

causent des infections difficiles à traiter. Ces infections insidieuses, lentes à se développer, se révèlent parfois par des crises soudaines et répétées et sont difficiles à éradiquer. Par ailleurs, les biofilms ont également été incriminés dans certaines infections parodontales, des infections de la prostate, des calculs rénaux, la tuberculose, la maladie du légionnaire et certaines infections de l'oreille moyenne.

Pour éviter la formation de ces biofilms, on pourrait, par exemple, utiliser des molécules qui, en recouvrant la surface des cellules, neutraliseraient leurs propriétés adhésives, ce qui réduirait leur aptitude à se fixer (voir l'encadré page 52). On pourrait aussi bloquer la synthèse de la matrice extracellulaire, ou encore inhiber la synthèse des molécules que les bactéries des biofilms utilisent pour communiquer ; on arrêterait ainsi la formation des biofilms, on éviterait la production de toxines et l'on bloquerait diverses activités néfastes.

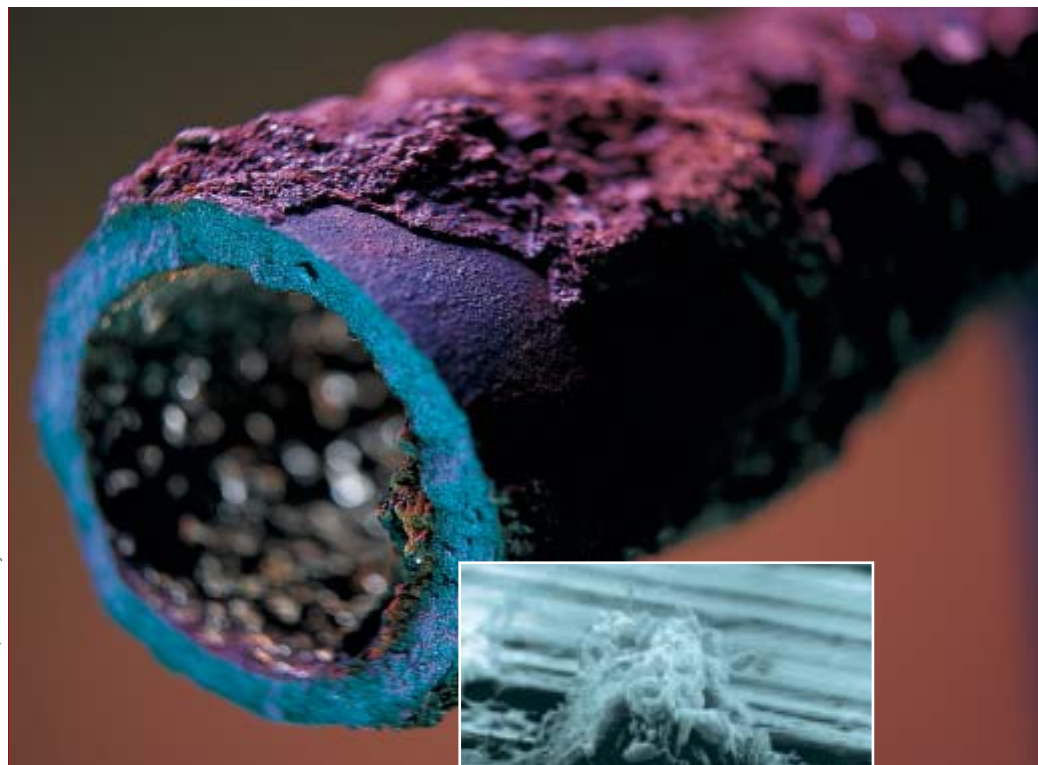
Plutôt que de submerger les organismes agressifs avec des poisons, mieux vaut sans doute manipuler les cellules de façon plus subtile. En inhibant diverses activités spécifiques de ces micro-organismes, on lutte plus efficacement qu'en utilisant des doses massives de substances, toxiques pour ces bactéries, mais aussi pour d'autres qui sont inoffensives, voire utiles au fonctionnement de l'organisme.

Le salut par les algues

En 1995, Staffan Kjellerberg et Peter Steinberg, de l'Université de Sydney, ont remarqué que les feuilles d'une algue rouge (*Delisea pulchra*) sont rarement recouvertes de biofilms. Malgré les milliers d'espèces bactériennes qui vivent dans l'eau de mer, ces algues restent immaculées. Elles utilisent des substances chimiques de la famille des furanones.

Les furanones ressemblent aux homosérines lactones acylées et à des molécules, récemment découvertes, qui permettent aux bactéries et à des espèces différentes de communiquer. Les furanones semblent se lier aux récepteurs des bactéries qui, normalement, fixent les signaux déclenchant la fabrication des biofilms : en empêchant la fixation de ces signaux, les furanones évitent la formation des biofilms.

Ces composés inhibent la formation de nouveaux biofilms, mais détruisent aussi les biofilms existants. Les fura-



6. LES BIOFILMS DIMINUENT LE RENDEMENT des installations industrielles, voire les endommagent : par exemple, ils peuvent accélérer la corrosion des canalisations métalliques.

nones sont adaptées à un usage médical puisqu'elles sont dépourvues de toxicité et assez stables dans l'organisme. Par ailleurs, bien que les furanones existent dans les océans depuis des millions d'années, aucune souche bactérienne résistante ne semble avoir été sélectionnée. On peut espérer que les bactéries colonisant les dispositifs médicaux et les tissus humains ne deviendront pas non plus résistantes.

Aujourd'hui, il existe des revêtements protecteurs qui contiennent des furanones et qui sont appliqués sur les coques de bateaux et les équipements d'aquaculture.

Selon certains biologistes, la formation des biofilms bactériens s'apparente à un processus d'embryogenèse :

de même qu'un œuf fécondé donne naissance à divers types de cellules au cours du développement d'un fœtus, de même certaines bactéries se différencient après leur ancrage à une surface, synthétisent des molécules de communication (qui rappellent les phéromones et les hormones) et coordonnent l'édification de microcolonies dont la structure est complexe. Par ailleurs, dans certains biofilms, des bactéries d'espèces différentes cohabitent, certaines digèrent, par exemple, des nutriments pour une autre espèce. Les bactéries, longtemps considérées comme des micro-organismes isolés et rudimentaires, semblent dotées de capacités d'organisation et de coopération notablement plus élaborées.

Bill COSTERTON est directeur du Centre d'études des biofilms à l'Université du Montana.

Philip STEWART est bactériologiste au Centre d'études des biofilms.

J. W. COSTERTON, P. STEWART et E.P. GREENBERG, *Bacterial Biofilms : A Common Cause of Persistent Infections*, in *Science*, vol. 284, pp. 1318-1322, mai 1999.

D. G. ALLISON, P. GILBERT, H.M. LAPPIN-SCOTT et M. WILSON, *Community*

Structure and Co-operation in Biofilms, Cambridge University Press, 2001.

B. COSTERTON, *Cystic Fibrosis Pathogenesis and the Role of Biofilms in Persistent Infection*, *Trends in Microbiology*, vol. 9, n° 2, pp. 50-52, 2000.

D. NIVENS, D. OHMAN, J. WILLIAMS et M. FRANKLIN, *Role of Alginate and alginate O-Acetylation in the Formation of Pseudomonas Aeruginosa, Microcolonies and Biofilms*, n° 183, pp. 1047-1057, 2001.

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-

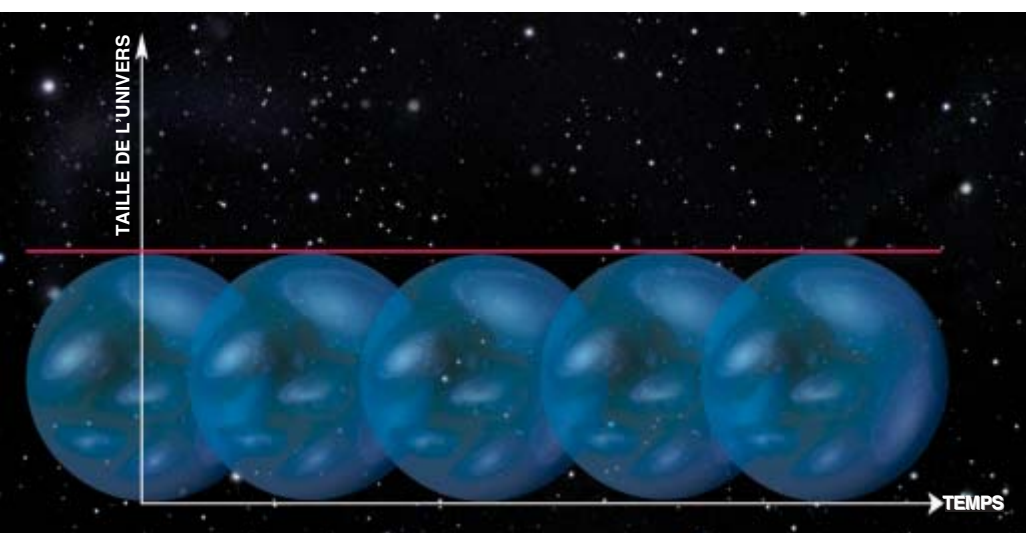
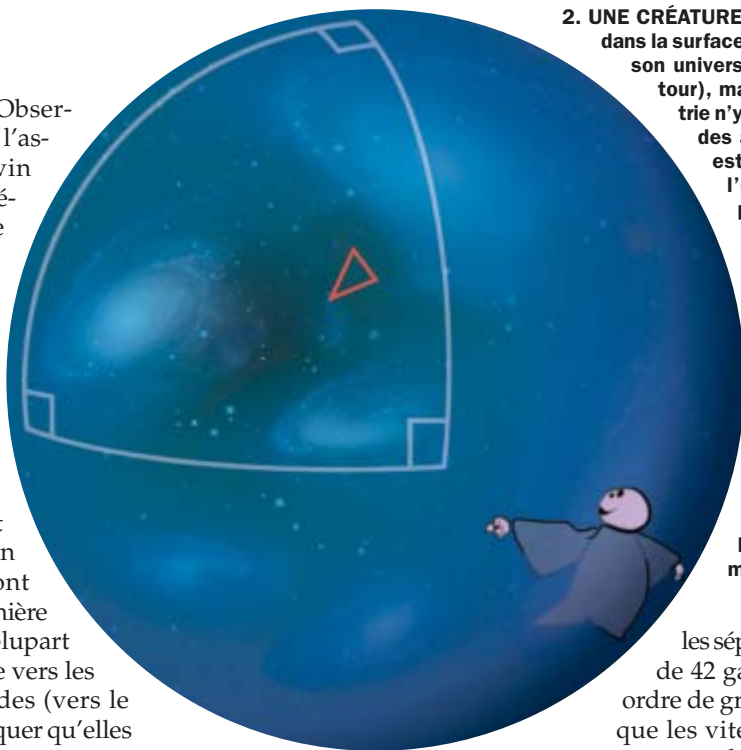
vers statique d'Einstein. Vers le futur, l'Univers de Lemaître, dont la masse est constante et dont la taille grandit indéfiniment, tendrait vers le modèle de De Sitter, totalement vide. Entre ces deux extrêmes, l'expansion de l'Univers expliquerait que les galaxies se fuient les unes les autres.

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.

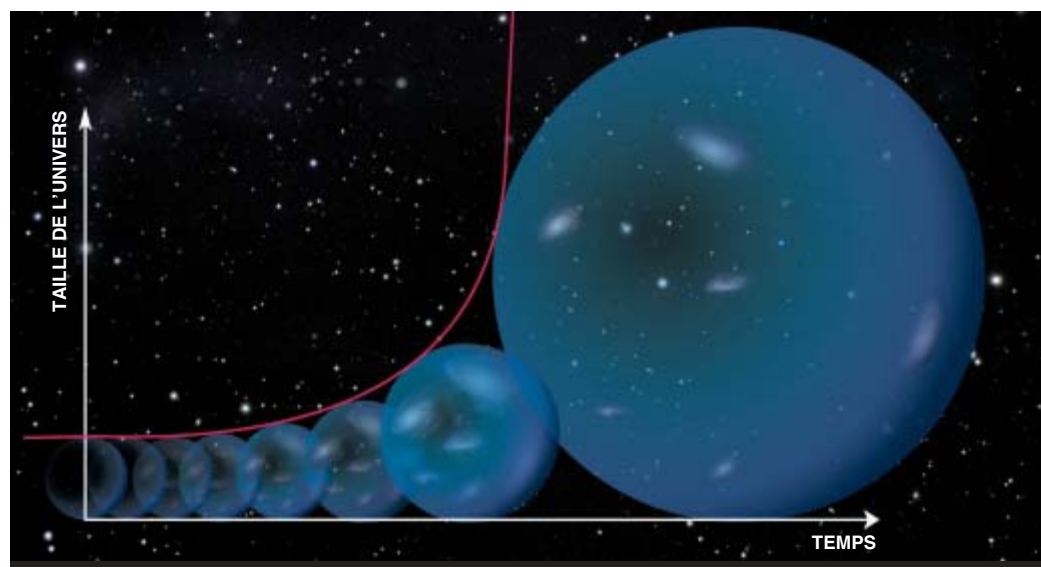
La formation des galaxies

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).

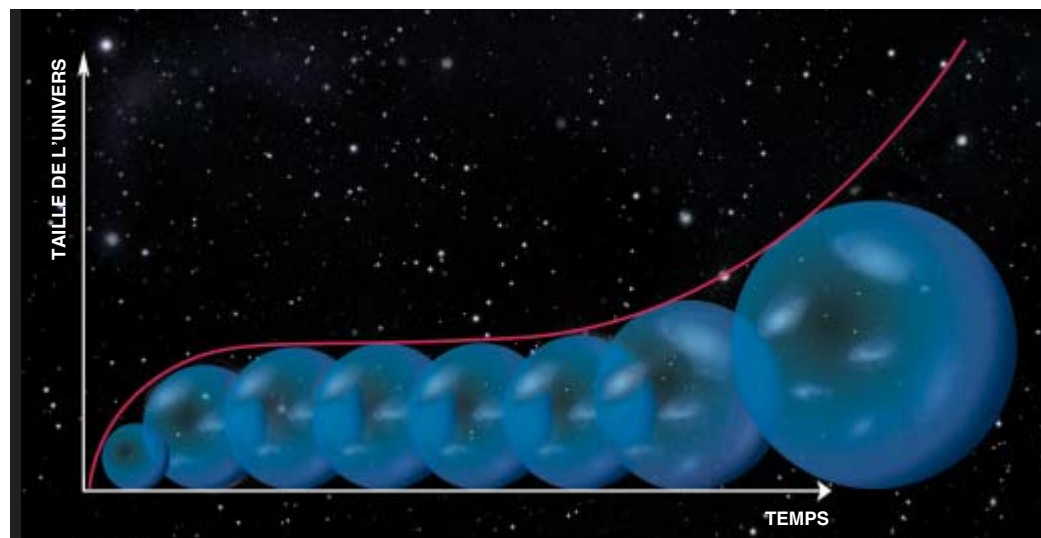
Lemaître refait les calculs de Schwarzschild en abandonnant l'idée d'une densité constante (il ne considère comme constante qu'une grandeur invariante propre à la relativité, la «trace du tenseur énergie-impulsion» qui combine la densité d'énergie et la pression de la matière). Il montre alors, contre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

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.

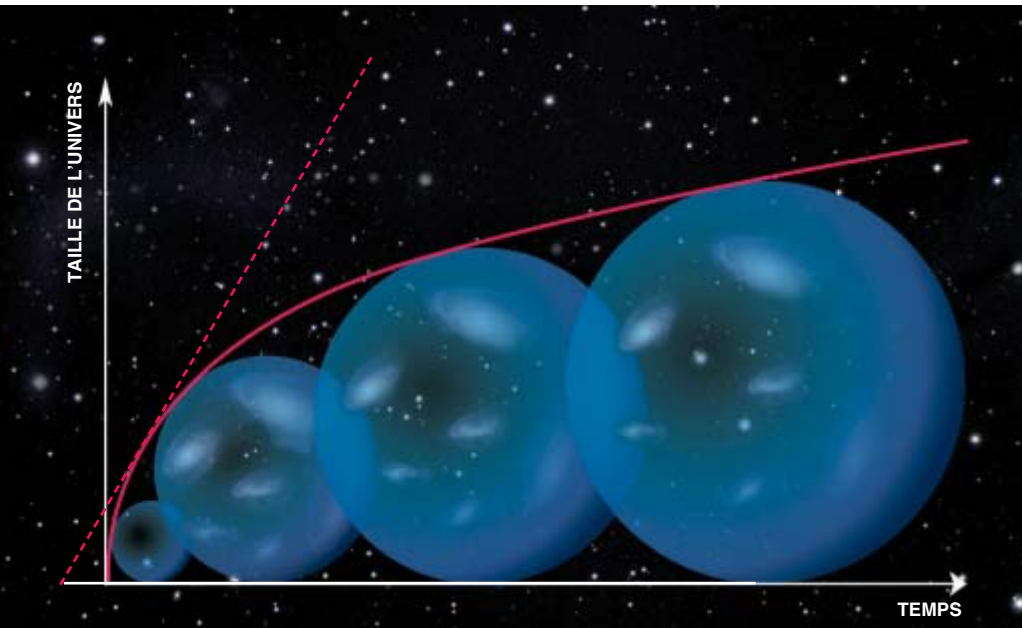
Toutefois, aujourd'hui, on sait que les fluctuations envisagées par Lemaître (des fluctuations statistiques dans un Univers essentiellement homogène) ne suffisent pas à produire les

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).

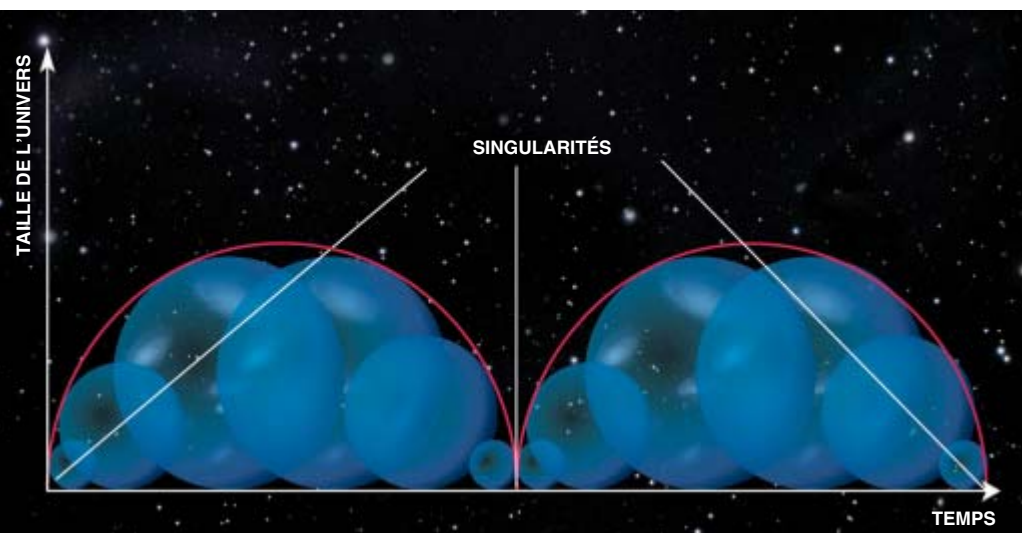
L'âge de l'Univers

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).

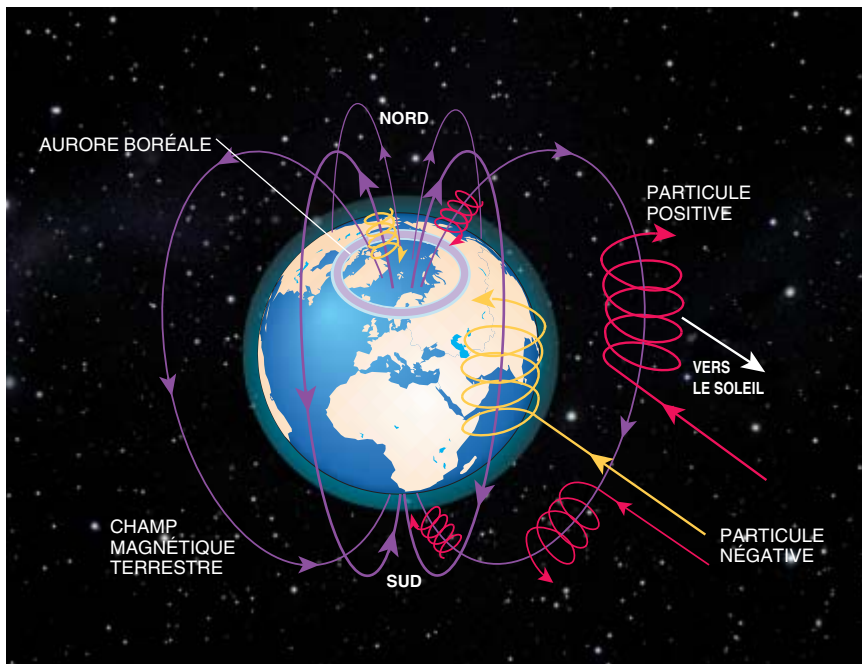
On a effectivement établi récemment, que la constante cosmologique n'est vraisemblablement pas nulle. Par ailleurs, Lemaître insiste sur le fait qu'en changeant la valeur de la constante cosmologique, on modifie l'âge de l'Univers. Selon lui, cela constitue un argument supplémentaire pour la conserver. 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-



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 désolent 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

légers – produites bien plus tard dans l'histoire de l'Univers, notamment par les supernovae. Toutefois, certaines particules dont l'énergie est de l'ordre de 10^{19} électron-volts ne peuvent pas être produites de cette façon, et certains physiciens pensent qu'elles proviennent de la désintégration de particules massives et exotiques, produites dans les tout premiers instants de l'Univers. En 1998, un partisan de cette théorie, Michael Hillas de l'Université de Leeds, en Grande-Bretagne, concluait ainsi un de ses articles : «Il est tout à fait possible que Lemaître ait été loin d'avoir tort.»

Lemaître possédait une passion pour le calcul numérique et pour les machines à calculer. À Louvain, il acquit toute une série de machines à calculer mécaniques, puis électromécaniques. En 1958, il fit venir le premier ordinateur de l'Université catholique de Louvain, un Burroughs E101, qu'il utilisa pour effectuer des calculs relatifs aux modèles d'amas de galaxies développés dans les années 1940 et 1950 à la suite de ses travaux sur les condensations de matière dans l'Univers en expansion.

Des mathématiques à la cosmologie

Pionnier de la cosmologie, Lemaître fut également, comme beaucoup des théoriciens de la physique classique, un mathématicien de premier plan qui apporta des solutions originales à certains problèmes de mécanique céleste (problème des trois corps) ou encore de calcul numérique (transformée de Fourier rapide). À son époque, d'autres, plus intéressés par les territoires prometteurs de la mécanique quantique, se détournaient de ce genre de problèmes, tandis que les mathé-

maticiens s'intéressaient plutôt aux structures abstraites dans le style bourbachique. Dans les milieux mathématiques de la fin des années 1950, il faisait figure de marginal. Sa passion pour les ordinateurs, pour le calcul numérique et l'expérimentation mathématique était pourtant très moderne, à l'instar de ses idées sur l'histoire de l'Univers – qu'il défendit parfois contre Einstein lui-même. La découverte récente de l'importance de la constante cosmologique confirme son intuition et constitue peut-être le plus grand défi lancé aux physiciens pour le siècle qui s'ouvre.

Dominique LAMBERT, docteur en sciences physiques et en philosophie de l'Université catholique de Louvain, est chargé de cours de philosophie et d'histoire des sciences aux Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix à Namur.

O. GODART et M. HELLER, *Cosmology of Lemaître*, in *History of Astronomy Series*, Pachart Publishing House, Tucson, vol. 3, 1985.

H. KRAGH, *Cosmology and Controversy*.

The Historical Development of Two Theories of the Universe, Princeton University Press, 1996.

A. FRIEDMAN et G. LEMAÎTRE, *Essai de cosmologie*, précédé de *L'invention du Big Bang* par J.-P. LUMINET (textes choisis, présentés, traduits et annotés par J.-P. Luminet et A. Grib), Éditions du Seuil, Collection Sources du Savoir, 1997.

D. LAMBERT, *Un atome d'Univers. La vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Éditions Racine/Éditions Lessius, 2000.

L'Inserm est le premier organisme de recherche français qui se consacre à la santé. Il rassemble plus de 10 000 personnes dans ses 300 laboratoires. Disposant d'un budget de plus de 450 millions d'euros, l'Inserm collabore avec plus de 93 pays et 260 industriels.

Inserm

Institut national
de la santé et de la recherche médicale

Dans le but de soutenir les jeunes chercheurs et de renforcer la dynamique scientifique de la recherche biomédicale, clinique et en santé publique,

l'Inserm lance **Avenir**, un appel à projets pour post-doctorants et jeunes chercheurs titulaires

Ce programme permettra aux jeunes scientifiques retenus de bénéficier :

- d'une aide financière d'au moins 60 000 euros par an pendant 3 ans
- d'un espace équipé d'environ 50 m²
- de l'accès aux plates-formes technologiques
- de la possibilité de composer son équipe grâce, notamment, à l'accueil d'un post-doctorant étranger
- d'une allocation pour les post-doctorants de 2 300 euros net par mois.

Il s'adresse aux jeunes chercheurs, qu'ils soient titularisés ou post-doctorants français et étrangers, présentant un projet scientifique de haut niveau.

45 projets pourront être sélectionnés.

Pour obtenir les informations complètes sur l'appel d'offres **Avenir 2001**, connectez-vous sur : Inserm.fr ou appelez au :

01 44 23 67 05

ou adressez un mail à :

postel-vinay@tolbiac.inserm.fr

Date limite de dépôt des dossiers : 29 octobre 2001

