



Astrophysicien à l'observatoire de Meudon, Jean-Pierre Luminet est directeur de recherche au CNRS. Il a reçu en 1999 le prix Georges Lemaître, du nom de l'inventeur de la théorie de l'atome primitif, dite du Big Bang. Connue initialement pour ses travaux sur les trous noirs, Jean-Pierre Luminet s'intéresse aujourd'hui à la topologie de l'espace. Il a publié en 2001 *L'Univers chiffonné*, dans lequel il expose sa théorie d'un Univers fini, qu'il reprend avec Marc Lachièze-Rey dans *De l'infini...* qui vient de paraître chez Dunod.

© MICHEL LABELLE

Jean-Pierre Luminet

L'Univers est-il infini ?

Einstein voulait un Univers fini et statique. Sans régler la question du fini ou de l'infini, la théorie de l'expansion a apparemment mis fin au paradigme de l'Univers statique. Mais qu'en est-il réellement ? L'étude attentive des formes d'espace possibles permet de construire un modèle testable d'après lequel notre Univers est beaucoup plus petit que nous ne le pensons.

LA RECHERCHE : Vous vous intéressez aux caractéristiques globales de l'Univers : sa forme, sa taille, sa structure. Est-ce que ce sont des questions que l'on peut se poser scientifiquement ?

JEAN-PIERRE LUMINET. À l'heure actuelle, oui. Il est vrai que ces sujets sont longtemps restés de l'ordre de la spéculation philosophique. Les observations scientifiques se bornaient plutôt à mesurer les distances et les grandeurs des objets qui peuplent l'Univers. Mais ce n'est qu'à partir de la relativité générale, en 1917, que l'on peut légitimement parler de l'Univers entier en tant qu'objet de mesure. D'une part parce que la théorie de la relativité générale fait appel à des géométries non euclidiennes* pour décrire l'espace tel qu'il est façonné par

la gravitation. Or, qui dit géométrie non euclidienne dit courbure, et qui dit courbure pose la question de la taille de l'Univers. D'autre part, on récolte depuis cette époque de nombreuses observations cosmologiques, comme la fuite apparente des galaxies et le rayonnement de fond*, qui traduisent des propriétés globales du cosmos. Dès lors, beaucoup de cosmologistes font le pari de considérer l'Univers comme un objet d'étude à part entière.

Dans *De l'infini...*, vous rappelez que la forme de l'Univers dépend notamment de la « topologie cosmique ». Qu'entendez-vous par ces mots ?

J.-P. L. C'est l'étude des formes d'espace qui correspondent toutes à une même description locale. Je considère que la question de la géométrie se pose à quatre niveaux différents. De même que la surface de la mer paraît lisse vue d'avion, ondulée vue d'un paquebot et chaotique vue à la nage, l'espace physique se décrit comme courbé à grande échelle (celle de la relativité générale), euclidien à moyenne échelle (la nôtre) et probablement fluctuant à l'échelle microscopique (on n'a pas encore atteint une finesse suffisante pour en être sûr). Mais ce qui nous intéresse ici est une échelle encore plus élevée, celle de l'Univers tout entier. Eh bien, la structure décrite par une solution donnée des équations d'Einstein peut parfaitement s'insérer dans plusieurs modèles complètement différents au niveau de leur topologie. Tout comme la mer qui paraît lisse vue d'avion pourrait s'insérer indifféremment dans plusieurs contextes globaux qui ne modifient pas ses propriétés (piscine géante, mer fermée, océan, simulation...).

Précisons d'abord que le modèle d'Univers statique imaginé par Einstein en 1917 a fait long feu. La découverte de l'expansion de l'Univers a mis fin au paradigme d'un Univers invariable au cours du temps. D'autres solutions aux équations d'Einstein, dynamiques celles-là, furent découvertes indépendamment par Alexandre Friedmann et par Georges Lemaître. Ceux-ci considèrent trois familles d'espaces : les espaces euclidiens (à courbure nulle), les espaces sphériques (à courbure positive) et les espaces hyperboliques (à courbure négative). Physiquement parlant, cette courbure dépend de la densité moyenne de matière et d'énergie dans l'Univers. En outre, ces espaces changent de taille au cours du temps : soit ils se dilatent perpétuellement (on parle d'Univers ouvert), soit ils se dilatent puis se contractent (on parle d'Univers fermé). Les observations actuelles tendent à prouver que la courbure n'est pas très grande (donc que l'espace est proche d'être euclidien, ou « plat » comme disent les Anglo-Saxons, avec un léger penchant pour le cas sphérique), et que l'expansion se poursuivra éternellement, en s'accroissant d'ailleurs au cours du temps en raison de la prépondérance d'une mystérieuse « énergie noire ». L'espace quasi plat à expansion accélérée est en passe de devenir le modèle cosmologique « standard » !

*Les géométries non euclidiennes n'obéissent pas aux postulats d'Euclide. En particulier, la somme des angles d'un triangle n'y est pas égale à 180°, mais supérieure (géométries à courbure positive), ou inférieure (géométries à courbure négative).

*Le rayonnement de fond cosmologique, ou rayonnement fossile, a été émis lorsque des photons ont été libérés pour la première fois, 400 000 ans après le début de l'Univers. Initialement très chaud, il est encore détectable aujourd'hui sous la forme d'un fond diffus à 2,7 kelvins.

Pourquoi parlez-vous d'« espaces euclidiens », au pluriel ?

J.-P. L. Parce que, de tous les espaces tridimensionnels à courbure nulle, l'espace euclidien de notre vie quotidienne n'est que le plus simple. Il y en a beaucoup d'autres. Pour être précis, il y en a 18 en tout. Et chacun de ces espaces est compatible avec le modèle standard. En effet, une solution particulière des équations d'Einstein (par exemple le modèle plat) correspond à une métrique donnée, c'est-à-dire qu'elle fixe la définition des distances dans l'espace, mais beaucoup de topologies respectent cette métrique particulière. Ce qui nous trompe, c'est que nous envisageons toujours un espace monoconnexe, c'est-à-dire sans « trou » ni structure particulière qui empêcherait un lacet quelconque d'être resserré, alors qu'il peut très bien présenter une structure « multiconnexe », reliant deux points quelconques par une multiplicité de chemins et créant de ce fait une apparence cristallographique. Je m'explique.

Une topologie est définie par une forme de base et des opérations mathématiques qui décrivent comment on reproduit cette forme de base. Prenez un cube par exemple. Appliquez une opération mentale qui consiste à faire coïncider chaque carré de surface avec le carré opposé. Cela signifie que, si vous vous déplacez dans le cube et que vous en sortez par un point, vous entrez à nouveau dans le même cube par la face opposée.

Bien que l'espace physique soit limité dans un volume égal à celui du cube, vous avez créé un espace mathématique fini et sans bord dans lequel vous pouvez voyager indéfiniment. Si vous changez la définition de l'opération mentale, par exemple en faisant coïncider deux faces opposées après les avoir fait tourner d'un demi-tour, vous changez de topologie, vos trajets vont être modifiés, mais vous restez toujours dans la même métrique.

L'Univers pourrait-il avoir une structure répétitive ?

J.-P. L. Bien sûr ! C'est ce que j'appelle l'Univers chiffonné. Selon cette hypothèse, nous ne serions pas dans un Univers aussi grand que celui observé, mais dans une cellule plus petite à travers laquelle les rayons lumineux bouclent plusieurs fois, tout comme le voyageur dans le cube. Vous trouverez peut-être bizarre qu'une transformation mathématique apparemment arbitraire corresponde à une opération physiquement réalisable. C'est pourtant ce qui arrive très concrètement sur un cylindre, quand vous revenez à votre point de départ alors que vous avez marché toujours tout droit. Du point de vue de la métrique, le cylindre n'est pas différent du plan. Du point de vue de la topologie, en revanche, le cylindre et le plan n'ont rien à voir.

La topologie multiconnexe (c'est-à-dire qui répète une forme de base) de l'Univers n'est pas un jeu de l'esprit, mais une extension possible des propriétés connues pour les surfaces. On peut extrapoler à trois dimensions et



comprendre que dans tous les signaux lumineux que nous recevons de l'espace, il y en a peut-être de nombreux qui proviennent de la même source et qui ont emprunté des chemins différents.

Votre Univers chiffonné fait penser à une galerie des glaces cosmique !

J.-P. L. Exactement. Si vous entrez dans une pièce tapissée de miroirs sur ses six côtés, vous aurez l'illusion d'un espace infini dans toutes les directions. C'est peut-être ce qui nous arrive avec l'Univers. La seule différence, c'est que dans la galerie des glaces, le rayon lumineux est réfléchi par le miroir, tandis que dans l'Univers chiffonné, il traverse la « paroi » et vous revient par une direction quelconque, déterminée par la topologie des lieux. Cela impliquerait que certains objets cosmiques (des galaxies lointaines, par exemple) devraient nous apparaître en plusieurs exemplaires, un seul étant direct (selon le trajet lumineux le plus court), les autres étant des images fantômes observables dans différentes régions du ciel.

J'ai mentionné que si la courbure était nulle, on avait 18 topologies possibles. Chacune découle d'un choix sur la forme de base et sur le type d'opérations mathématiques qui la duplique. Mais dans le cas où la courbure serait positive – et cette hypothèse est favorisée par les récentes observations – il existe une infinité de topologies possibles, dont l'hypersphère chère à Einstein n'est que la plus simple. Avec mon équipe, nous avons récemment montré que le modèle d'espace qui s'ajuste le mieux aux nouvelles observations du rayonnement fossile par la sonde WMAP, et en particulier l'apparent « manque de graves » dans les harmoniques cosmiques, est l'espace sphérique dodécaédrique de Poincaré. Il est fini, de courbure positive, et son volume serait 20 % plus petit que celui de l'univers actuellement observable [1].

[1] J.-P. Luminet et al., *Nature*, 425, 593, 2003.



© MICHEL LABELLE

Quel est l'intérêt fondamental d'un tel modèle, mis à part son aspect fascinant pour l'imagination ?

J.-P. L. C'est qu'il aborde de front l'une des deux lacunes fondamentales de la relativité générale.

Cette théorie, si puissante soit-elle, est d'abord incomplète dans le domaine des très petites échelles. Il faut y incorporer les préceptes de la physique quantique pour tenter de mettre au point une théorie de la gravitation quantique – tentative qui est en cours depuis quatre-vingts ans. Ce que l'on sait beaucoup moins, c'est que la relativité générale est incomplète également à l'échelle supérieure, puisqu'elle ne décrit pas toutes les propriétés de l'Univers. Comme on l'a vu, une seule métrique peut s'accommoder de toutes sortes de formes globales diffé-

rentes. La topologie n'est pas incluse dans les équations d'Einstein. Le rêve qui consiste à essayer de lier le local au global n'a jamais été concrétisé dans aucune théorie physique. C'est pourquoi je pense qu'il est incontournable de se poser la question du niveau global. Entendons-nous bien, les modèles d'Univers chiffonné ne remplacent pas les modèles dits de Big Bang, ils les englobent.

Et qu'en est-il des vérifications expérimentales ? Sont-elles possibles ?

J.-P. L. Non seulement elles sont possibles, mais elles sont déjà en cours. Après des années de recherches purement théoriques, nous voyons enfin arriver le moment où il devient possible de détecter par l'observation ce qu'on appelle le signal topologique. Il faut d'abord savoir que la tentative d'identifier individuellement des objets cosmiques à travers leurs images fantômes n'est guère réaliste. Sans connaître la topologie au départ, il est impossible de reconnaître des images disséminées n'importe où, provenant d'époques différentes, d'orientations

différentes – sauf si l'Univers est vraiment très petit, ce qui ne semble pas être le cas. Mais il existe deux autres voies d'approche, et elles sont statistiques. La première est baptisée la cristallographie cosmique ; elle a initialement été développée par mon équipe, puis d'autres chercheurs de par le monde y ont travaillé. Elle consiste à repérer des corrélations statistiques dans la distribution des objets célestes lointains. Si la topologie de l'Univers est multiconnexe, il doit y avoir une sorte de rythme dans la composition du ciel, des répétitions de structures analogues aux répétitions d'atomes observées dans les cristaux... sauf qu'il s'agirait d'un cristal spatio-temporel dont les unités lointaines sont des images déformées et anciennes des unités plus proches [2].

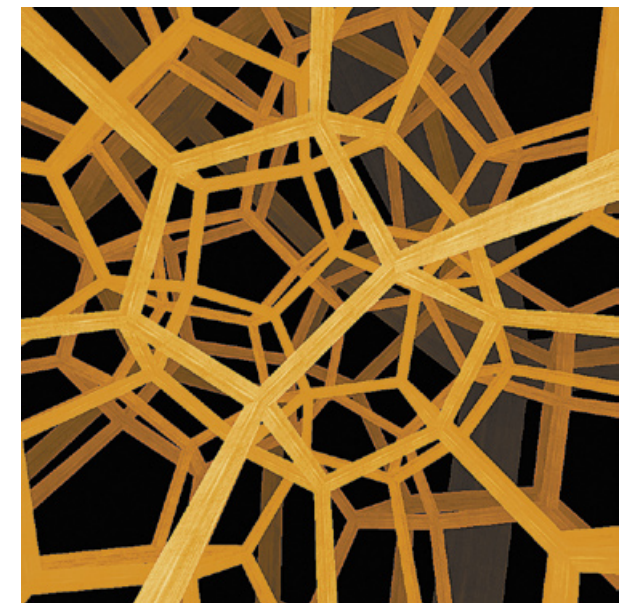
L'autre méthode a été initialement développée aux États-Unis [3]. Elle se base sur des corrélations à repérer dans le fond diffus cosmologique, autrement dit dans les cartes détaillées des fluctuations de température du rayonnement fossile. Là aussi, on devrait voir apparaître des motifs caractéristiques, sous forme de paires de cercles, liés au fait que si l'Univers réel est plus petit que l'Univers observable, il présente nécessairement des duplications d'informations. Pour cette méthode de recherche, deux satellites ont joué ou vont jouer une importance capitale : le satellite américain WMAP, qui a délivré ses premiers résultats en 2003 (lire à ce sujet l'article de Michel Cassé, p. 84) mais dont on attend de nouvelles données en fin d'année 2005 ; et le satellite européen Planck, qui sera lancé en 2007.

Quel est l'accueil réservé à l'Univers chiffonné par la communauté des astrophysiciens ? Quand vous suggérez que l'Univers réel est plus petit que l'Univers observable, il s'agit d'un renversement de perspective qui pourrait en chiffonner plus d'un !

J.-P. L. Oui, mais n'est-ce pas ainsi que doit fonctionner la science ? Certains sont enthousiastes, d'autres curieux, d'autres encore franchement critiques. En France, nous ne sommes qu'une poignée à travailler sur ce sujet, et je dois dire que nous avons beaucoup plus de succès

[2] R. Lehoucq et al., *A&A*, 363, 1, 2000.
[3] N.J. Cornish et al., *Classical and Quantum Gravity*, 15, 2657, 1998.
[4] J.-P. Luminet, *La Recherche*, p. 511, avril 1983.

Cet article est la version revue et mise à jour du texte paru dans le n° 358 de *La Recherche*.



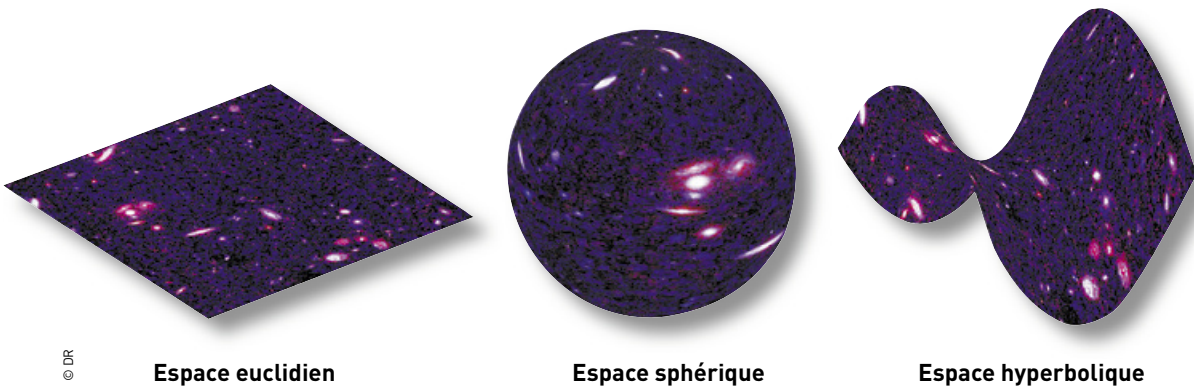
L'ESPACE DODÉCAÉDRIQUE, vu ici en trois dimensions, est celui qui s'ajuste le mieux aux récentes observations du rayonnement fossile. Il est fini mais sans bords ni limites : on peut y voyager indéfiniment. © DR

auprès des mathématiciens et des physiciens qu'auprès des cosmologistes. À l'étranger, le domaine de la topologie cosmique est très bien accepté. Nous travaillons avec des Américains et des Brésiliens, et il y a une cinquantaine de chercheurs actifs dans le monde entier. Le domaine est actuellement en pleine expansion, comme le montrent le nombre croissant d'articles publiés chaque mois et l'éclatement en plusieurs spécialités. Je ne m'inquiète donc pas trop. Il faut laisser le temps aux idées de faire leur chemin, et surtout aux moyens techniques d'apporter des réponses concrètes. Quand j'ai théorisé les « crêpes stellaires » il y a une quinzaine d'années, c'est-à-dire les déformations soudaines des étoiles sur le point d'être englouties par un trou noir, il n'existait aucun moyen de vérification expérimentale [4]. Ce n'est qu'aujourd'hui que des confirmations sont apportées par les observations. De la même façon, les mirages gravitationnels ont fait sourire au début et sont maintenant universellement acceptés. Ces mirages engendrent des illusions d'optique, des déformations du réel, provoquées par la présence d'une masse sur le trajet des rayons lumineux. Mais elles restent locales, c'est-à-dire limitées à un objet cosmique. L'Univers chiffonné, lui, est un mirage global, à l'échelle de l'Univers tout entier. C'est bien normal qu'il surprenne un peu !

Propos recueillis par Elisa Brune

POUR EN SAVOIR PLUS

- ▷ J.-P. Luminet et M. Lachièze-Rey, *De l'infini*, Dunod, 2005.
- ▷ J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, Fayard, 2001. Édition révisée, Fayard 2005 et Gallimard/Folio Essais.
- ▷ R. Lehoucq, *L'Univers a-t-il une forme ?* Flammarion, 2004.
- ▷ J.-P. Luminet, *Physics World*, 18, 22, 2005.
- ▷ www.larecherche.fr



À GAUCHE, TROIS TYPES D'ESPACES COURBES (à courbures nulle, positive et négative) sont représentés en deux dimensions. La courbure dépend de la densité moyenne de matière et d'énergie dans l'Univers. Dans le cas d'un espace euclidien chiffonné (dont deux exemples sont présentés à droite), la topologie est dite multiconnexe : une forme de base se répète.

