

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.

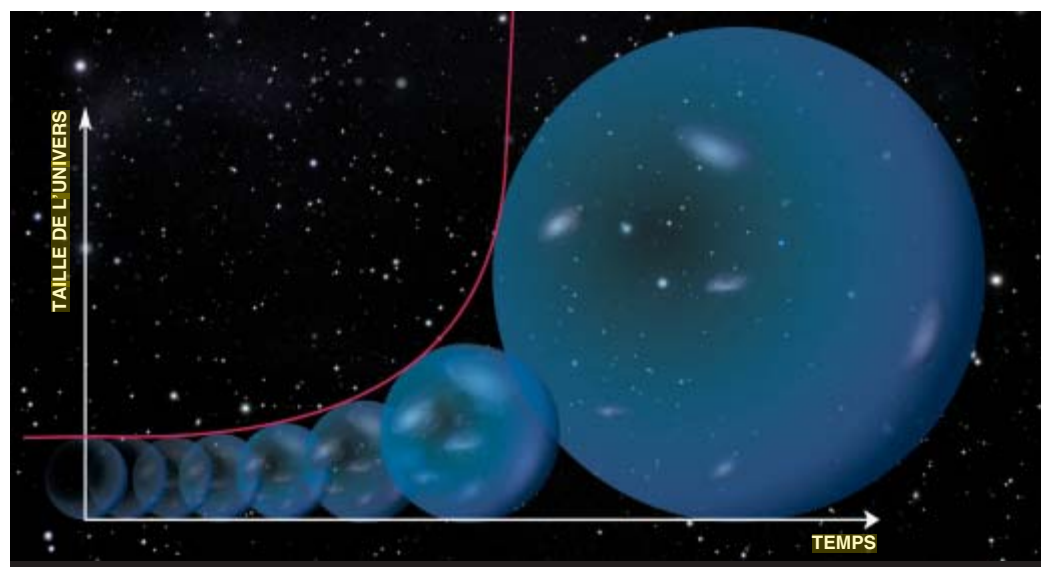
La formation des galaxies

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).

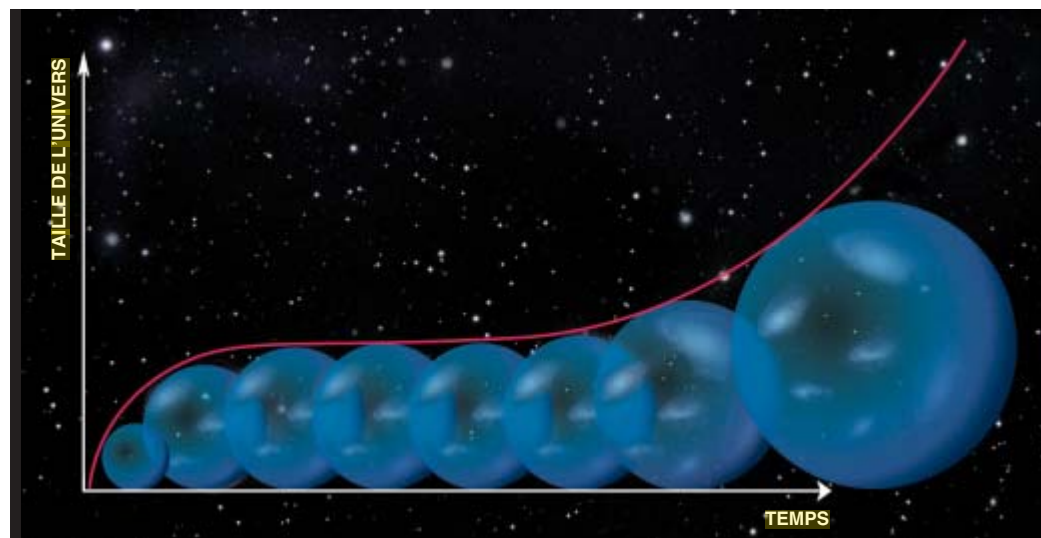
Lemaître refait les calculs de Schwarzschild en abandonnant l'idée d'une densité constante (il ne considère comme constante qu'une grandeur invariante propre à la relativité, la «trace du tenseur énergie-impulsion» qui combine la densité d'énergie et la pression de la matière). Il montre alors, contre 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.

un Univers en expansion. Selon lui, des particules de matière contenues dans l'Univers se sont agglutinées au hasard, à la faveur de fluctuations statistiques. Des zones de densité légèrement supérieure à la moyenne sont apparues. En s'effondrant sous leur propre poids et en attirant la matière environnante, ces fluctuations de densité auraient donné naissance aux galaxies, regroupées par la suite en amas de galaxies, les plus

grandes structures observées jusqu'ici dans l'Univers. Lemaître montre alors que l'estimation de la taille des amas formés selon son modèle est en accord avec les mesures faites par Hubble pour l'amas de galaxies de Coma.

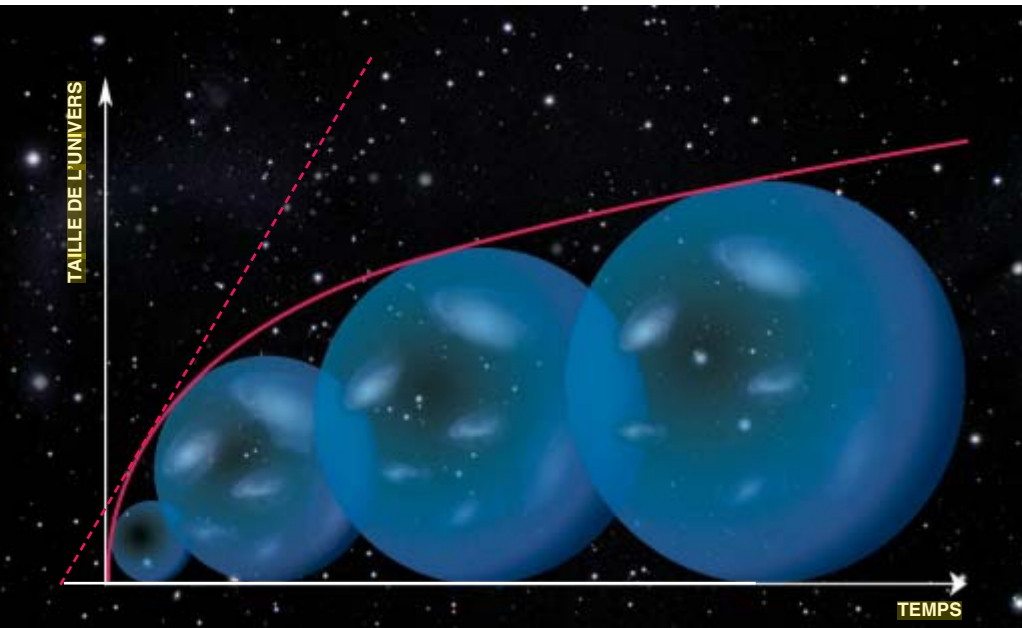
Toutefois, aujourd'hui, on sait que les fluctuations envisagées par Lemaître (des fluctuations statistiques dans un Univers essentiellement homogène) ne suffisent pas à produire les

grandes structures que l'on observe dans l'Univers. Le rayonnement fossile capté par le satellite COBE fournit une image de l'Univers lorsqu'il n'était âgé que de 300 000 ans environ et révèle l'existence de variations de densité dont on pense qu'elles sont à l'origine des grandes structures. Ainsi, l'idée selon laquelle les galaxies et les amas de galaxies se sont formés à partir de condensations locales de matière demeure aujourd'hui celle que privilégient les astronomes. Cependant, beaucoup d'astrophysiciens imaginent qu'il s'agit plutôt de fluctuations microscopiques de nature quantique qui ont été amplifiées au cours de l'inflation de l'Univers (une phase d'expansion exponentielle qui aurait multiplié toutes les distances par un facteur 10^{50} en quelque 10^{-32} seconde).

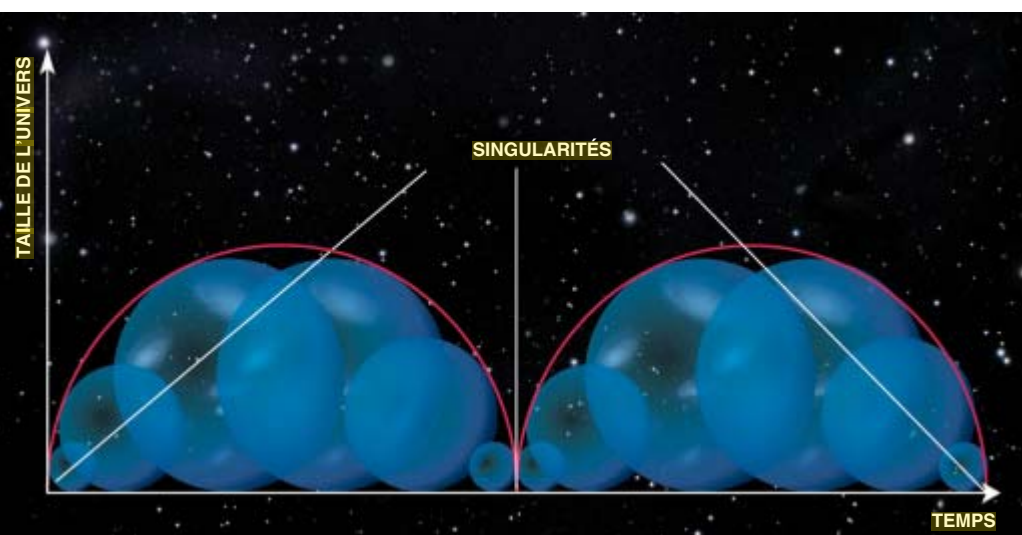
L'âge de l'Univers

Au début des années 1930, Eddington contribue de nouveau à orienter le cours des travaux de son ancien élève en suscitant chez lui un vif intérêt pour la question de l'origine de l'Univers. En effet, en 1931, l'astronome de Cambridge publie un article dans la revue *Nature* où il déclare : «L'idée que le présent ordre des choses ait eu un commencement me répugne philosophiquement.» Lemaître réagit en publiant, dans la même revue, une courte note montrant que la thermodynamique et la théorie quantique peuvent donner un sens physique à un commencement du monde. Dans cet article, il décrit un état initial de l'Univers où tous les quanta d'énergie sont rassemblés en un seul, qu'il nomme «atome primitif». En dehors de lui, les notions d'espace et de temps n'ont pas de sens. Cet état très «ordonné» est instable, et des désintégrations successives comparables aux désintégrations radioactives engendrent progressivement, à partir de l'atome primitif, la matière, l'espace et le temps, tels que nous les connaissons aujourd'hui. Pour Lemaître, «un tel commencement du monde est suffisamment éloigné du présent ordre des choses pour n'être pas répugnant du tout». L'hypothèse annonciatrice de la théorie moderne du Big Bang fait son chemin.

Par ailleurs, au début des années 1930, Lemaître montre que le moindre changement dans la répartition de la densité de matière de l'Univers peut donner à la force répulsive liée à la constante cosmologique l'avantage sur



6. LORSQUE SEULE LA GRAVITATION DÉTERMINE L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS, la constante de Hubble suffit à estimer son âge. L'attraction entre les galaxies freine leur fuite réciproque et ralentit l'expansion. Par conséquent, la constante de Hubble, qui n'est autre que la pente de la courbe donnant la taille de l'Univers en fonction du temps, diminue à mesure que l'Univers vieillit. On calcule facilement l'âge qu'aurait l'Univers si son expansion avait été constante et caractérisée par la valeur actuelle de la constante de Hubble (ligne pointillée). Cet âge théorique est une borne supérieure pour l'âge réel de l'Univers.



7. L'UNIVERS PHOENIX enflé, atteint sa taille maximale et s'effondre sur lui-même avant de recommencer un nouveau cycle d'expansion et de contraction. Il fait apparaître des points de densité infinie, des singularités, qui semblent ne pas avoir de sens physique. Einstein se demandait si, en admettant que l'Univers n'est pas rigoureusement isotrope, les calculs ne feraient pas disparaître ces singularités. Lemaître montrera que ce n'est pas le cas.