

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.

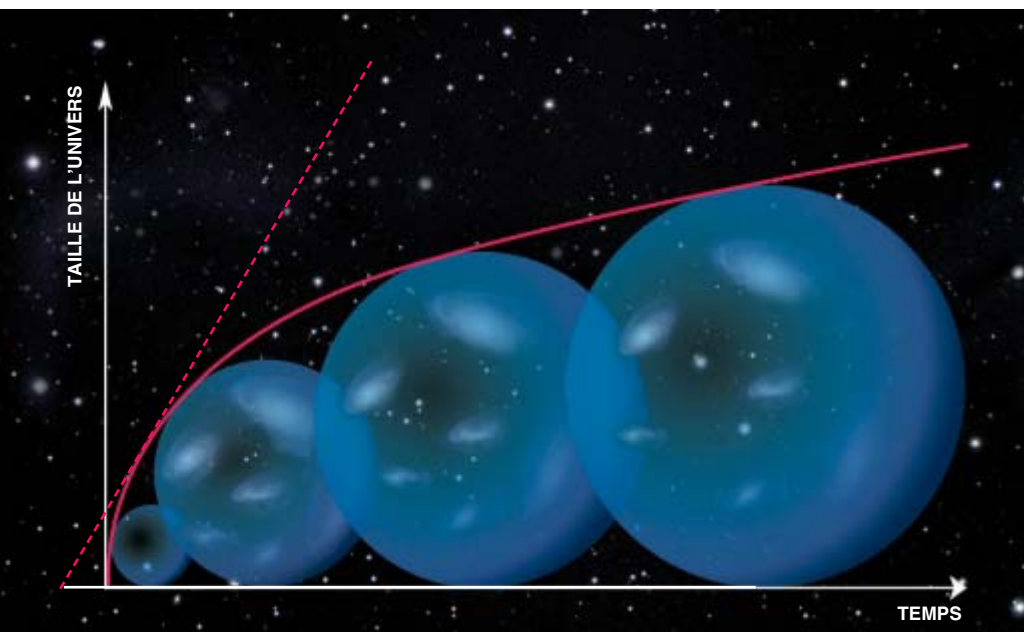
Toutefois, aujourd'hui, on sait que les fluctuations envisagées par Lemaître (des fluctuations statistiques dans un Univers essentiellement homogène) ne suffisent pas à produire les

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).

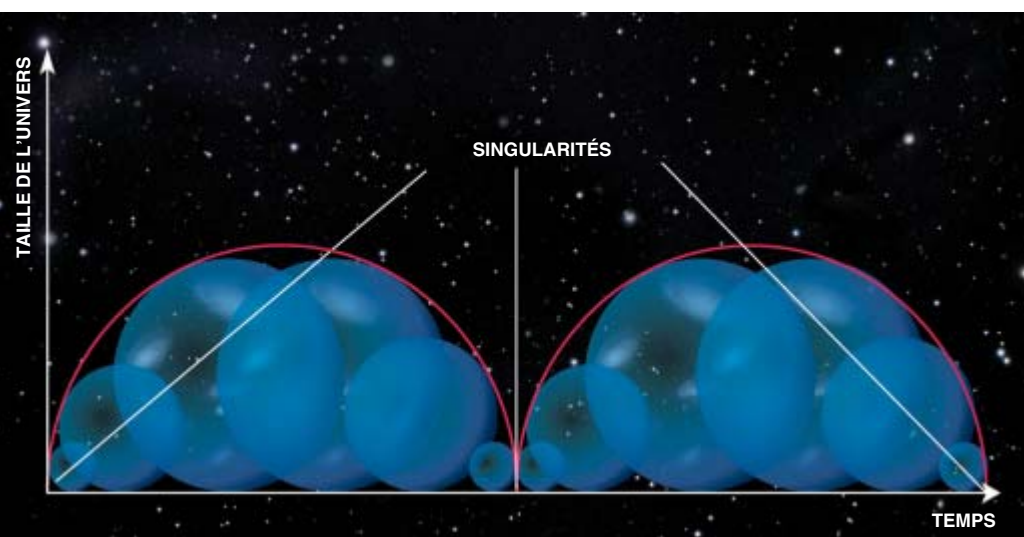
L'âge de l'Univers

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 montera que ce n'est pas le cas.

la gravitation. L'équilibre entre ces deux forces sur lequel repose le modèle statique d'Einstein est, par conséquent, instable et la formation des galaxies à partir des fluctuations de matière de l'Univers doit suffire à le rompre. Ainsi, il semble impossible que l'Univers d'Einstein reste indéfiniment statique.

Chez Lemaître, l'hypothèse de l'atome primitif est avant tout une intuition physique plus qu'une théorie rigoureusement étayée. Il correspond au choix d'un nouveau modèle cosmologique où l'âge de l'Univers est fini. Il s'agit d'un Univers homogène, une hypersphère dont l'évolution commence par un état de densité infinie, une singularité, que Lemaître considère comme la limite donnée par les lois classiques de la relativité lorsqu'on s'approche des conditions exotiques qui règnent à l'époque de l'atome primitif. L'évolution de l'Univers est dominée par deux forces, la gravitation et la «force répulsive», dont l'intensité est fixée par la constante cosmologique. Ce modèle, qu'il défendra jusqu'à la fin de sa vie, comprend trois phases caractéristiques (voir la figure 5).

De l'importance d'une constante

Au cours de la première phase, qui commence à la singularité initiale, l'Univers entre en expansion et l'espace se remplit des produits de désintégration de l'atome primitif. L'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre les particules de matière freine progressivement l'expansion. La deuxième phase correspond à un équilibre entre la gravitation et la force répulsive liée à la constante cosmologique : le rayon de l'Univers reste, momentanément, quasi constant, comme dans l'Univers d'Einstein. La troisième et dernière phase de l'histoire de l'Univers selon Lemaître inclut l'époque actuelle et commence lorsque la formation des grandes structures et des galaxies rompt l'équilibre de la période quasi statique et provoque la reprise de l'expansion accélérée sous l'effet de la constante cosmologique.

Lemaître attache beaucoup d'importance à ladite constante. Il s'oppose en cela à Einstein qui y a renoncé («c'est la plus grande erreur de ma vie», aurait-il déclaré) en même temps que la découverte de la fuite des galaxies l'a obligé à abandonner son modèle d'Univers statique. Visionnaire, Lemaître



8. ROBERT MILLIKAN, GEORGES LEMAÎTRE ET ALBERT EINSTEIN, en janvier 1933. Après sa rencontre avec Millikan, Lemaître se persuade que les rayons cosmiques sont des reliquats de la désintégration de l'atome primitif.

estime que la mécanique quantique pourrait, un jour, donner un sens physique à cette constante qui semble signifier que le vide est doté d'une certaine densité d'énergie. On pense aujourd'hui qu'Einstein a traité la constante cosmologique avec trop de légèreté et qu'elle n'est pas une simple «option», mais correspond à une caractéristique fondamentale de sa théorie due à l'existence d'une énergie du vide quantique : la mécanique quantique impose que même dans un espace vide, des paires de particules et d'antiparticules apparaissent et disparaissent sans cesse (sinon, la valeur de tous les paramètres physiques serait connue avec une précision parfaite – ils seraient tous nuls –, ce qui contredit le principe d'indétermination de Heisenberg).

On a effectivement établi récemment, que la constante cosmologique n'est vraisemblablement pas nulle. Par ailleurs, Lemaître insiste sur le fait qu'en changeant la valeur de la constante cosmologique, on modifie l'âge de l'Univers. Selon lui, cela constitue un argument supplémentaire pour la conserver. En effet, si l'évolution de l'Univers n'est gouvernée que par la gravitation, la seule constante de Hubble suffit à déterminer son âge (voir la figure 6). Or, avec la valeur de la constante de Hubble dont on dispose dans les années 1930, cet âge est toujours inférieur à celui du Système solaire, et il convient de corriger cette anomalie. Dès 1931, en se fondant sur une borne supérieure de la constante cosmologique, Lemaître évalue à dix milliards d'années l'âge de l'Univers (un bon ordre de grandeur aujourd'hui encore).

L'hypothèse de l'atome primitif et son scénario de synthèse des éléments chimiques par désintégrations successives est complètement abandonnée de nos jours. De plus, la géométrie spatiale de l'Univers semble être euclidienne et non pas sphérique, comme Lemaître l'envisagea toujours. Toutefois, diverses observations faites récemment sur les supernovae lointaines semblent plaider pour une valeur non nulle (et positive) de la constante cosmologique et, par conséquent, pour une évolution de l'Univers caractérisée par les trois phases proposées par Lemaître.

Le problème des singularités

Au début des années 1930, on admet que des galaxies existent en dehors de la nôtre et que l'Univers est en expansion ; on en déduit des modèles de cosmos en évolution permanente, peut-être depuis une durée finie. Cette idée continue cependant à heurter les choix philosophiques de nombreux physiciens. Non seulement il leur faut accepter que l'Univers a eu un commencement, mais, de plus, ce commencement se traduit par un état de densité infinie, par une singularité où les équations de la physique perdent tout leur sens.

Ainsi, en janvier 1933, Einstein, qui vient de quitter l'Allemagne pour les États-Unis, rencontre Lemaître à l'Institut de technologie de Californie. Il lui demande si l'on peut éliminer les singularités qui apparaissent dans l'histoire de «l'Univers phœnix», un modèle stipulant que l'Univers enfle à partir d'une singularité, atteint une taille maximale, s'effondre en une nou-