous allons maintenant nous tourner vers une autre découverte fondamentale de la Cosmologie.

III. *Le rayonnement thermique du fond du ciel*

En 1964, la compagnie Bell Telephone possédait une antenne radio à Holmdel, dans le New Jersey aux Etats-Unis, pour des télécommunications via le satellite Echo. Deux radio-astronomes de cette compagnie, A. Penzias et R. Wilson, utilisaient cette antenne pour mesurer le bruit de fond radio de notre galaxie. Lors de ces travaux, ils découvrirent l'existence d'un rayonnement radio très faible, dont ils ne parvenaient pas à expliquer l'origine. (Tout objet de température T émet un rayonnement dont les caractéristiques correspondent à cette température. Le rayonnement du Soleil correspond à environ 5500°C . Le corps humain, dont la température est de 37°C , rayonne dans l'infrarouge.) Le rayonnement radio observé par Penzias et Wilson a des caractéristiques qui correspondent à une température très basse, -270°C , c'est-à-dire à 3° Kelvin. De plus, ce rayonnement radio, qui semble provenir du fond du ciel, présente la propriété d'être isotrope avec une très grande précision.

La découverte de ce rayonnement radio de basse température fut un événement majeur de l'Astronomie: elle renforça considérablement l'idée de l'existence d'une phase condensée dans l'Univers initial, c'est-à-dire d'un Big-Bang. En effet, cette découverte correspondait à une prévision théorique formulée en 1946 par G. Gamov et ses collaborateurs. Le raisonnement de Gamov était en gros le suivant: si l'Univers a connu un Big-Bang dans le passé (comme le suggère l'interprétation de la loi de Hubble), il a dû se trouver dans un état de densité et de température très élevées. On parle parfois d'une boule de feu ou d'un atome primitif dans la théorie de Lemaître. Lors de l'expansion consécutive au Big-Bang, le rayonnement s'est trouvé en quelque sorte décomprimé et par conséquent

il s'est refroidi (comme le ferait un gaz normal). Aujourd'hui, on doit donc observer ce rayonnement, ou si l'on veut la chaleur résiduelle de l'explosion initiale. Il apparut très rapidement que c'était ce rayonnement qu'avaient découvert Penzias et Wilson.

Comment peut-on affirmer qu'il s'agit bien du rayonnement correspondant au Big-Bang? Ce point a fait l'objet de beaucoup d'analyses soignées. L'isotropie parfaite de ce rayonnement joue un rôle très important dans l'argumentation en faveur de son origine cosmologique. Cette isotropie exclut que ce rayonnement ait une origine dans le système solaire, dans la galaxie, dans l'amas ou le super-amas local. Car tous ces systèmes ont soit des plans de symétrie, soit des inhomogénéités importantes et tout rayonnement émis par ces systèmes devrait présenter des directions préférentielles, caractérisées par des changements d'intensité ou de température. L'absence de direction privilégiée dans le rayonnement observé par Penzias et Wilson, qui a été confirmée par de nombreuses analyses ultérieures, donne donc un très grand poids à l'interprétation cosmologique. Du même coup, cette isotropie renforce le Principe cosmologique. En effet, si l'Univers se dilatait sous forme d'un cigare, le rayonnement serait davantage décomprimé selon l'axe du cigare et la température observée serait plus faible dans cette direction.

Comme l'expansion de Hubble, le rayonnement à 3°K est une conséquence directe des conditions physiques régnant dans l'Univers initial. L'observation de ce rayonnement est un événement capital, qui nous permettra, au § VI ci-dessous, de reconstituer les grandes phases de l'histoire de l'Univers à ses débuts.

IV. *L'expansion se poursuivra-t-elle toujours?*

Les modèles cosmologiques construits dans le cadre de la théorie de la Relativité générale nous montrent que la récession des galaxies résulte d'une expansion générale de l'espace et non pas d'un mouvement de fuite des galaxies à travers un espace préexistant. Ainsi, il ne faut pas voir le Big-Bang comme l'explosion d'une boule de feu à travers un espace donné, mais le Big-Bang est l'explosion de l'espace lui-même.

Cela étant bien précisé, nous allons décrire ci-dessous un modèle très simple qui nous permettra déjà de bien saisir quel est le principal problème que la Cosmologie moderne cherche à résoudre. Ce modèle se révélera extrêmement utile, mais il est évident qu'il ne saurait remplacer une formulation mathématique plus complète faisant appel à la géométrie de l'espace. Aussi nous permettons-nous de recommander au lecteur de ne pas chercher à bâtir des extrapolations personnelles sur la base de ce modèle simple: il se peut certes qu'elles soient exactes, mais ce ne sera pas toujours le cas. Par exemple, se demander où s'est produit le Big-Bang n'a pas plus de sens que de se demander ce qui sur la Terre est plus au nord que le pôle Nord.

Dans cette représentation simplifiée, nous disons que toutes les galaxies se meuvent dans l'espace, lancées sur des trajectoires «ballistiques» (les astronomes disent géodésiques). Tout se passe comme si les galaxies avaient été chassées par des forces ayant agi lors du Big-Bang et que maintenant elles poursuivent leur mouvement sur leur lancée initiale. Si aucune force ne s'exerçait sur elles, les galaxies décriraient leur trajectoire selon un mouvement uniforme à vitesse constante comme nous l'enseignent les cours de physique élémentaire. Il y a cependant des forces qui agissent sur les galaxies. Ce sont les forces d'attraction gravifiques qui s'exercent entre les galaxies elles-mêmes. Le mouvement d'expansion ne se déroule donc pas à vitesse toujours constante, comme nous l'avons supposé jusqu'ici. Mais le mouvement des galaxies tend à se ralentir, sous l'effet de l'attraction mutuelle des galaxies.

L'importance de ce phénomène de freinage, ou de décélération, va dépendre de la quantité de matière présente dans un volume donné de l'espace, c'est-à-dire de la densité de matière dans l'Univers. En effet, plus la densité de matière (sous forme de galaxie ou de gaz intergalactique) est élevée, plus le freinage de l'expansion sera grand. Deux scénarios sont alors possibles, ils sont illustrés dans la figure 2.

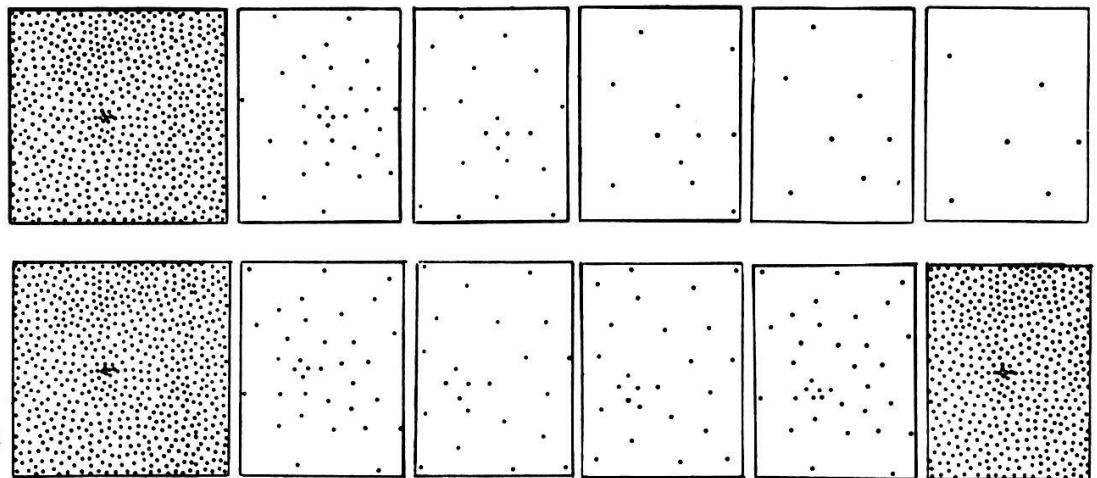


Fig. 2. – Les deux scénarios de l'expansion. Dans le premier cas, la densité moyenne dans l'Univers ne permet pas de freiner suffisamment l'expansion et celle-ci se poursuivra toujours. Dans le second cas, la densité est suffisante pour arrêter l'expansion et produire une contraction.

a) Si la densité de matière est suffisamment élevée, la décélération sera importante et le mouvement d'expansion pourra éventuellement s'arrêter un jour. Sous l'effet de leur gravitation, les galaxies vont alors amorcer un mouvement inverse, c'est-à-dire de contraction d'ensemble. Après avoir diminué du fait de l'expansion, la densité va de nouveau augmenter et ce scénario se terminera par une catastrophe finale. Cette catastrophe sera analogue au Big-Bang, mais les événements se dérouleront dans un ordre inverse. Le temps de chute, après l'extension maximale, prendra autant de temps que la phase d'expansion depuis le Big-Bang initial.

b) Dans le deuxième scénario, la densité est suffisamment faible pour que les galaxies, bien que freinées par leurs interactions gravifiques, ne voient jamais leur mouvement d'expansion s'arrêter. L'expansion de l'Univers se poursuit et l'Univers devient de plus en plus vide.

Ces deux cas sont séparés par une situation limite, celle où l'expansion se ralentit, mais juste pas suffisamment pour s'arrêter en un temps fini et amorcer une phase de contraction. Ce modèle cosmologique a été envisagé pour la première fois dans les années 30 par Einstein et de Sitter; il est souvent désigné sous le nom de modèle Einstein – de Sitter. Pour des raisons qui sont liées à la géométrie, les modèles du type a) ci-dessus sont souvent appelés modèles fermés, tandis que le cas b) correspond aux modèles ouverts.

Le problème N° 1 des observations cosmologiques qui sont effectuées depuis environ trente ans est de savoir lequel des scénarios mentionnés plus haut correspond à l'Univers réel. C'est l'objet des tests cosmologiques que nous évoquerons ci-dessous.

Il est certes possible qu'aucun des scénarios mentionnés ci-dessus ne soit le bon. Si tel devait être le cas, cela pourrait se manifester par des inconsistances entre les diverses prédictions des modèles et les observations. Pour l'heure, les observations ne sont pas suffisamment précises pour autoriser de telles conclusions.

V. *Les tests cosmologiques*

L'objet de ces tests est de tenter de découvrir quel modèle représente le mieux l'Univers. Plusieurs tests observationnels sont possibles. Nous en décrirons deux parmi les principaux et les plus aptes à faire comprendre la nature du problème.

A) *L'âge de l'Univers*

Nous avons vu au § II que, si le taux d'expansion avait toujours été le même, l'explosion initiale aurait dû survenir il y a environ 18 milliards d'années. Cela correspondrait en fait à une décélération nulle. Comme il y a dans les modèles que nous avons décrits une décélération non nulle, cela signifie que par le passé l'expansion était beaucoup plus rapide. Dans ce cas, pour parvenir à l'Univers actuel, l'explosion initiale n'a pas dû survenir si tôt et l'âge de l'Univers est donc inférieur à 18 milliards d'années.

La figure 3 illustre les changements du rayon R de l'Univers au cours du temps. L'époque présente est indiquée, le taux d'expansion actuel est noté par un petit trait épais. Le cas sans décélération correspond à une ligne droite qui débute (intersection avec l'axe horizontal) il y a 18 milliards d'années. Les modèles ouverts, c'est-à-dire légèrement décélérés et dont l'expansion ne cessera jamais, ont des âges compris entre 18 et 12 milliards d'années. Cette dernière valeur correspond au cas du modèle

d'Einstein – de Sitter. Les modèles fermés (qui ont eu une expansion très rapide au début, puisqu'ils sont très fortement décélérés) ont des âges inférieurs à 12 milliards d'années. On voit sur la figure 3 que le rayon de ces modèles passe par un maximum et qu'il diminue ensuite pour aboutir finalement à une catastrophe gravifique finale.

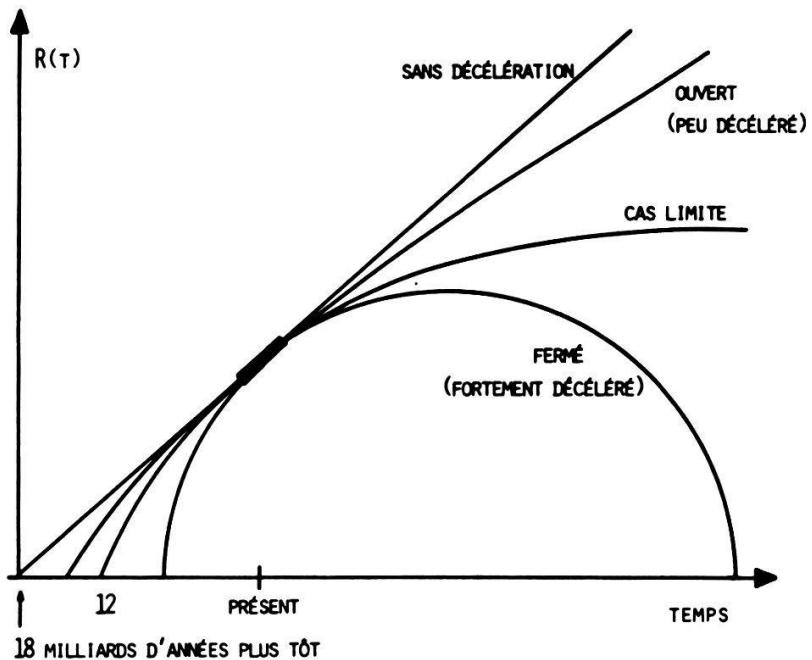


Fig. 3. – Evolution du rayon $R(t)$ de l'Univers dans les différents modèles. Cas ouvert: faible décélération, l'expansion a débuté il y a entre 12 et 18 milliards d'années (suivant la densité). Cas fermé: forte décélération, l'expansion a débuté il y a moins de 12 milliards d'années.

On réalise immédiatement que si l'on avait un moyen de connaître l'âge de l'Univers, on pourrait, en le comparant au temps de Hubble de 18 milliards d'années, savoir si l'Univers est ouvert ou fermé, c'est-à-dire savoir si l'expansion se poursuivra toujours ou non. On connaît deux méthodes indépendantes pour estimer l'âge de l'Univers. L'une est basée sur l'âge des plus vieilles étoiles: l'Univers doit être au moins aussi âgé que les plus vieilles étoiles. Les analyses photométriques que nous effectuons à l'Observatoire de Genève notamment nous indiquent que les plus vieilles étoiles ont un âge supérieur à 10 milliards d'années, avec une valeur plus probable entre 10 et 15 milliards d'années.

Une autre méthode est basée sur l'étude de l'abondance de certains éléments radioactifs, dont on sait qu'ils sont le résultat de la désintégration d'éléments radioactifs produits dans les générations d'étoiles précédant le Soleil.

Cette méthode beaucoup moins précise nous fournit en fait l'âge de certains éléments du système solaire qui peuvent être nettement postérieurs à l'origine de l'Univers. Cette méthode donne des âges égaux ou supérieurs à 8 milliards d'années.

Nous pouvons donc dire que l'âge de l'Univers est très probablement compris entre 10 et 18 milliards d'années. Ce n'est pas suffisant pour préciser complètement le modèle d'Univers. Mais cela nous indique d'ores et déjà que l'Univers n'est pas fortement fermé. Soulignons que le résultat que l'Univers a un âge fini et qu'il n'a pas toujours existé est déjà très important en soi. C'est ce résultat qui nous permet de comprendre le paradoxe de Cheseaux-Olbers. Nous y voilà !

L'explication du paradoxe de Cheseaux-Olbers

L'âge de l'Univers est fini, disons 15 milliards d'années pour fixer les idées. La vitesse de la lumière n'étant pas infinie, il s'ensuit que l'on ne peut «voir» au-delà de 15 milliards d'années-lumière, sinon la lumière aurait dû partir avant la naissance de l'Univers.

La distance de 15 milliards d'années-lumière marque pour nous un horizon cosmique qui limite notre champ de vision. Ainsi, tout se passe comme si nous étions au centre d'une bulle dont les bords s'étendent à la vitesse de la lumière. Il se trouve alors qu'à l'intérieur de cette limite de 15 milliards d'années, la densité de matière n'est pas suffisante pour que notre ligne de visée rencontre toujours une étoile avant d'avoir atteint l'horizon. (Le décalage spectral contribue aussi à affaiblir l'éclat des galaxies lointaines, mais cet effet ne serait pas suffisant pour expliquer la noirceur du ciel nocturne.)

En conclusion, nous dirons que la noirceur du ciel nocturne et le paradoxe trouvé autrefois par Loys de Cheseaux trouvent leur explication dans le fait que l'Univers a un âge fini, ce qui nous impose un horizon limite.

B) L'éclat des galaxies lointaines

Un bon moyen de savoir quelle est la décélération de l'Univers serait de mesurer aujourd'hui la vitesse d'une galaxie lointaine et de la remesurer ultérieurement pour voir une éventuelle différence. Cela n'est pas possible, il faudrait attendre au moins plusieurs millions d'années pour obtenir une valeur significative.

Il est cependant possible de mesurer les vitesses de galaxies dans des époques très reculées et de les comparer aux vitesses de galaxies d'époques récentes. En effet, lorsque nous observons des galaxies très distantes, par exemple à quelques milliards d'années-lumière, nous les voyons telles qu'elles étaient il y a quelques milliards d'années et leur décalage spectral reflète le taux d'expansion dans ce lointain passé. Les galaxies proches, c'est-à-dire situées à quelques millions ou quelques dizaines de millions d'années-lumière, reflètent, quant à elles, le taux d'expansion contemporain. Ainsi, si l'expansion était beaucoup plus forte dans le passé, la vitesse était beaucoup plus grande pour une distance donnée. Cela se manifeste dans la figure 4, où les vitesses mesurées par les décalages spectraux sont portées en fonction de la distance, par des courbes qui tournent vers le

haut. La comparaison des observations avec un réseau de courbes, tel que celui de la figure 4, doit en principe nous permettre de trouver si l'Univers est décéléré ou non.

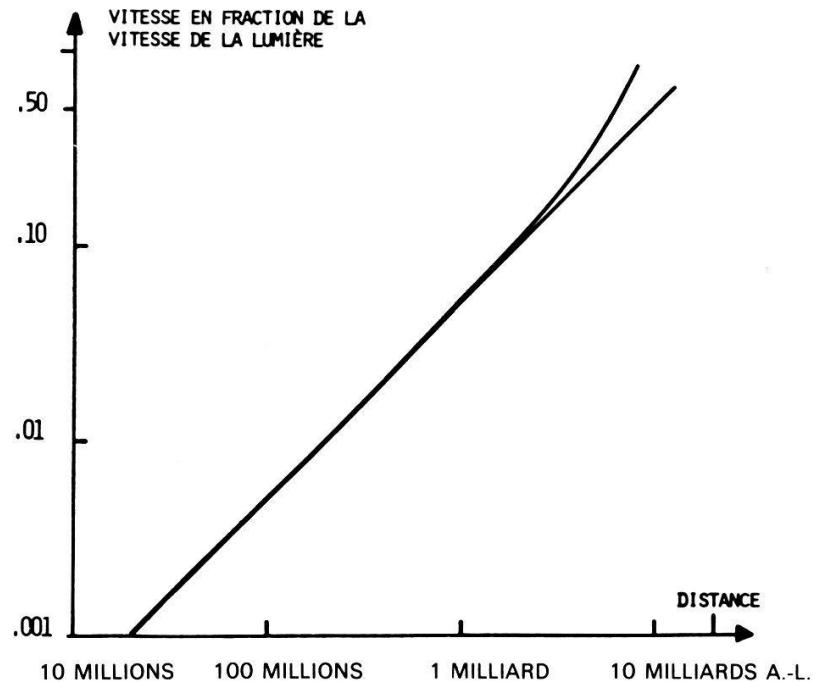


Fig. 4. – Relation entre la vitesse et la distance. Si la décélération est nulle, le taux d'expansion a toujours été le même et par conséquent la vitesse croît linéairement avec la distance (ligne droite). S'il y a décélération, les vitesses étaient plus grandes dans le passé et par conséquent, pour de très grandes distances, on observe des vitesses croissant plus rapidement avec la distance (courbe vers le haut). En fait, pour les objets très lointains, les astronomes portent l'éclat des galaxies et non pas leur distance.

En fait, on ne peut obtenir des mesures de distance (indépendantes de la loi de Hubble) que pour les galaxies suffisamment proches. Aussi, ce que l'on porte dans la figure 4 à la place de la distance, c'est l'éclat apparent des galaxies (ou leur diamètre apparent). Les galaxies n'ayant pas toutes le même éclat, on pourrait penser que l'éclat apparent ne reflète que très mal la distance des galaxies. Il se trouve, fort heureusement, que la galaxie la plus brillante d'un amas de galaxies, suffisamment riche en galaxies, a toujours le même éclat intrinsèque et cela avec une très bonne précision. L'éclat apparent des galaxies les plus brillantes d'amas reflète donc bien leur distance et c'est ainsi que l'on peut utiliser ces galaxies les plus brillantes d'amas pour construire une figure analogue à la figure 4. C'est ce qu'on appelle le diagramme de Hubble.

Le problème n'est toutefois pas si simple, car la lumière d'une galaxie est la somme de la lumière des centaines de milliards d'étoiles qui la composent. Or, les étoiles évoluent au cours du temps. Les galaxies très lointaines ont donc en moyenne une population d'étoiles plus jeune que les galaxies proches. Il y a donc des corrections très détaillées à effectuer

pour tenir compte de l'évolution des étoiles qui composent les galaxies et cela ne peut être fait que sur la base des théories et observations effectuées sur l'évolution des étoiles de notre galaxie.

Sur la base de ce test, de même que sur la base d'autres tests cosmologiques que nous ne pouvons mentionner ici, on parvient à montrer que l'Univers n'est en tout cas pas fortement décéléré. Les diverses observations suggèrent que l'Univers n'est pas très éloigné du modèle intermédiaire de Einstein – de Sitter, avec une légère tendance (non décisive) en faveur d'un modèle ouvert.

VI. *L'histoire des premières phases de l'Univers*

On peut tenter de décrire l'évolution de l'Univers dans ses premières phases. De nombreux travaux ont été consacrés à ce genre de recherches, qui ont été admirablement décrites à l'intention du grand public dans le livre de S. Weinberg, «Les trois premières minutes de l'Univers» (Ed. du Seuil, 1978).

La loi de Hubble et la découverte du rayonnement thermique indiquent que l'Univers, dans sa phase initiale, a été très condensé et la théorie du Big-Bang prévoit une explosion initiale. Partant de la température de 3° K observée actuellement et de la densité moyenne de l'Univers actuel (environ 10^{-30} kg/dm³), les modèles théoriques nous permettent de savoir quelles étaient les températures et densités par le passé. On trouve, par exemple, que lorsque l'âge de l'Univers n'était que de 60 000 ans (au lieu des 10-18 milliards actuels), la température était de 10 000 degrés et la densité moyenne de 10^{-18} kg/dm³. Pour un âge de l'Univers de 35 minutes, la température indiquée par les modèles est de 300 millions de degrés et la densité de 0,09 kg/dm³. En remontant jusqu'à 1 seconde, on obtient une température supérieure à 10 milliards de degrés et une densité de 380 000 kg/dm³.

Des lecteurs pourront se demander ce que valent de tels calculs. Il faut bien se rendre compte qu'en science, ce n'est qu'en envisageant très sérieusement les conséquences ultimes des hypothèses et des modèles retenus que l'on a des chances de parvenir à les confirmer ou à les mettre en défaut. Cette dernière éventualité n'est d'ailleurs pas à redouter: elle est la condition de progrès ultérieurs. Il faut mentionner aussi qu'il y a un lien étroit entre les événements survenus au début de l'Univers et la physique des hautes énergies, étudiée au CERN, par exemple. En effet, les grands accélérateurs nous renseignent sur les propriétés physiques de la matière à des énergies correspondant à des centaines de milliards de degrés, ce qui était vraisemblablement les conditions régnant dans l'Univers initial.

On distingue plusieurs phases successives dans l'histoire de l'Univers initial selon les modèles actuels.

La première phase n'a guère duré que le premier... 1/100 de seconde, c'est-à-dire lorsque la température était supérieure à 100 milliards de

degrés. Au début de cette phase, on présume que seul du rayonnement très intense existait (Big-Bang). Ce rayonnement s'est rapidement matérialisé, alors que débutaient l'expansion et le refroidissement, en particules lourdes: neutrons et protons, ainsi que leurs antiparticules. C'est pour cette raison que cette phase, dont les mécanismes nous sont encore très obscurs, s'appelle phase hadronique (hadrons: particules lourdes).

Au-dessous de cette température, le rayonnement était encore assez énergétique pour parvenir à créer des particules légères qu'on appelle leptons, tels que l'électron; c'est la phase leptique. Cette deuxième phase se termine au bout d'environ 10 secondes. On notera qu'il reste des problèmes énormes à résoudre concernant les premiers instants. En particulier, la physique des particules nous montre que lorsqu'il y a création de particules à partir du rayonnement, des antiparticules sont toujours créées en nombre égal à celui des particules. Comment se fait-il alors qu'il y ait apparemment un excès de matière par rapport à l'antimatière dans l'Univers? (L'absence d'un fort rayonnement gamma nous permet de rejeter l'hypothèse que les galaxies proches soient faites d'antimatière.) Ce problème est certainement l'un des plus grands problèmes que la Cosmologie nous pose à l'heure actuelle. C'est le mérite de l'astrophysicien français R. Omnès d'avoir très soigneusement cherché à résoudre ce problème. Mais pour l'instant, on n'a pas encore de solution entièrement satisfaisante.

Commence alors la phase dite radiative, qui porte son nom parce que le rayonnement est toujours le principal constituant de l'Univers. Mais les protons, les neutrons, les électrons, qui constitueront la matière que nous connaissons, sont déjà formés. Lorsque la température atteint environ 3 milliards de degrés, c'est-à-dire après la 10^e seconde, des réactions nucléaires s'amorcent. Les calculs très élaborés qui ont été faits montrent que ces réactions durent jusque vers la 4^e minute. A ce moment, elles cessent car l'Univers n'est plus assez chaud, ni assez dense pour que la matière puisse encore entrer en réaction. Les calculs nous indiquent que durant ce bref laps de temps, ces réactions nucléaires sont parvenues à transformer environ 25 % de la matière en hélium (les 75 % restant étant de l'hydrogène). Il faut signaler ici que 25 % d'hélium correspond bien à la proportion observée dans les étoiles les plus vieilles de notre Galaxie. (Rappelons très brièvement que les autres éléments ont été synthétisés beaucoup plus tard par des réactions nucléaires qui se déroulent au sein des étoiles et en particulier lors des explosions de supernovae.) Il est donc très encourageant de trouver dans l'abondance de l'hélium une confirmation observationnelle des événements qui ont pu se passer au début de l'Univers.

Après ces premières minutes mouvementées, l'Univers connaît une longue période d'expansion et de refroidissement. On estime que c'est au bout d'environ 700 000 ans que sont apparues les premières condensations

qui allaient donner naissance aux objets précurseurs des galaxies qui aujourd’hui peuplent notre ciel. Ce n'est sans doute que beaucoup plus tard, après plusieurs milliards d'années, que des êtres vivants ont pu apparaître dans l'Univers. Il a en effet d'abord fallu que les éléments lourds que nous présumons être nécessaires à la vie (le carbone, en particulier) soient synthétisés dans les générations successives d'étoiles qui se sont déroulées au sein des galaxies. Ce n'est qu'une fois que ces éléments ont été disponibles dans le milieu cosmique, que des étoiles ont pu naître en ayant dans leur voisinage des planètes contenant les ingrédients nécessaires à l'amorce de la chimie biologique.

L'immense fresque que les astronomes commencent seulement à dessiner de l'histoire de l'Univers fait appel à toutes les parties de l'Astronomie. Il faut calibrer les distances des étoiles et galaxies, analyser photométriquement les âges et la composition chimique des étoiles, comprendre leur évolution. C'est un travail immense qui demandera encore beaucoup d'investissements et d'efforts, mais c'est là sans doute un des monuments que peut laisser la civilisation moderne si on lui en donne les moyens.

