

L'Univers de Georges Lemaître

DOMINIQUE LAMBERT

Prêtre et physicien, Georges Lemaître fut l'un des fondateurs de la théorie du Big Bang. Nombre de ses intuitions, qu'ils défendit parfois contre Einstein lui-même, se sont révélées, près de 50 ans plus tard, d'une portée fondamentale.

En 1933, Albert Einstein donna une série de cours à la Fondation universitaire de Bruxelles. Lorsqu'un collègue lui demanda si tous les auditeurs l'avaient bien compris, il répondit : «Le professeur De Donder peut-être, le chanoine Lemaître sûrement, les autres je ne crois pas.»

Georges Lemaître est considéré comme l'un des fondateurs de la théorie du Big Bang sur laquelle repose la cosmologie moderne. Parce qu'il fut aussi un homme de foi, certains ont prétendu que l'hypothèse d'un cataclysme créant l'Univers à une date déterminée dans le passé constituait de sa part une justification scientifique de la «création» du monde selon les chrétiens.

Ainsi, l'astronome britannique Fred Hoyle, partisan, pour des raisons philosophiques, d'un modèle d'Univers éternel, forgea-t-il le terme péjoratif de Big Bang («gros boum» en anglais) pour ridiculiser les idées développées et popularisées par Lemaître. Ironie du sort, ce bon mot est aujourd'hui utilisé sans connotation négative pour désigner une théorie que de nombreux faits expérimentaux ont, depuis lors, étayée. Quant aux convictions scientifiques de Lemaître, elles se fondaient non pas sur sa foi (il sut toujours éviter toute confusion entre sciences et religion), mais sur des arguments mathématiques et physiques de grande valeur. Quelques moments marquants de sa carrière éclairent la portée scientifique de certaines de ses intuitions.

Un prêtre à Cambridge

Georges Lemaître naît le 17 juillet 1894 à Charleroi, en Belgique. En 1911, il commence des études d'ingénieur des mines pour lesquelles il montre peu d'enthousiasme et, à son retour de la Première Guerre mondiale, il change d'orientation pour suivre un enseignement de mathématiques et de physique qu'il termine en 1920. La même année, il entre au séminaire de Malines où, tout en se préparant à devenir prêtre, il continue à étudier les ouvrages traitant de relativité restreinte et générale. Il rédige un mémoire intitulé *La physique d'Einstein* qui lui vaut de gagner un concours de bourse d'études et lui permet, après son ordination le 22 septembre 1923, de partir étudier une année à Cambridge, en Grande-Bretagne. Là, Lemaître travaille sous la direction d'Arthur Eddington, l'astronome qui, cinq ans auparavant, a confirmé ce qu'Einstein avait prévu : des rayons lumineux passant au voisinage du Soleil sont déviés par la force de gravitation.

En 1924-1925, il parachève ses études à l'Institut de technologie du Massachusetts et visite certains des hauts lieux de l'astronomie mondiale, notamment l'Observatoire du mont Palomar, où se trouve alors le plus grand télescope jamais construit. Ainsi, le jeune expert des nouvelles théories de l'espace-temps entre en contact avec l'astronomie au moment même où la cosmologie scientifique va naître.

Dans quel «contexte cosmologique» Lemaître se trouve-t-il? Au milieu des années 1920, les astronomes attribuent à l'Univers observé une taille de quelques dizaines de milliers d'années-lumière, c'est-à-dire six ordres de grandeur inférieure à celle qu'on lui reconnaît aujourd'hui (de l'ordre de dix milliards d'années-lumière). Par ailleurs, en vertu d'un préjugé hérité du XIX^e siècle, on n'envisage pas que cet Univers évolue, encore moins qu'il ait un âge fini.

Quant à son contenu, depuis le XVIII^e siècle, les astronomes pensent que les étoiles visibles dans le ciel se rassemblent en un vaste disque plat, la Voie lactée, au sein duquel se trouve aussi le Soleil. Dès 1785, le philosophe allemand Emmanuel Kant avait postulé que les nébuleuses spirales découvertes par les astronomes à l'aide de leurs premiers télescopes étaient de gigantesques regroupements d'étoiles semblables à la Voie lactée. Aujourd'hui, nous nommons galaxies ces «univers-îles» imaginés par le philosophe. Toutefois, jusqu'au milieu des années 1920, cette hypothèse est considérée comme douteuse ; en effet, elle suppose que ces nébuleuses doivent se trouver à des millions d'années-lumière. Or, les astronomes y observent régulièrement des explosions lumineuses qui, si elles étaient situées à de telles distances, devraient dégager en très peu de temps des quantités d'énergie qu'aucun des mécanismes physiques connus à l'époque n'est capable de produire.

Aujourd'hui, on sait qu'il s'agit de supernovae, des explosions d'étoiles géantes au cours desquelles des réactions thermonucléaires fournissent en quelques heures plus de lumière que des milliards d'étoiles.

Un Univers éternel

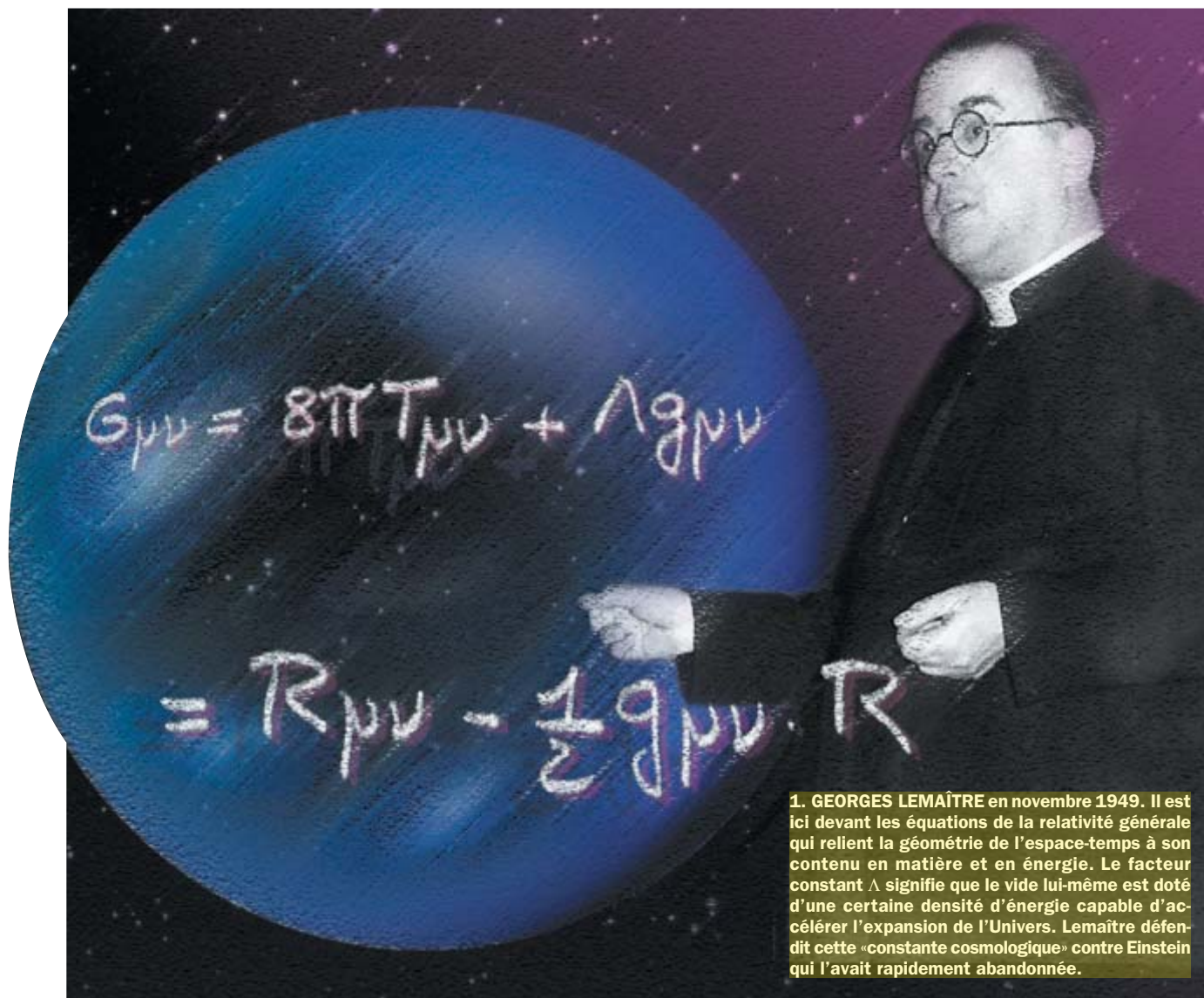
L'Univers des astronomes de l'époque, aussi loin qu'ils l'observent, ne contient qu'une seule galaxie, la nôtre. Est-il clos et de dimension finie, ou bien infini et, par conséquent, presque vide? À partir de 1916, cette question prend tout son sens avec la publication par Albert Einstein de sa théorie de la relativité générale, qui permet aux astronomes de construire différents modèles cosmologiques selon les hypothèses choisies. Einstein a montré que la force de gravitation peut être considérée comme une manifes-

tation de la courbure de l'espace-temps. Ses équations permettent de calculer cette courbure en chaque point de l'Univers, connaissant la quantité de matière (ou d'énergie) qui s'y trouve. Quant à la géométrie globale de l'Univers, il est possible, moyennant quelques hypothèses sur la répartition de la matière et de l'énergie en son sein, d'en donner une description rigoureuse.

Le premier modèle d'Univers proposé par Einstein est une solution de ses équations où le cosmos est clos et statique (*voir la figure 3*). Dans ce modèle, l'espace est une «hypersphère» de rayon constant (*voir la figure 2*). De même qu'une créature plate vivant «dans» la surface (à deux dimensions) d'une sphère verrait son Univers comme un espace courbe, fini mais sans frontières, nous vivrions dans un espace à trois dimensions qui serait la

«surface» d'une hypersphère (une sphère dans un espace à quatre dimensions). Pour que le rayon de cet Univers reste constant (c'est-à-dire pour empêcher que le poids de la matière ne provoque son effondrement), Einstein a postulé l'existence d'une «force répulsive» capable de contrecarrer les effets de la gravitation et de maintenir l'Univers en équilibre. Cette force intervient dans les équations de la relativité générale sous la forme d'une constante, connue sous le nom de «constante cosmologique».

Peu de temps après, l'astronome hollandais Willem De Sitter, trouve un autre modèle d'Univers, également solution des équations d'Einstein, où l'espace est infini et la densité de matière nulle. Lorsque Lemaître commence à travailler sur les problèmes cosmologiques, la communauté des astronomes ne se réfère qu'à ces deux modèles.



1. GEORGES LEMAÎTRE en novembre 1949. Il est ici devant les équations de la relativité générale qui relient la géométrie de l'espace-temps à son contenu en matière et en énergie. Le facteur constant Λ signifie que le vide lui-même est doté d'une certaine densité d'énergie capable d'accélérer l'expansion de l'Univers. Lemaître défendit cette «constante cosmologique» contre Einstein qui l'avait rapidement abandonnée.

Un Univers en expansion

Cependant, en 1925, à l'Observatoire du mont Palomar, l'astronome américain Edwin Hubble montre que la «nébuleuse» d'Andromède se situe, en fait, à plusieurs millions d'années-lumière de nous ; la polémique sur la nature des «nébuleuses» est réouverte. Georges Lemaître prend donc contact avec la cosmologie au moment même où ressuscite l'idée d'un Univers immense et parsemé de galaxies. En outre, les astronomes sont en train d'établir que la lumière que nous recevons de la plupart de ces galaxies est décalée vers les grandes longueurs d'ondes (vers le rouge), ce qui semble indiquer qu'elles s'éloignent de nous rapidement.

Ainsi, Lemaître est naturellement conduit à chercher une explication à cette «récession» des galaxies (indépendamment du russe Alexander Friedman). En 1927, il propose une troisième solution des équations d'Einstein : la taille de l'Univers croîtrait de façon exponentielle et se raccorderait, aux deux grands modèles de l'époque, dans un passé et dans un futur infiniment éloignés (voir la figure 4). Aux temps très reculés, cet Univers se comporterait comme l'Uni-

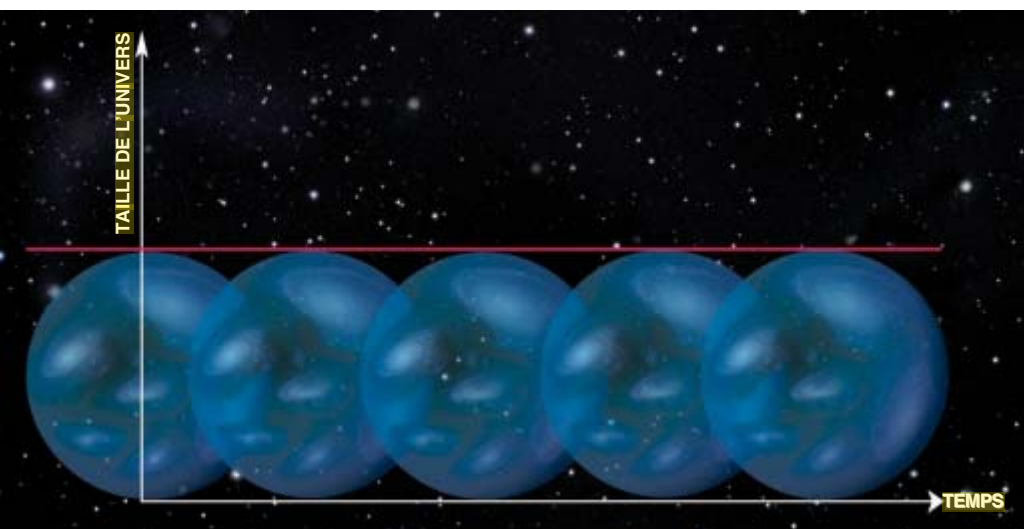
vers statique d'Einstein. Vers le futur, l'Univers de Lemaître, dont la masse est constante et dont la taille grandit indéfiniment, tendrait vers le modèle de De Sitter, totalement vide. Entre ces deux extrêmes, l'expansion de l'Univers expliquerait que les galaxies se fuient les unes les autres.

Au moyen de cette solution, dès 1927, Lemaître établit la loi qui gouverne la récession des galaxies ; elle stipule que deux galaxies se fuient à une vitesse proportionnelle à la distance qui

2. UNE CRÉATURE À DEUX DIMENSIONS, vivant dans la surface de cette sphère, constate que son univers est fini (elle peut en faire le tour), mais sans frontières. La géométrie n'y est pas euclidienne : la somme des angles d'un triangle (en bleu) est supérieure à 180 degrés, et l'on y trouve des «droites» (le plus court chemin entre deux points) qui sont parallèles mais se rejoignent à une distance finie (par exemple deux perpendiculaires à l'équateur de la sphère se croisent au pôle). Toutefois, à petite échelle, la géométrie est très proche de la géométrie euclidienne. Beaucoup de modèles d'Univers stipulent que l'espace, euclidien à notre échelle, est la surface d'une hypersphère, un analogue à trois dimensions du monde de la créature plate.

les sépare. À partir d'un catalogue de 42 galaxies dont on connaît un ordre de grandeur des distances ainsi que les vitesses de fuite, il estime la constante de proportionnalité à 625 kilomètres par seconde et par mégaparsec (c'est-à-dire que deux galaxies distantes de un mégaparsec, soit un peu plus de trois millions d'années-lumière, se fuient à 625 kilomètres par seconde). Ainsi, Lemaître est le premier à établir théoriquement la loi... de Hubble, même si la valeur qu'il donne à la constante, dite elle aussi «de Hubble», est surévaluée. L'astronome américain eut les honneurs de la postérité, car il fut le premier, deux ans plus tard, à publier une compilation détaillée d'observations montrant cette loi.

Avec le modèle de 1927, Lemaître est l'un des tous premiers cosmologistes à envisager que l'Univers évolue. Toutefois, l'Univers n'y a pas encore de commencement. Pourquoi Lemaître privilégie-t-il – momentanément – l'idée d'un Univers au passé infini ? Il semble que ce choix découle de sa surestimation de la valeur de la constante de Hubble. En effet, si l'Univers est aujourd'hui en expansion très rapide, sa taille, dans un passé relativement récent, devait être beaucoup plus petite. En fait, l'inverse de la constante de Hubble donne un ordre de grandeur de la période récente d'expansion. Avec une valeur de l'ordre de 625 kilomètres par seconde et par mégaparsec, Lemaître trouve que l'Univers a moins d'un milliard d'années, ce qui est inférieur aux deux milliards d'années que l'on attribue à la Terre à son époque. Cette évaluation



3. UN MODÈLE D'UNIVERS ÉTERNEL avait la préférence d'Einstein. Dans ce cadre, la taille – finie – de l'Univers est constante. Comme cet Univers a tendance à s'effondrer sur lui-même parce que les masses s'attirent sous l'effet de la gravitation, Einstein postula l'existence d'une seconde force, répulsive, qu'il introduit dans ses équations sous la forme d'une «constante cosmologique». Toutefois, au début des années 1930, Lemaître montra que l'équilibre ainsi obtenu est instable.

repose sur l'étude des concentrations en uranium et en plomb dans ses roches les plus anciennes ; la valeur admise aujourd'hui est d'environ 4,5 milliards d'années.

Le modèle d'un Univers dont le rayon croît de façon exponentielle lève la difficulté en donnant à l'Univers un passé infini durant lequel sa taille est quasi constante, tout en admettant une période d'expansion récente en accord avec l'observation de la fuite des galaxies. Aujourd'hui on attribue à la constante de Hubble une valeur de l'ordre de 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec (les estimations des distances des galaxies ont été considérablement améliorées). On en déduit que l'Univers est âgé de quelque 14 milliards d'années, ce qui est compatible avec les données géologiques.

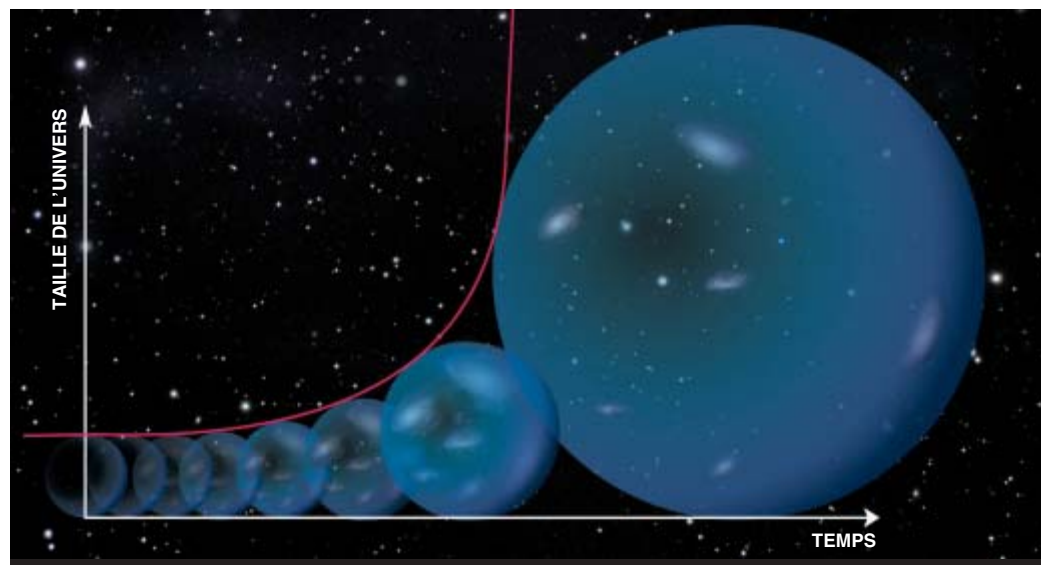
La formation des galaxies

Dans le cadre de ses modèles d'Univers en expansion, Lemaître s'attache alors à décrire un premier scénario de formation des galaxies. Il exploite pour cela les méthodes qu'il a développées, durant l'année 1924-1925, lorsqu'il travaillait à l'Institut de technologie du Massachusetts. Cette année-là, Eddington a attiré son attention sur une question soulevée par les travaux de l'astronome allemand Karl Schwarzschild. Ce dernier avait trouvé une solution aux équations d'Einstein décrivant le champ de gravitation à l'intérieur et à l'extérieur d'une boule de matière, en supposant que la densité y est homogène (ces hypothèses constituaient un modèle très simplifié d'étoile). La solution obtenue pour l'intérieur de la sphère fait apparaître un paradoxe. En ajoutant de la matière à cette sphère homogène, on fait croître son rayon en même temps que sa masse. Cependant, les calculs montrent qu'au-delà d'une taille (et donc d'une masse) limite, la pression au centre de l'étoile devient infinie. Il semble donc qu'aucun astre ne puisse exister au-delà de cette limite. Toutefois, comme le fit remarquer Eddington, l'hypothèse d'une densité uniforme de matière est peu conforme à l'esprit de la relativité, car, dans cette théorie, la densité de matière n'est pas une grandeur invariante (la masse peut se transformer en énergie et des observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres ne constatent pas, pour les mêmes objets, des énergies identiques).

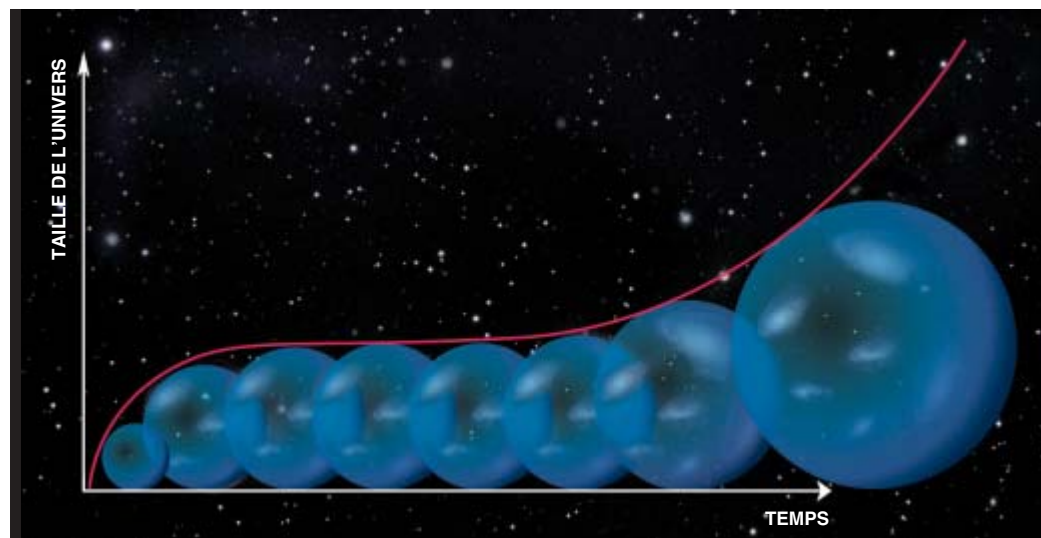
Lemaître refait les calculs de Schwarzschild en abandonnant l'idée d'une densité constante (il ne considère comme constante qu'une grandeur invariante propre à la relativité, la «trace du tenseur énergie-impulsion» qui combine la densité d'énergie et la pression de la matière). Il montre alors, contre l'attente d'Eddington, que le paradoxe découvert par Schwarzschild subsiste : il existe bien un rayon limite

au-delà duquel aucun astre ne peut plus être en équilibre.

L'aspect le plus important de ce travail est qu'il permet à Lemaître d'étudier des espaces à symétrie sphérique remplis d'un fluide dont la densité n'est pas nécessairement homogène. Dans les années 1930, il en tire profit pour proposer un modèle de formation des galaxies à partir de fluctuations locales de la densité de matière dans



4. UN UNIVERS EN ÉVOLUTION, MAIS ÉTERNEL, est proposé par Lemaître en 1927. L'expansion de l'espace explique le fait que les galaxies se fuient les unes les autres à une vitesse proportionnelle à la distance qui les sépare. Dans ce modèle, la constante cosmologique n'est pas nulle et la force répulsive qu'elle engendre accélère l'expansion de façon exponentielle. Le commencement de l'Univers est repoussé à l'infini vers le passé où il finit par se «raccorder» au modèle statique d'Einstein. La démonstration qu'un Univers statique est instable conduira Lemaître à abandonner ce dernier modèle.



5. DEUX FORCES ANTAGONISTES se disputent le contrôle de l'Univers dans le modèle que Lemaître défendra jusqu'à la fin de sa vie. Le monde commence par une singularité initiale, à une date finie dans le passé, puis son expansion est ralentie par la gravitation. Initialement très faible, la force répulsive engendrée par la constante cosmologique rattrape la gravitation, et l'Univers connaît une phase de quasi-équilibre qui dure plus ou moins longtemps suivant la valeur de ladite constante. Par la suite, la formation des amas de galaxies rompt l'équilibre et l'expansion reprend, de façon accélérée cette fois. Cette troisième phase correspond à l'époque actuelle.