

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).

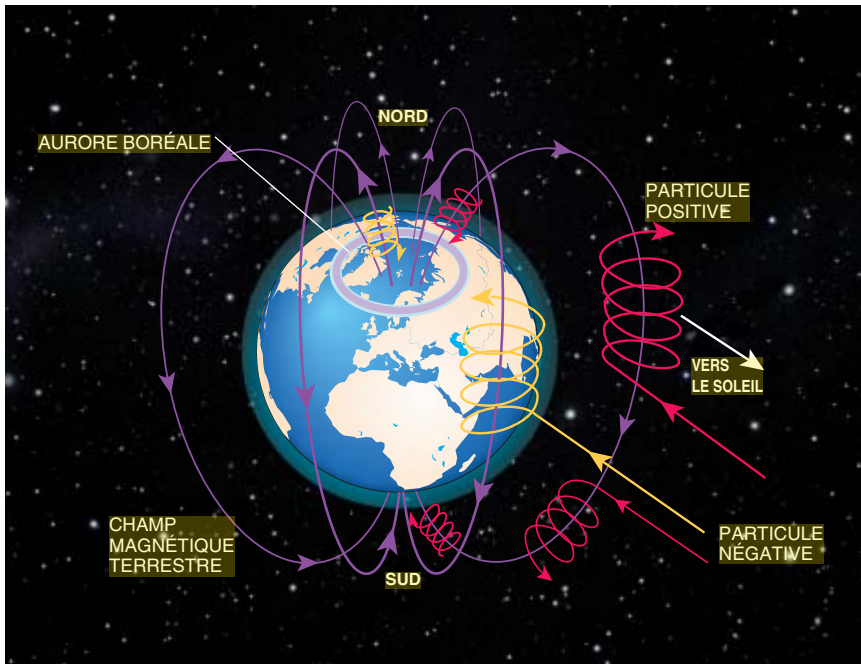
On a effectivement établi récemment, que la constante cosmologique n'est vraisemblablement pas nulle. Par ailleurs, Lemaître insiste sur le fait qu'en changeant la valeur de la constante cosmologique, on modifie l'âge de l'Univers. Selon lui, cela constitue un argument supplémentaire pour la conserver. 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 phénix», un modèle stipulant que l'Univers enflé à partir d'une singularité, atteint une taille maximale, s'effondre en une nou-



9. LES AURORES BORÉALES sont produites par les particules électriquement chargées émises par le Soleil et piégées par le champ magnétique terrestre. Lemaître étudie les rayons cosmiques en supposant qu'ils adoptent des trajectoires semblables lorsqu'ils arrivent au voisinage de notre planète. Les particules chargées positivement (en rouge) circulent autour des lignes de forces du champ magnétique terrestre (violet) en sens inverse des particules chargées négativement (jaune). De ce fait, elles arrivent à l'observateur au sol selon des directions proches de l'Ouest géomagnétique (alors que les particules négatives arrivent de l'Est). Comme cette direction est aussi celle d'où l'on reçoit le plus de rayons cosmiques, Lemaître en déduit qu'ils sont constitués de particules de charge positive.

velle singularité avant de recommencer un nouveau cycle d'expansion et de contraction (voir la figure 7). Comme tous les modèles envisagés par les astronomes, celui-ci est homogène et isotrope (ses propriétés sont les mêmes en tout point de l'espace et dans toutes les directions). Selon Einstein, cette isotropie est peut-être la cause de l'apparition des singularités. Si l'on admettait une légère anisotropie de l'Univers (un Univers en expansion dans deux directions de l'espace et en contraction selon la troisième, par exemple) peut-être l'Univers ne s'effondrerait-il pas complètement sur lui-même et la singularité serait-elle évitée. Lemaître prouve rapidement, à l'aide d'un cas particulier, que la singularité ne disparaît pas, même lorsque l'Univers n'est pas isotrope. Le passage par un état de « rayon » nul semble bel et bien un passage obligé pour la plupart des modèles d'Univers. Cette « expérience mathématique » préfigure les théorèmes sur les singularités de Roger Penrose et Stephen Hawking qui montreront, par des méthodes globales, que des singularités physiques apparaissent de façon inévitable dans beaucoup de modèles possibles d'espace-temps.

Les rayons cosmiques

Selon Lemaître, une des conséquences de l'hypothèse de l'atome primitif est l'existence de particules chargées, hautement énergétiques, produites lors des premières désintégrations de cet atome. Après une rencontre avec Robert Millikan, Lemaître se persuade que ces particules ne sont autres que les rayons cosmiques que l'on capte à haute altitude et dont on ignore encore, au début des années 1930, la nature précise et l'origine. La détection et l'étude des rayons cosmiques présente pour lui une importance cruciale, car il s'agit, selon ses propres termes, de « hiéroglyphes » qu'il faut déchiffrer pour connaître les tout premiers instants de l'Univers.

Lemaître et son collègue de l'Institut de technologie du Massachusetts, Manuel Sandoval Vallarta, entreprennent d'étudier les propriétés des trajectoires des rayons cosmiques. Plusieurs observateurs ont montré que l'intensité du rayonnement cosmique varie suivant la latitude géomagnétique (la latitude mesurée non pas à partir du pôle géographique de la Terre, mais à partir de son pôle magnétique). Forts de leur hypothèse selon laquelle ces rayons sont des particules chargées

issues de la désintégration de l'atome primitif, Lemaître et Vallarta s'attachent à calculer l'interaction entre ces particules et le champ magnétique terrestre pour expliquer, notamment, l'« effet de latitude ».

En 1907, un problème semblable avait déjà été abordé par Carl Störmer, de l'Université d'Oslo. Störmer étudiait l'interaction des particules chargées émises par le Soleil et du champ magnétique terrestre afin d'obtenir une théorie complète des aurores boréales. Ces phénomènes lumineux sont produits par des particules chargées émises par le Soleil. En s'approchant de la Terre, elles adoptent une trajectoire en hélice le long des lignes du champ magnétique terrestre et sont canalisées vers les pôles. Lorsqu'elles pénètrent dans l'atmosphère, elles ionisent les atomes d'azote et d'oxygène de l'air qui, après leur passage, se dés excitent en émettant de la lumière.

En supposant que les rayons cosmiques – des particules beaucoup plus énergétiques que celles du vent solaire – proviennent de toutes les directions de l'espace (et non plus seulement du Soleil), Lemaître et Vallarta complètent l'approche de Störmer pour étudier leurs trajectoires dans le champ magnétique terrestre. À l'Institut de technologie du Massachusetts, à l'aide d'un calculateur analogique – la « machine de Bush » – capable d'intégrer des systèmes d'équations différentielles et de donner des représentations graphiques des solutions, ils parviennent à dessiner et à étudier des milliers de trajectoires de rayons cosmiques. Grâce à ce travail, Lemaître et Vallarta confirment que la quantité de rayons cosmiques reçue sur Terre doit varier selon latitude géomagnétique. En outre, ils établissent que les particules qui constituent les rayons cosmiques sont surtout des particules chargées positivement.

En recherchant ces « hiéroglyphes », vestiges des débuts « explosifs » de l'Univers, Lemaître est l'un des premiers physiciens à proposer l'existence d'un rayonnement fossile susceptible de donner une base expérimentale à la cosmologie. Bien sûr, le rayonnement fossile, effectivement détecté dans les années 1960, est de nature très différente de celui dont Lemaître avait postulé l'existence, et l'on considère aujourd'hui que les rayons cosmiques sont des particules très énergétiques – des protons et des noyaux atomiques