

Les cosmologies de Lemaître et Friedman dans le contexte moderne

par Michaël HELLER

Chaire Georges Lemaître 1978

Séance inaugurale : 21 février 1978

Summary. — Great scientific revolutions are always carefully prepared by a logic of scientific discoveries, however, only extremely courageous minds are ready to make a decisive step. There were Alexander Alexandrovich Friedman and Georges Lemaître who have proved to be audacious enough to destroy the static picture of the Universe and to create the theory of cosmic expansion. Their works are compared, and a style of their investigations characterized. Post-Friedmanian and post-Lemaîtreian lines of research in modern cosmology are briefly outlined.

1. Introduction : Aventures des Idées

Toute idée révolutionnaire se standardise avec le temps. Les modèles cosmologiques de Friedman et Lemaître sont appelés de nos jours « univers standards », bien qu'à leur origine, dans la seconde décennie de notre siècle, ils constituèrent des idées vraiment révolutionnaires. Il est communément admis que la cosmologie moderne a atteint quatre très grandes conclusions [1] :

1. notre Univers est un système physique qui peut être exploré au moyen de méthodes physiques ordinaires (bien que souvent fortement adaptées) ;
2. la matière est — statistiquement — uniformément distribuée à travers l'Univers et en conséquence l'espace-temps de notre Univers est hautement symétrique ;

3. l'Univers est en expansion, toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres avec des vitesses de plus en plus grandes ;
4. dans l'histoire de notre Univers, il y a eu un état singulier, appelé singularité initiale, qui peut être considéré comme le début de son expansion globale.

La première conclusion est due à Einstein. Avant son travail de 1917 [2], il n'était ni évident, ni clair que l'Univers pouvait être traité d'une manière logique comme une totalité physique ; tous les essais d'extrapolation de la physique locale à l'échelle globale présentèrent des ambiguïtés et des paradoxes.

La seconde conclusion, brillamment prévue dans l'article d'Einstein comme une hypothèse de travail, est à l'heure actuelle fortement confirmée par les observations radioastronomiques et optiques. La radiation électromagnétique emplissant uniformément l'espace cosmique (formant ce que l'on appelle le champ de radiation de fond) et la distribution « aléatoirement uniforme » d'amas de galaxies [3] sont des évidences empiriques en faveur de la symétrie de notre Univers.

La seconde conclusion, combinée avec l'instrument mathématique de la Théorie de la Relativité Générale, mène directement aux modèles de Friedman-Lemaître. Si notre monde possède les symétries correspondant au champ de radiation de fond et à la distribution aléatoirement uniforme de matière, il doit être (presque) l'univers de Friedman-Lemaître.

La troisième conclusion constitue l'essence de la révolution de Friedman et Lemaître ; la quatrième peut être considérée comme une conséquence : si nous observons l'expansion cosmique dans la direction inverse du temps, nous voyons que toute matière s'effondre jusqu'à ce qu'elle atteigne l'état de volume zéro et de densité infinie qui est appelé la singularité initiale. Nous ne savons pas ce qui était « avant », nous ne savons également pas si le mot « avant » possède un sens dans de telles circonstances.

Quelques cosmologistes ont cru que la quatrième conclusion découlait de la seconde. Leur intuition travaillait ainsi : si nous continuons de contracter uniformément quelque objet hautement symétrique, par exemple une sphère, aussi loin que c'est possible, nous devons la comprimer en un seul point. L'affaiblissement des postulats de symétrie pourrait peut-être écarter la singularité initiale. Après les travaux de Hawking, Penrose et Geroch [4], il devint clair que les singularités sont très profondément enracinées dans la structure mathématique de la théorie contemporaine de la gravitation, sans égards pour les postulats

de symétrie, et elles ne peuvent être supprimées par des méthodes simples.

Les grandes révolutions scientifiques sont toujours soigneusement préparées par une suite logique de découvertes scientifiques, et seuls des esprits extrêmement courageux sont prêts d'accomplir un changement radical. Durant des siècles, l'Univers fut considéré comme une construction statique, une demeure stable pour les hommes. Même Einstein, dans son premier travail cosmologique [2], n'osa pas rejeter cette croyance, en dépit du fait que les équations elles-mêmes suggéraient qu'elle devait être abolie. Il préféra changer les équations plutôt que de détruire la stabilité du monde.

Ce furent Alexander Alexandrovich Friedman et l'Abbé Georges Lemaître qui firent preuve d'assez d'audace pour détruire nos imaginations conservatrices. La Terre fut mise en mouvement par Copernic, l'Univers par le professeur russe et le prêtre belge ! Si nous ne considérons pas la seconde révolution plus profonde et aux répercussions beaucoup plus importantes que la première, c'est parce que, de nos jours, nous sommes de plus en plus accoutumés aux différentes révolutions.

2. Friedman et Lemaître : Comparaison des Idées

Avant Friedman et Lemaître, deux modèles cosmologiques étaient connus : le modèle original d'Einstein contenant de la matière uniformément distribuée et le modèle de de Sitter ne contenant pas de matière ; les deux modèles étaient supposés être statiques, c'est-à-dire indépendants du temps, sans évolution. Ce fut Lemaître [5] qui, en introduisant des coordonnées adéquates, découvrit le caractère stationnaire (mais non statique !) de l'Univers de de Sitter. La stationnarité est un nouveau type d'évolution : un système est dit stationnaire s'il change en présentant toujours le même aspect global. L'univers de de Sitter évolue, mais étant vide, demeure toujours le même. Très tôt, l'histoire de la cosmologie relativiste abonda en paradoxes !

Deux travaux de Friedman [6, 7] précédèrent chronologiquement ceux de Lemaître. Les deux articles de Friedman, bien que publiés dans le journal allemand « Zeitschrift für Physik », demeurèrent très longtemps inconnus à la majorité du public scientifique d'Europe de l'ouest, et Lemaître non seulement redécouvrit quelques solutions de Friedman mais obtint aussi des résultats physiquement plus satisfaisants. Le professeur russe construisit différents univers, c'est-à-dire certains schémas mathématiques suivant lesquels l'Univers réel peut être cons-

truit, le prêtre belge connaissant déjà les mesures astronomiques des vitesses radiales des galaxies, visa la reconstruction de l'évolution de ce seul Univers où nous vivons.

Le premier travail de Friedman, intitulé « *Über die Krümmung des Raumes* » [6], apparut en 1922. L'auteur énumère soigneusement toutes les suppositions et déduit l'équation, appelée aujourd'hui l'équation de Friedman, gouvernant l'évolution de l'Univers. Il retient deux postulats d'Einstein : la constante cosmologique et une courbure positive de l'espace, il abandonne cependant la supposition d'Einstein suivant laquelle l'Univers doit être statique ; l'évolution est admise comme une possibilité purement mathématique, sans référence directe à la réalité physique. La raison réside dans le manque de données empiriques « permettant de donner des estimations et de répondre à la question de savoir quel espace-temps correspond à notre Univers » [6]. Le travail de Friedman est mathématiquement très élégant, il présente l'entière discussion à toutes les solutions possibles. Cette discussion fut répétée ensuite dans la fameuse monographie de Tolman [8] et souvent attribuée erronément à Robertson [9].

Dans le second article, intitulé « *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes* » [7], Friedman déduisit « l'équation d'évolution » (équation de Friedman) dans le cas d'une courbure spatiale négative et démontra l'existence de solutions non-stationnaires dans le cas d'une densité de matière positive, bien qu'il n'en donna pas leur discussion comme dans le premier article. La motivation de ce second travail était philosophique. Friedman désirait contribuer au vieux problème de savoir si l'Univers est spatialement fini ou infini. Il traita ce problème dans un style très moderne, montrant que la réponse dépend non seulement des équations du champ, mais aussi de la topologie de l'espace-temps. L'idée fut complètement développée, plusieurs années après, dans le très bel article de Ellis [10].

Il est assez curieux que Friedman n'ait pas considéré le cas d'une courbure spatiale nulle. Cette omission fut complétée dans la suite par Robertson [9].

L'article de base de Lemaître apparut en 1927 sous le titre significatif « *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* » [11]. Les travaux de Friedman n'étaient pas connus de Lemaître à ce moment-là. Le titre de l'article révèle le souci de l'auteur de lier la théorie et l'expérience, de reconstruire la structure de l'Univers réel.

Lemaître désirait trouver un modèle intermédiaire entre l'Univers statique d'Einstein contenant de la matière et le monde vide et en

expansion de de Sitter. Après le travail sur les nouvelles coordonnées pour l'Univers de de Sitter, il savait que le modèle cherché devait être non-stationnaire, « avec un rayon croissant ». Cette supposition mena Lemaître à l'équation de Friedman pour une courbure positive de l'espace. Désirant choisir quelque chose entre les modèles d'Einstein et de de Sitter, Lemaître ajusta les constantes d'intégration à leurs valeurs dans l'Univers statique d'Einstein et obtint une solution assez spéciale, connue par la suite sous le nom de modèle d'Eddington-Lemaître, qui décrit l'univers en expansion avec une densité non nulle de matière, et qui, lorsque le temps tend vers moins l'infini, approche asymptotiquement l'univers statique d'Einstein.

Lemaître était au courant de l'existence d'autres solutions quand il écrit que toutes celles-ci possèdent ce que nous appelons actuellement la singularité initiale quelque 10^9 ans dans le passé de notre époque et que cela semble être « une échelle de temps trop courte en comparaison de celle de l'évolution stellaire » [11]. Pour cette raison, Lemaître rejeta toutes les autres solutions et ne les considéra pas. L'équation de Friedman, dans l'article de Lemaître, incorpore un terme correspondant à la pression de matière, bien que, lorsque le modèle est comparé aux mesures astronomiques, Lemaître pose ce terme égal à zéro.

Ici nous touchons un point crucial : la tentative de Lemaître de lier les prédictions découlant de son modèle avec les observations astronomiques connues. Lemaître dérivait du modèle la formule de l'effet Doppler dans le spectre des galaxies et la compara avec les mesures de décalage vers le rouge. Il cite 43 mesures faites par Strömberg et 42 faites par Hubble (la fameuse loi de Hubble fut publiée deux ans après !). Lemaître conclut que le modèle en expansion proposé n'était pas en contradiction avec toutes les données empiriques disponibles.

Un pas décisif est accompli ! Notre Univers n'est désormais plus traité comme un édifice statique. Il change, s'étend, évolue.

Avec l'article de Lemaître une nouvelle ère commence en cosmologie. Dans l'année-zéro de cette ère, Friedman mourut (15 septembre 1925).

Dans l'article suivant de 1931 « The expanding Universe », Lemaître [12] se tourna vers le problème : pourquoi l'Univers en équilibre (dans l'état statique d'Einstein) commence à s'étendre ? Une étude préliminaire de W.H. McCrea et G.C. McVittie (citée par Lemaître) semblait faire ressortir que les formations de condensations causeraient une contraction et non une expansion. Lemaître argumente, cependant, que l'expansion de l'Univers est due à l'effet, relié très intimement à la formation de condensations, qu'il appelle la « stagna-

tion » de l'Univers. Par « stagnation », il signifie une diminution de l'échange d'énergie entre les parties éloignées de l'Univers : l'énergie cinétique libre peut être capturée par les condensations et demeurer dès lors liée à elles. L'idée est abandonnée dans la cosmologie moderne, quoique les outils mathématiques utilisés par Lemaître pour l'étudier sont très proches de ceux employés dans les études contemporaines de la formation de galaxie.

Les idées de Friedman et Lemaître se rencontrèrent dans l'article suivant de Lemaître (« L'Univers en expansion », 1933 [13]. C'est une sorte de synthèse contenant cependant de nombreux et très importants résultats. Le but de l'article est « d'étudier les solutions exactes des équations de la gravitation, fournissant des modèles simplifiés » [13]. Le plus important résultat de ce papier est peut-être une démonstration du fait que la singularité dans la solution de Schwarzschild est une singularité apparente qui peut être supprimée par une transformation vers de nouvelles coordonnées (appelées maintenant les coordonnées de Kruskal-Lemaître). Lemaître connaît déjà les travaux de Friedman. L'équation décrivant l'évolution de l'Univers est appelée par Lemaître « l'équation de Friedman ». Lemaître intègre cette équation (il considère seulement le cas d'une courbure spatiale positive) au moyen des fonctions elliptiques de Weierstrass, obtenant ses solutions explicites.

La dernière partie de l'article de Lemaître vaut la peine d'être mentionnée. Il considère les points-zéro du rayon de l'Univers (singularités cosmologiques). Comment pourrait-on supprimer ces points embarrassants du problème ? Ce travail ne peut se faire au moyen de la pression car la pression « renforce » la gravitation. Que dire des déviations de l'isotropie ? Lemaître étudie une métrique anisotrope simple, qui lui a été suggérée par Einstein, démontre que dans ce cas spécial l'anisotropie n'empêche pas l'apparition de singularité (« évouissement de l'espace », comme l'écrit de manière pittoresque Lemaître), et considérant alors une inégalité, qui est essentiellement la condition d'énergie des récents travaux portant sur le problème de la singularité [4], il suggère que la même conclusion restera valable dans le cas général. Lemaître a senti cela très tôt car déjà en 1931 (« L'expansion de l'espace » [14]) il adoptait pour décrire la réalité physique le modèle avec trois étapes de l'évolution (appelé maintenant le modèle de Lemaître), débutant par la singularité initiale ; la reconstruction des processus physiques survenant près de la singularité mérita le nom d'« Hypothèse de l'Atome Primitif ». Mais ceci est une autre histoire.

En 1929, la fameuse loi de Hubble fut publiée. La théorie de l'expansion de l'Univers est devenue une routine cosmologique.

TABLE

Alexander Amexandrovich Friedman (1888-1925) Leningrad	Georges Lemaître (1894-1966) Louvain
<i>Construction de différents mo- dèles mathématiques selon les- quels notre Univers peut s'être créé.</i>	<i>Tentatives de reconstruction de l'évolution de l'Univers réel.</i>
1922 : équation de Friedman et discus- sion de toutes ses solutions pos- sibles avec :	1925 : nouvelles coordonnées pour le modèle de de Sitter. Caractère non-statique mais stationnaire du modèle de de Sitter
$k = + 1$ $\Lambda \geq 0$ $p = 0$	1927 : équation de Friedman pour : $k = + 1$ $\Lambda \geq 0$ $p = 0$ et $p = \frac{\rho}{3}$
1924 : équation de Friedman pour :	Solution d'Eddington-Lemaître. Formule de l'effet Doppler. Comparaison avec les données d'observation.
$k = - 1$ $\Lambda \geq 0$ $p = 0$	1931 : « stagnation » de l'Univers. Modèle de Lemaître. Hypothèse de l'Atome Primitif.
considérations topologiques liées au problème de l'infinité spatiale.	1933 : Coordonnées de Kruskal-Lemaî- tre pour la solution de Schwarz- schild.
k = constante de la courbure spatiale	Formation des galaxies dans les modèles de Friedman.
Λ = constante cosmologique	Solutions explicites de l'équation de Friedman.
p = pression	Problème de la singularité dans des modèles anisotropes.
ρ = densité	

3. Evolution « Post-Friedmanienne » de la cosmologie

Il y a deux courants principaux de développement dans la cosmologie moderne. Le premier possède des visées plus mathématiques. Inspirés par la beauté théorique de la cosmologie, nous désirons créer autant de modèles de monde que possibles. Le second a des intentions plus physiques. Nous sommes réalistes, nous désirons rechercher cet unique Univers où nous vivons. C'est pourquoi, nous voulons rétrécir le plus possible la classe de tous les modèles théoriquement admissibles afin d'atteindre, si cela est possible, un seul « vrai » modèle. Bien sûr, ce « modèle réel » peut être seulement une approximation de la réalité ; nous aimerions construire d'autres modèles afin d'avoir des approximations de plus en plus proches, néanmoins, nous ne désirons pas sortir d'un « petit voisinage » du « modèle réel » original dans l'espace de tous les modèles de monde mathématiquement admissibles.

Parce que Friedman construit beaucoup de modèles théoriques en ne considérant pas le problème de leur adéquation au monde réel, nous appellerons cette première tendance la ligne « post-Friedmanienne » de l'évolution de la cosmologie. Lemaître, au contraire, eut pour but la découverte de la structure de l'Univers réel ; c'est pourquoi nous appellerons cette seconde tendance la ligne « post-Lemaîtreienne » de l'évolution de la cosmologie.

Nous pouvons imaginer tous les modèles relativistes du monde comme les points d'un énorme espace qui peut être appelé l'Univers des univers. Cet espace peut être strictement défini comme un espace de toutes les données initiales (données de Cauchy) menant à des modèles cosmologiques différents. La tâche principale du courant post-Friedmanien en cosmologie est d'explorer l'Univers des univers. Nous pouvons le faire soit en analysant ses points isolés, c'est-à-dire en construisant et en recherchant différents modèles cosmologiques individuels, ou en étudiant ses propriétés globales, par exemple, en définissant une topologie convenable sur la suite de tous les univers possibles et alors, utilisant cette topologie, apprendre les relations mutuelles entre les modèles et leurs propriétés. Les deux voies de recherches sont en cours à l'heure actuelle.

Les modèles d'univers recherchés par Friedman et Lemaître (modèles Friedman-Lemaître, modèles F-L) sont très spéciaux ; ils sont hautement symétriques et en conséquence très simples. La symétrie de ces modèles consiste dans le fait que chacun d'eux peut être décomposé de manière unique suivant le temps universel cosmique et des espaces momentanés qui sont homogènes et isotropes. C'est un fait merveilleux que la réalité physique se conforme à cette simplicité ! Notre Univers,

considéré dans son entièreté, est spatialement homogène et isotrope. Les observations astronomiques et radioastronomiques le démontrent assez clairement. En conséquence, les modèles F-L peuvent être considérés comme une bonne « approximation-zéro » de la réalité. Evidemment, à une échelle plus petite, notre Univers n'est ni isotrope, ni homogène, la matière n'est pas distribuée à travers l'espace comme une poussière uniforme ou un fluide mais elle forme différentes structures comme les étoiles, galaxies, groupes et amas de galaxies, etc...

Soient $M_0, M_1, M_2, \dots$ une série de modèles de monde représentant respectivement la zéro, première, seconde, ... approximations de la réalité. A la lumière de ce qui a été dit plus haut, M_0 est le modèle de monde homogène et isotrope F-L, M_1 est un modèle avec de petites déviations de l'isotropie et/ou de l'homogénéité, les modèles $M_2, M_3, \dots$ etc, sont de plus en plus anisotropes et inhomogènes. Cependant, l'ordre de cette série n'est pas quelconque si nous effectuons la moyenne du modèle M_i , nous devons obtenir le modèle M_{i-1} ; nous appellerons ce processus : friedmanisation et le processus inverse : defriedmanisation.

Notre Univers est décrit « maintenant » par un certain modèle F-L, mais près de la singularité initiale ou dans un futur lointain, il peut correspondre à un certain modèle anisotrope et/ou inhomogène. En fait, à l'intérieur de l'Univers des univers, il y a beaucoup de modèles qui, lorsque le temps passe, deviennent de plus en plus, ou de moins en moins, isotropes et homogènes. Nous appellerons de tels processus respectivement l'isotropisation (anisotropisation) et l'homogénéisation (l'inhomogénéisation). Notons que la friedmanisation et l'isotropisation (homogénéisation) sont des processus entièrement différents.

Le sous-espace de tous les modèles de monde spatialement homogènes dans l'Univers est bien connu de nos jours. A l'extérieur de ce sous-espace, s'étalent de vastes domaines extrêmement compliqués de solutions inhomogènes. Nous pouvons affirmer que le monde civilisé ne s'étend pas très loin au-delà de la frontière de la région homogène dans l'Univers des univers. C'est pourquoi, pour le moment restons à l'intérieur de ce domaine sûr.

La région homogène (c'est-à-dire l'espace de toutes les solutions spatialement homogènes) est bien connue et bien classifiée. La classification moderne [15, 16] est basée sur le travail original de Bianchi [17] qui classa les espaces homogènes en neuf types. Les modèles F-L présentant une courbure spatiale nulle sont situés dans les types I et VII₀ de Bianchi (les indices réfèrent à la classification améliorée de Bianchi); les modèles F-L avec une courbure spatiale négative sont situés dans les types V et VII_h de Bianchi et les modèles F-L avec une courbure spatiale positive dans le type IX de Bianchi.

La suite de tous les modèles F-L (qui sont homogènes et isotropes) est très « petite » dans la région homogène, ou, en langage mathématique, est de mesure-zéro. De plus, la suite de tous les modèles cosmologiques homogènes, dans lesquels le processus d'isotropisation peut prendre place, est également de mesure-zéro à l'intérieur de la région homogène de l'Univers des univers [18]. Nous pouvons voir, dès lors, que tous les modèles qui peuvent décrire dans l'approximation-zéro l'Univers réel sont très exceptionnels. Nous occupons une position privilégiée dans l'Univers des univers (au moins si nous considérons le problème de l'approximation-zéro). Le Principe de Copernic n'y est pas valable.

Nous pouvons poser d'autres questions : quelle « grandeur » possède la suite de tous les modèles de monde sur lesquels le processus de friedmanisation peut s'accomplir ? (c'est-à-dire qui peuvent être convenablement approximés par un des modèles F-L). Quelle « grandeur » possède la suite de tous ces modèles inhomogènes, qui, lorsque le temps passe, se changent en modèles susceptibles d'être friedmanisés ? Les réponses à ces questions sont inconnues ; nous ne savons même pas si la seconde question est posée correctement : dans les modèles d'Univers inhomogènes, le temps cosmique universel n'existe pas en principe et la phrase « lorsque le temps passe » peut être sans signification.

Indépendamment des réponses aux deux dernières questions, le problème intéressant reste celui-ci : pourquoi notre Univers est-il entièrement bien décrit par un des modèles F-L ? Pourquoi occupons-nous une position privilégiée dans l'Univers des univers ? La réponse quelque fois suggérée est que la vie organique ne pourrait seulement évoluer que dans l'Univers F-L. « Le fait que nous ayons observé l'univers comme étant isotrope (et homogène) est donc seulement une conséquence de notre propre existence » [18].

4. Evolution « Post-Lemaître » de la Cosmologie

Alors que les cosmologistes s'alignant sur les idées de Friedman élargissent sans cesse les horizons de recherche dans l'Univers des univers, en construisant de nouveaux mondes, et que au contraire les cosmologistes-observateurs tentent de rétrécir la suite des modèles prétendant correspondre à l'Univers réel, les cosmologistes-continuateurs de la ligne de recherche de Lemaître contribuent à comprendre la physique de ces modèles qui sont « sélectionnés » par des tests d'observation.

Lemaître fut le premier à proposer la reconstruction des processus physiques qui, selon lui, sont survenus dans l'histoire de l'Univers,

débutant à partir de l'Atome Primitif, sa fragmentation, l'origine des galaxies et de leurs amas, jusqu'à l'aspect actuellement observé de notre monde.

Le nom « Atome Primitif » s'est révélé trompeur, les gens prennent le mot « atome » dans son sens contemporain, et dans ce cas l'hypothèse devient insoutenablement naïve. Lemaître lui-même explique :

« Ici le mot « Atome » doit être compris dans le sens primitif grec du mot ... L'Atome est si simple que rien ne peut être dit à son propos et aucune question soulevée ... C'est seulement lorsqu'il a éclaté en un très grand nombre de fragments en remplissant entièrement un espace de petit (mais non strictement nul) rayon que les notions physiques commencent à acquérir quelque sens ». [19]

Le problème de Lemaître de la fragmentation de l'Atome Primitif a créé une des plus importantes questions de la Cosmologie moderne, la question de la nucléosynthèse cosmique. Le problème fut élaboré de novo dans l'article classique de Alpher, Bethe et Gamow [20] (habituellement on adopte l'abréviation : hypothèse α - β - γ) ; suivant ces auteurs, les éléments chimiques ont été synthétisés dans le plasma très chaud en densités extrêmes près de la singularité initiale. Une autre solution fut choisie par E. Burbidge, G. Burbidge, Fowler et Hoyle (abréviation : B²FH [21]), suivant eux, les intérieurs d'étoiles massives sont des creusets dans lesquels prend place la synthèse des éléments. Actuellement, nous savons que, en un certain sens, les deux hypothèses sont vraies. A la lumière des investigations modernes, il est de plus en plus clair que l'hydrogène, de grandes quantités d'hélium et une très petite quantité d'éléments plus lourds furent créés lors du Big Bang (terme moderne pour remplacer l'Atome Primitif de Lemaître) suivant le mécanisme amélioré α - β - γ et tous les autres éléments chimiques sont synthétisés dans les intérieurs d'étoiles massives en accord avec l'hypothèse améliorée B²FH. La vitesse de production de l'hélium primitif dépend du degré d'anisotropie de l'Univers près de la singularité initiale. L'anisotropie raccourcit la période de temps d'apparition des réactions nucléaires responsables de la production d'hélium [22, 23].

Sur la base de son hypothèse, Gamow prédit l'existence du champ de radiation de fond du corps noir dans l'Univers [24]. La découverte de ce champ a fourni non seulement le meilleur test du caractère Friedman-Lemaître de l'Univers (homogénéité et isotropie de la distribution de matière), mais aussi a apporté une connaissance poussée des conditions physiques à l'époque de la dernière interaction de la radiation de fond avec la matière ordinaire. Cependant, il est important de mentionner que l'existence du champ de radiation primitif

découle, au moins qualitativement, de l'hypothèse de l'Atome Primitif de Lemaître. Selon lui, la première question physique qui peut être posée au sujet du processus de fragmentation de l'Atome Primitif est : « l'ensemble des particules en résultant peut-il être décrit comme un gaz ? Et il répond :

« Ce n'est pas assez d'avoir un ensemble formé d'un grand nombre de particules. Pour être appelé un gaz, un tel ensemble doit posséder une distribution de vitesses fortement concentrées autour d'une vitesse moyenne, la vitesse du gaz, et distribuées autour de cette vitesse suivant une loi proche de la distribution de Maxwell qui est réalisée dans les gaz ordinaires. D'autre part, un pur ensemble de particules avec des vitesses du même ordre de grandeur réparties dans toutes les directions ne peut pas être considéré comme un gaz. Il devrait être décrit comme un ensemble de rayons corpusculaires, comme de la radiation corpusculaire. Il est vrai que, par collisions, une telle radiation atteindra finalement un état d'équilibre statistique et deviendra un gaz. Mais dans la condition extrême d'expansion débutant (théoriquement) avec une vitesse infinie, il n'est pas probable qu'un tel équilibre statistique ait eu le temps de s'établir ».

De ce point de vue, le problème devant lequel la cosmologie doit faire face est de comprendre comment un gaz surgira finalement de la radiation primitive et ensuite s'organisera en nébuleuses et deuxièmement de comprendre que surgira de la partie de cette radiation primitive qui aura échappé à la condensation en gaz. » [19]

Lemaître identifia erronément « cette partie de la radiation primitive qui a échappé à la condensation en gaz » avec les rayons cosmiques. Nous pouvons lui pardonner cette erreur si nous nous rappelons que l'hypothèse de l'Atome Primitif vit le jour avant la découverte du neutron !

La seconde question de Lemaître, comment le gaz résultant de la radiation primordiale peut « s'organiser en nébuleuses » a montré une très grande difficulté. Les mécanismes élaborés par Lemaître sont en connexion avec le modèle cosmologique ayant dans son histoire une période quasi-statique qui n'est généralement pas acceptée de nos jours. Afin de résoudre ce problème, des méthodes mathématiques de perturbations linéaires et non-linéaires dans le champ gravitationnel sont développées. Deux théories compétitives sont couramment en progrès :

1. des perturbations adiabatiques de densité du plasma primordial (et en connexion avec elles des perturbations de la métrique et des mouvements purement potentiels) donnèrent des structures ayant

des masses correspondant à la masse de l'amas « ordinaire » de galaxies ($\simeq 10^{13}$ masses solaires) ;

2. dans le plasma primordial, il y eut des turbulences de caractère également primordial qui, lorsqu'elles se combinèrent avec l'expansion globale, devinrent des galaxies.

Les deux possibilités sont étudiées par les cosmologistes contemporains et un important travail a déjà été effectué afin de résoudre cet important puzzle. Il vaut la peine de mentionner ici le grand progrès effectué en ce domaine par les cosmologistes russes [25].

5. En sorte de conclusion

Grâce à la longue ligne « post-Lemaître » de l'évolution de la cosmologie, nous avons aujourd'hui une vue d'ensemble de l'histoire cosmique que nous appelons le « modèle standard de l'Univers ». Il est magnifiquement résumé (et développé) dans le livre de Zel'dovich et Novikov [26] ; les points faibles et les lacunes existant encore dans l'aspect « standard » sont remplis par les auteurs avec d'habiles hypothèses et de très chaudes polémiques entre défenseurs de concepts rivaux. Selon mon opinion, le livre de Zel'dovich et Novikov est le premier, après les travaux de Lemaître, qui présente une description aussi détaillée et complète de l'Univers et son histoire. Dans l'introduction de leur livre, Zel'dovich et Novikov rendent hommage à Friedman, leur prédécesseur. Et justement. Mais, lorsqu'ils mentionnent l'hypothèse de l'Atome Primitif comme une « formulation frappante mais trompeuse » (p. 146), ils doivent se rappeler que leur livre est une continuation linéaire des idées de Lemaître. Zel'dovich et Novikov ont sans aucun doute fait un important pas dans le développement de la cosmologie moderne. Cependant, même les plus grands pas deviennent seulement significatifs s'ils sont des chaînons dans une chaîne de progrès.

Remerciements

Je remercie très vivement l'Université Catholique de Louvain pour l'invitation qui m'a été faite de tenir la Chaire Georges Lemaître. Je suis particulièrement reconnaissant au Professeur Odon GODART qui a été l'initiateur de cette invitation. Monsieur Claude DEVIS a assuré la traduction de ce texte de l'anglais, qu'il en soit remercié.

REFERENCES

- [1] D.W. SCIAMA, *The Physicist's Conception of Nature*, ed. by J. Mehra, Reidel Publ. Comp., 1973.
- [2] A. EINSTEIN, *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss.* 1, 1917, 142.
- [2] Comme information E.J. GROTH, P.J.E. PEEBLES, M. SEELDNER, R.M. SO-NEIRA, *Scientific American*, 237, 1977, 76.
- [4] Voir S.W. HAWKING, G.F.R. ELLIS, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge, At the University Press, 1973.
- [5] G. LEMAITRE, *Journal of Mathematics and Physics*, 4, 1925, 37.
- [6] A. FRIEDMAN, *Zeitschr. für Phys.* 10, 1922, 377.
- [7] A. FRIEDMAN, *Zeitschr. für Phys.* 21, 1924, 326.
- [8] R.C. TOLMAN, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Oxford, At the Clarendon Press, 1934.
- [9] H.P. ROBERTSON, *Rev. Mod. Phys.* 5, 1933, 62.
- [10] G.F.R. ELLIS, *General Relativity and Gravitation*, 2, 1971, 7.
- [11] G. LEMAITRE, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*, 47 A, 1927, 49.
- [12] G. LEMAITRE, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* 91, 1931, 490.
- [13] G. LEMAITRE, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*, 53 A, 1933, 51.
- [14] G. LEMAITRE, *Revue des Questions Scientifiques*, 1931, 391.
- [15] F.B. ESTABROOK, H.D. WAHLQUIST, C.G. BEHR, *J. Math. Phys.* 9, 1968, 497.
- [16] G.F.R. ELLIS, M.A.H. MacCALLUM, *Commun. math. Phys.* 12, 1969, 108.
- [17] L. BIANCHI, *Mem. Soc. It. della Sci./Dei* 40/ 3/ 11, 1897, 267.
- [18] G.B. COLLINS, S.W. HAWKING, *Astron. J.* 180, 1973, 317.
- [19] G. LEMAITRE, *Pont. Acad. Scient.* 12, 1948, 475.
- [20] R.A. ALPHER, H. BETHE, G. GAMOW, *Phys. Rev.* 73, 1948, 803.
- [21] E.M. BURBIDGE, G.R. BURBIDGE, A. FOWLER, F. HOYLE, *Rev. Mod. Phys.* 29, 1957, 547.
- [22] P.J.E. PEEBLES, *Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1971.
- [23] D.W. SCIAMA, *Modern Cosmology*, Cambridge University Press, 1971.
- [24] G. GAMOW, *Vistas in Astronomy*, London 1959.
- [25] *Origine et évolution des galaxies et étoiles*, éd. par. S.B. Pikelner, Ed. « Nauka », Moscow 1976 [en Russe].
- [26] Ya.B. ZELDOVICH, I.D. NOVIKOV, *La structure et évolution de l'Univers*. E. « Nauka », Moscow 1975 [en Russe].