

Texte de la 187<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 5 juillet 2000.

## Les trous noirs et la forme de l'espace par Jean-Pierre Luminet

### INTRODUCTION

La question de la forme de l'espace me fascine depuis que, adolescent, j'ai ouvert une encyclopédie d'astronomie à la page traitant de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Il y était écrit que, dans la conception relativiste, l'espace-temps a la forme d'un mollusque. Cette image m'avait beaucoup intrigué, et depuis lors, je n'ai eu de cesse d'élucider les mystères implicitement attachés à ce « mollusque universel ». Lorsqu'ils contemplant un beau ciel nocturne, la plupart des gens n'ont d'yeux que pour le spectacle des étoiles, c'est-à-dire le *contenu* de l'univers. Or, on peut aussi s'émerveiller devant l'invisible *contenant* : l'espace n'est-il qu'un réceptacle vide et passif qui accueille les corps, ou bien peut-on lui attribuer une forme, une structure, une architecture ? Est-il plat, courbe, rugueux, lisse, cabossé, plissé, etc. ?

*L'espace a-t-il une forme ?*

Il est sans doute difficile à la plupart d'entre vous d'attribuer une forme à quelque chose d'aussi impalpable et d'abstrait que l'espace. Au cours des siècles, maintes conceptions philosophiques ont tenté de « donner chair » à l'espace en le considérant, par exemple, comme une substance éthérée qui, non seulement contient les corps matériels, mais aussi les imprègne et partage avec eux certaines de ses propriétés structurelles. Toutefois, pour le physicien, les questions sur la forme de l'espace ne sont pertinentes qu'en utilisant le langage des mathématiques, plus spécifiquement celui de la géométrie.

*Quel est l'espace géométrique qui est susceptible de représenter l'espace physique ?*

Le problème est plus compliqué qu'il ne semble à première vue. Certes, l'espace « immédiat » qui nous environne est correctement décrit par la géométrie euclidienne ordinaire. Mais l'espace microscopique (à très petite échelle) et l'espace cosmologique (à très grande échelle) en diffèrent profondément. À la question de la forme de l'espace, la physique actuelle donne donc des réponses différentes, selon quatre « niveaux » dépendant de l'échelle à laquelle on examine la structure de l'espace. Les niveaux « intermédiaires » 1 & 2 sont assez bien compris, les niveaux « extrêmes » 0 & 3 font l'objet de spéculations théoriques originales.

Niveau 1 : Géométrie (pseudo-) euclidienne

Champ d'application : mécanique classique, relativité restreinte, électrodynamique quantique

À l'échelle « locale », disons entre  $10^{-18}$  centimètre (longueur actuellement accessible à l'expérimentation) et  $10^{11}$  mètres (de l'ordre de la distance Terre - Soleil), la géométrie de l'espace physique se décrit très bien par celle de l'espace euclidien ordinaire. « Très bien » signifie que cette structure mathématique sert de cadre naturel aux théories physiques qui, comme la mécanique classique, la relativité restreinte et l'électrodynamique quantique, permettent d'expliquer correctement la quasi-totalité des phénomènes naturels. L'espace y est à trois dimensions, sans courbure. Dans la théorie relativiste, il est couplé au temps au sein

d'une géométrie pseudo-euclidienne quadridimensionnelle plate, dite « espace-temps de Minkowski ».

Niveau 2 : Géométrie différentielle en espace (pseudo-) riemannien

Champ d'application : relativité générale, cosmologie

À l'échelle astronomique (système solaire, étoiles, galaxies, univers dans son ensemble), l'interaction dominante qui « sculpte » l'espace physique est la gravité. Celle-ci est décrite par la relativité générale, qui fait apparaître une structure non-euclidienne de l'espace-temps. La géométrie différentielle des variétés riemanniennes permet précisément de décrire de tels espaces courbes. Il y a de nombreuses modélisations possibles. Par exemple, à grande échelle, la courbure est relativement « douce » et uniforme. Les cosmologistes travaillent donc dans le cadre d'espaces à courbure constante. Au voisinage d'objets très compacts, la courbure peut au contraire varier fortement d'un point à l'autre. La géométrie de Schwarzschild est un exemple de modélisation de l'espace-temps physique autour d'un trou noir sphérique.

Niveau 0 : Géométrie multidimensionnelle, géométrie non-commutative, etc.

Champ d'application : théories d'unification, supercordes, gravité quantique

La description de l'espace à l'échelle microscopique (entre  $10^{-33}$  centimètre et  $10^{-18}$  centimètre) est liée au plus grand enjeu de la physique actuelle : l'unification des interactions fondamentales. Celle-ci tente de marier deux points de vue extrêmement différents : celui de la mécanique quantique, décrivant les interactions en termes de champs, et celui de la relativité, décrivant la gravité en termes de courbure.

Aucune théorie de « gravité quantique » satisfaisante n'a vu le jour, mais plusieurs scénarios sont étudiés. Dans tous les cas, les conceptions géométriques usuelles sur l'espace et le temps sont bouleversées. Par exemple, la théorie des supercordes introduit des dimensions spatiales supplémentaires ; la géométrie non-commutative décrit un espace-temps granulaire et « flou » ; la géométrie dynamique quantique conçoit l'espace-temps comme un océan bouillonnant d'énergie, agité de « vagues » (les fluctuations quantiques du vide) et ponctué « d'écume » (les univers-bulles).

Niveau 4 : Topologie, espaces « chiffonnés »

Champ d'application : structure globale de l'Univers, topologie cosmique

La question de la forme globale de l'espace (à une échelle supérieure à  $10^{25}$  mètres) pose des problèmes géométriques spécifiques ne relevant plus seulement de la courbure, mais de la topologie de l'espace-temps. Celle-ci n'est incorporée ni dans la relativité générale, ni dans les approches unificatrices de la physique des hautes énergies. Pour reprendre l'image pittoresque du « mollusque universel », il ne s'agit plus de savoir s'il possède des bosses ou des creux, mais de savoir s'il s'agit d'un escargot, d'une limace ou d'un calmar.

Une nouvelle discipline est née il y a quelques années : la topologie cosmique, qui applique aux modèles cosmologiques relativistes les découvertes mathématiques effectuées dans le domaine de la classification topologique des espaces.

La suite de la conférence s'attachera exclusivement à la description du niveau 2 dans le contexte des trous noirs, et du niveau 4 dans le contexte des modèles d'univers chiffonnés.

## **LES TROUS NOIRS**

Un vieux conte persan dit :

« Un jour, les papillons tiennent une vaste assemblée parce qu'ils sont tourmentés par le mystère de la flamme. Chacun propose son idée sur la question. Le vieux sage qui préside l'assemblée dit qu'il n'a rien entendu de satisfaisant, et que le mieux à faire est d'aller voir de près ce qu'est la flamme.

Un premier papillon volontaire s'envole au château voisin et aperçoit la flamme d'une bougie derrière une fenêtre. Il revient très excité et raconte ce qu'il a vu. Le sage dit qu'il ne leur apprend pas grand chose.

Un deuxième papillon franchit la fenêtre et touche la flamme, se brûlant l'extrémité des ailes. Il revient et raconte son aventure. Le sage dit qu'il ne leur apprend rien de plus.

Un troisième papillon va au château et se consume dans la flamme. Le sage, qui a vu la scène de loin, dit que seul le papillon mort connaît le secret de la flamme, et qu'il n'y a rien d'autre à dire. »

Cette parabole préfigure le mystère des trous noirs. Ces objets célestes capturent la matière et la lumière sans espoir de retour : si un astronaute hardi s'aventurait dans un trou noir, il ne pourrait jamais en ressortir pour relater ses découvertes.

#### *Les trous noirs sont des astres invisibles*

Le concept d'astre invisible a été imaginé par deux astronomes de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, John Michell (1783) et Pierre de Laplace (1796). Dans le cadre de la théorie de l'attraction universelle élaborée par Newton, ils s'étaient interrogés sur la possibilité qu'il puisse exister dans l'univers des astres si massifs que la vitesse de libération à leur surface puisse dépasser la vitesse de la lumière. La vitesse de libération est la vitesse minimale avec laquelle il faut lancer un objet pour qu'il puisse échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle d'un astre. Si elle dépasse la vitesse de la lumière, l'astre est nécessairement invisible, puisque même les rayons lumineux resteraient prisonniers de son champ de gravité.

Michell et Laplace avaient donc décrit le prototype de ce qu'on appellera beaucoup plus tard (en 1968) un « trou noir », dans le cadre d'une autre théorie de la gravitation (la relativité générale). Ils avaient cependant calculé les bons « ordres de grandeur » caractérisant l'état de trou noir. Un astre ayant la densité moyenne de l'eau ( $1\text{g/cm}^3$ ) et une masse de dix millions de fois celle du Soleil serait invisible. Un tel corps est aujourd'hui nommé « trou noir supermassif ». Les astronomes soupçonnent leur existence au centre de pratiquement toutes les galaxies (bien qu'ils ne soient pas constitués d'eau !). Plus communs encore seraient les « trous noirs stellaires », dont la masse est de l'ordre de quelques masses solaires et le rayon critique (dit rayon de Schwarzschild) d'une dizaine de kilomètres seulement. Pour transformer le Soleil en trou noir, il faudrait le réduire à une boule de 3 kilomètres de rayon ; quant à la Terre, il faudrait la compacter en une bille de 1 cm !

#### *Les trous noirs sont des objets relativistes*

La théorie des trous noirs ne s'est véritablement développée qu'au XX<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la relativité générale. Selon la conception einsteinienne, l'espace, le temps et la matière sont couplés en une structure géométrique non-euclidienne compliquée. En termes simples, la matière-énergie confère, localement du moins, une forme à l'espace-temps. Ce dernier peut être vu comme une nouvelle entité qui est à la fois « élastique », en ce sens que les corps massifs engendrent localement de la courbure, et « dynamique », c'est-à-dire que cette structure évolue au cours du temps, au gré des mouvements des corps massifs. Par exemple, tout corps massif engendre autour de lui, dans le tissu élastique de l'espace-temps,

une courbure ; si le corps se déplace, la courbure se déplace avec lui et fait vibrer l'espace-temps sous formes d'ondulations appelées ondes gravitationnelles.

La courbure de l'espace-temps peut se visualiser par les trajectoires des rayons lumineux et des particules « libres ». Celles-ci épousent naturellement la forme incurvée de l'espace. Par exemple, si les planètes tournent autour du Soleil, ce n'est pas parce qu'elles sont soumises à une force d'attraction universelle, comme le voulait la physique newtonienne, mais parce qu'elles suivent la « pente naturelle » de l'espace-temps qui est courbé au voisinage du Soleil. En relativité, la gravité n'est pas une force, c'est une manifestation de la courbure de l'espace-temps. C'est donc elle qui sculpte la *forme locale* de l'univers.

Les équations d'Einstein indiquent comment le degré de courbure de l'espace-temps dépend de la concentration de matière (au sens large du terme, c'est-à-dire incluant toutes les formes d'énergie). Les trous noirs sont la conséquence logique de ce couplage entre matière et géométrie. Le trou noir rassemble tellement d'énergie dans une région confinée de l'univers qu'il creuse un véritable « puits » dans le tissu élastique de l'espace-temps. Toute particule, tout rayon lumineux pénétrant dans une zone critique définie par le bord (immatériel) du puits, sont irrémédiablement capturés.

### *Comment les trous noirs peuvent-ils se former ?*

Les modèles d'évolution stellaire, développés tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, conduisent à un schéma général de l'évolution des étoiles en fonction de leur masse. Le destin final d'une étoile est toujours l'effondrement gravitationnel de son cœur (conduisant à un « cadavre stellaire »), accompagné de l'expulsion de ses couches externes. Il y a trois types de cadavres stellaires possibles :

- La plupart des étoiles (90 %) finissent en « naines blanches », des corps de la taille de la Terre mais un million de fois plus denses, constituées essentiellement de carbone dégénéré. Ce sera le cas du Soleil.

- Les étoiles dix fois plus massives que le Soleil (9,9 %) explosent en supernova. Leur cœur se contracte en une boule de 15 km de rayon, une « étoile à neutrons » à la densité fabuleuse. Elles sont détectables sous la forme de pulsars, objets fortement magnétisés et en rotation rapide dont la luminosité radio varie périodiquement.

- Enfin, si l'étoile est initialement 30 fois plus massive que le Soleil, son noyau est condamné à s'effondrer sans limite pour former un trou noir. On sait en effet qu'une étoile à neutrons ne peut pas dépasser une masse critique d'environ 3 masses solaires. Les étoiles très massives sont extrêmement rares : une sur mille en moyenne. Comme notre galaxie abrite environ cent milliards d'étoiles, on peut s'attendre à ce qu'elle forme une dizaine de millions de trous noirs stellaires.

Quant aux trous noirs supermassifs, ils peuvent résulter, soit de l'effondrement gravitationnel d'un amas d'étoiles tout entier, soit de la croissance d'un trou noir « germe » de masse initialement modeste.

### *Comment détecter les trous noirs ?*

Certains trous noirs peuvent être détectés indirectement s'ils ne sont pas isolés, et s'ils absorbent de la matière en quantité suffisante. Par exemple, un trou noir faisant partie d'un couple stellaire aspire l'enveloppe gazeuse de son étoile compagne. Avant de disparaître, le gaz est chauffé violemment, et il émet une luminosité caractéristique dans la gamme des rayonnements à haute énergie. Des télescopes à rayons X embarqués sur satellite recherchent de tels trous noirs stellaires dans les systèmes d'étoiles doubles à luminosité X fortement variable. Il existe dans notre seule galaxie une douzaine de tels « candidats » trous noirs.

L'observation astronomique nous indique aussi que les trous noirs supermassifs existent vraisemblablement au centre de nombreuses galaxies - dont la nôtre. Le modèle du « trou noir galactique » explique en particulier la luminosité extraordinaire qui est libérée par les galaxies dites « à noyau actif », dont les plus spectaculaires sont les quasars, objets intrinsèquement si lumineux qu'ils permettent de sonder les confins de l'espace.

En 1979, mon premier travail de recherche a consisté à reconstituer numériquement l'apparence d'un trou noir entouré d'un disque de gaz chaud. Les distorsions de l'espace-temps au voisinage du trou noir sont si grandes que les rayons lumineux épousent des trajectoires fortement incurvées permettant, par exemple, d'observer simultanément le dessus et le dessous du disque. J'ai ensuite étudié la façon dont une étoile qui frôle un trou noir géant est brisée par les forces de marée. L'étirement de l'espace est tel que, en quelques secondes, l'étoile est violemment aplatie sous la forme d'une « crêpe flambée ». Les débris de l'étoile peuvent ensuite alimenter une structure gazeuse autour du trou noir et libérer de l'énergie sur le long terme. Ce phénomène de crêpe stellaire, mis en évidence par les calculs numériques, n'a pas encore été observé, mais il fournit une explication plausible au mode d'alimentation des galaxies à noyau actif.

### *La physique externe des trous noirs*

La théorie des trous noirs s'est essentiellement développée dans les années 1960-70. Le trou noir, comme tous les objets, tourne sur lui-même. On peut l'envisager comme un « maelström cosmique » qui entraîne l'espace-temps dans sa rotation. Comme dans un tourbillon marin, si un vaisseau spatial s'approche trop près, il commence par être irrésistiblement entraîné dans le sens de rotation et, s'il franchit une zone critique de non-retour, il tombe inéluctablement au fond du vortex.

Le temps est également distordu dans les parages du trou noir. Le temps « apparent », mesuré par toute horloge extérieure, se ralentit indéfiniment, tandis que le temps « propre », mesuré par une horloge en chute libre, n'égrène que quelques secondes avant d'être anéantie au fond du trou. Si un astronaute était filmé dans sa chute vers un trou noir, personne ne le verrait jamais atteindre la surface ; les images se figeraient à jamais à l'instant où l'astronaute semblerait atteindre la frontière du trou noir. Or, selon sa propre montre, l'astronaute serait bel et bien avalé par le trou en quelques instants.

Le théorème capital sur la physique des trous noirs se formule de façon pittoresque : « un trou noir n'a pas de poils. » Il signifie que, lorsque de la matière-énergie disparaît à l'intérieur d'un trou noir, toutes les propriétés de la matière telles que couleur, forme, constitution, etc., s'évanouissent, seules subsistent trois caractéristiques : la masse, le moment angulaire et la charge électrique. Le trou noir à l'équilibre est donc l'objet le plus « simple » de toute la physique, car il est entièrement déterminé par la donnée de ces trois paramètres. Du coup, toutes les solutions exactes de la théorie de la relativité générale décrivant la structure de l'espace-temps engendré par un trou noir sont connues et étudiées intensivement.

Par sa nature même, un trou noir est inéluctablement voué à grandir. Cependant, la théorie a connu un rebondissement intéressant au début des années 1980, lorsque Stephen Hawking a découvert que les trous noirs « microscopiques » (hypothétiquement formés lors du big-bang) se comporteraient à l'inverse des gros trous noirs. Régis par la physique quantique et non plus seulement par la physique gravitationnelle, ces micro-trous noirs ayant la taille d'une particule élémentaire mais la masse d'une montagne s'évaporerait car ils seraient fondamentalement instables. Ce phénomène « d'évaporation quantique » suscite encore beaucoup d'interrogations. Aucun micro-trou noir n'a été détecté, mais leur étude théorique permet de tisser des liens entre la gravité et la physique quantique. Des modèles récents suggèrent que le résultat de l'évaporation d'un trou noir ne serait pas une singularité

ponctuelle « nue », mais une corde – objet théorique déjà invoqué par des théories d'unification des interactions fondamentales.

### *L'intérieur des trous noirs*

Le puits creusé par le trou noir dans le tissu élastique de l'espace-temps est-il « pincé » par un nœud de courbure infinie – auquel cas toute la matière qui tomberait dans le trou noir se tasserait indéfiniment dans une *singularité* ? Ou bien le fond du trou noir est-il « ouvert » vers d'autres régions de l'espace-temps par des sortes de tunnels ? Cette deuxième possibilité, apparemment extravagante, est suggérée par certaines solutions mathématiques de la relativité. Un *trou de ver* serait une structure topologique exotique ressemblant à une « poignée d'espace-temps » qui relierait deux régions de l'univers, dont l'une serait un trou noir et l'autre un « trou blanc ». Ces raccourcis d'espace-temps, qui permettraient de parcourir en quelques fractions de seconde des millions d'années lumière sans jamais dépasser la vitesse de la lumière, ont fasciné les physiciens tout autant que les écrivains de science-fiction. Des études plus détaillées montrent que de tels trous de ver ne peuvent pas se former dans l'effondrement gravitationnel d'une étoile : aussitôt constitués, ils seraient détruits et bouchés avant qu'aucune particule n'ait le temps de les traverser. Des modèles suggèrent que les trous de ver pourraient cependant exister à l'échelle microscopique. En fait, la structure la plus intime de l'espace-temps pourrait être constituée d'une mousse perpétuellement changeante de micro-trous noirs, micro-trous blancs et mini-trous de ver, traversés de façon fugace par des particules élémentaires pouvant éventuellement remonter le cours du temps !

### **La forme globale de l'univers**

À l'échelle de la cosmologie, le « tissu élastique » de l'espace-temps doit être conçu comme chargé d'un grand nombre de billes - étoiles, galaxies, amas de galaxies - réparties de façon plus ou moins homogène et uniforme. La courbure engendrée par la distribution des corps est donc elle-même uniforme, c'est-à-dire constante dans l'espace. En outre, la distribution et le mouvement de la matière universelle confèrent à l'espace-temps une *dynamique* globale : l'univers est en expansion ou en contraction.

La cosmologie relativiste consiste à rechercher des solutions exactes de la relativité susceptibles de décrire la structure et l'évolution de l'univers à grande échelle. Les modèles à courbure spatiale constante ont été découverts par Alexandre Friedmann et Georges Lemaître dans les années 1920. Ces modèles se distinguent par leur courbure spatiale et par leur dynamique.

Dans la version la plus simple :

- *Espace de courbure positive (type sphérique)*

L'espace, de volume fini (bien que dans frontières), se dilate initialement à partir d'une singularité (le fameux « big-bang »), atteint un rayon maximal, puis se contracte pour s'achever dans un « big-crunch ». La durée de vie typique d'un tel modèle d'univers est une centaine de milliards d'années.

- *Espace de courbure nulle (type euclidien) ou négative (type hyperbolique)*

Dans les deux cas, l'expansion de l'univers se poursuit à jamais à partir d'un big-bang initial, le taux d'expansion se ralentissant toutefois au cours du temps.

La dynamique ci-dessus est complètement modifiée si un terme appelé « constante cosmologique » est ajouté aux équations relativistes. Ce terme a pour effet d'accélérer le taux d'expansion, de sorte que même un espace de type sphérique peut être « ouvert » (c'est-à-dire en expansion perpétuelle) s'il possède une constante cosmologique suffisamment grande. Des

observations récentes suggèrent que l'espace cosmique est proche d'être euclidien (de sorte que l'alternative sphérique / hyperbolique n'est nullement tranchée !), mais qu'il est en expansion accélérée, ce qui tend à réhabiliter la constante cosmologique (sous une forme associée à l'énergie du vide).

Je ne développerai pas davantage la question, car elle figure au programme de la 186<sup>e</sup> conférence de l'Utlis donnée par Marc Lachièze-Rey.

### *Quelle est la différence entre courbure et topologie ?*

Avec la cosmologie relativiste, disposons-nous d'une description de la forme de l'espace à grande échelle ? On pourrait le croire à première vue, mais il n'en est rien. Même la question de la finitude ou de l'infinitude de l'espace (plus grossière que celle concernant sa forme) n'est pas clairement tranchée. En effet, si la géométrie sphérique n'implique que des espaces de volume fini (comme l'hypersphère), les géométries euclidienne et hyperbolique sont compatibles tout autant avec des espaces finis qu'avec des espaces infinis. Seule la topologie, cette branche de la géométrie qui traite de certaines formes invariantes des espaces, donne des informations supplémentaires sur la structure globale de l'espace - informations que la courbure (donc la relativité générale) ne saurait à elle seule fournir.

Pour s'assurer qu'un espace est *localement* euclidien (de courbure nulle), il suffit de vérifier que la somme des angles d'un triangle quelconque fait bien  $180^\circ$  - ou, ce qui revient au même, de vérifier le théorème de Pythagore. Si cette somme est supérieure à  $180^\circ$ , l'espace est localement sphérique (courbé positivement), et si cette somme est inférieure à  $180^\circ$ , l'espace est localement hyperbolique (courbé négativement).

Cependant, un espace euclidien n'est pas nécessairement aussi simple que ce que l'on pourrait croire. Par exemple, une surface euclidienne (à deux dimensions, donc) n'est pas nécessairement le plan. Il suffit de découper une bande dans le plan et d'en coller les extrémités pour obtenir un cylindre. Or, à la surface du cylindre, le théorème de Pythagore est tout autant vérifié que dans le plan d'origine. Le cylindre est donc une surface euclidienne de courbure strictement nulle, même si sa représentation dans l'espace (fictif) de visualisation présente une courbure « extrinsèque ». Bien qu'euclidien, le cylindre présente une différence fondamentale d'avec le plan : il est fini dans une direction. C'est ce type de propriété qui relève de la topologie, et non pas de la courbure. En découplant le plan et en le recollant selon certains points, nous n'avons pas changé sa forme locale (sa courbure) mais nous avons changé radicalement sa forme globale (sa topologie). Nous pouvons aller plus loin en découplant le cylindre en un tube de longueur finie, et en collant les deux extrémités circulaires. Nous obtenons un *tore plat*, c'est-à-dire une surface euclidienne sans courbure, mais fermée dans toutes les directions (de superficie finie). Une bactérie vivant à la surface d'un tore plat ne ferait pas la différence avec le plan ordinaire, à moins de se déplacer et de faire un tour complet du tore. À trois dimensions, il est possible de se livrer à ce même genre d'opérations. En partant d'un cube de l'espace euclidien ordinaire, et en identifiant deux à deux ses faces opposées, on crée un « hypertore », espace localement euclidien de volume fini.

### *Les espaces chiffonnés*

Du point de vue topologique, le plan et l'espace euclidien ordinaire sont monoconnexes, le cylindre, le tore et l'hypertore sont multiconnexes. Dans un espace monoconnexe, deux points quelconques sont joints par une seule géodésique (l'équivalent d'une droite en espace courbe), tandis que dans un espace multiconnexe, une infinité de géodésiques joignent deux points. Cette propriété confère aux espaces multiconnexes un

intérêt exceptionnel en cosmologie. En effet, les rayons lumineux suivent les géodésiques de l'espace-temps. Lorsqu'on observe une galaxie lointaine, nous avons coutume de croire que nous la voyons en un unique exemplaire, dans une direction donnée et à une distance donnée. Or, si l'espace cosmique est multiconnexe, il y a démultiplication des trajets des rayons lumineux, donnant des images multiples de la galaxie observée. Comme toute notre perception de l'espace provient de l'analyse des trajectoires des rayons lumineux, si nous vivions dans un espace multiconnexe nous serions plongés dans une vaste illusion d'optique nous faisant paraître l'univers plus vaste que ce qu'il n'est; des galaxies lointaines que nous croirions « originales » seraient en réalité des images multiples d'une seule galaxie, plus proche dans l'espace et dans le temps.

*Figure : Un univers très simple à deux dimensions illustre comment un observateur situé dans la galaxie A (sombre) peut voir des images multiples de la galaxie B (claire). Ce modèle d'univers, appelé tore, est construit à partir d'un carré dont on a « recollé » les bords opposés : tout ce qui sort d'un côté réapparaît immédiatement sur le côté opposé, au point correspondant. La lumière de la galaxie B peut atteindre la galaxie A selon plusieurs trajets, de sorte que l'observateur dans la galaxie A voit les images de la galaxie B lui parvenir de plusieurs directions. Bien que l'espace du tore soit fini, un être qui y vit a l'illusion de voir un espace, sinon infini (en pratique, des horizons limitent la vue), du moins plus grand que ce qu'il n'est en réalité. Cet espace fictif a l'aspect d'un réseau construit à partir d'une cellule fondamentale, qui répète indéfiniment chacun des objets de la cellule.*

Les modèles d'*univers chiffonné* permettent de construire des solutions cosmologiques qui, quelle que soit leur courbure, peuvent être finies ou infinies, et décrites par des formes (topologies) d'une grande subtilité. Ces modèles peuvent parfaitement être utilisés pour décrire la forme de l'espace à très grande échelle. Un espace chiffonné est un espace multiconnexe de volume fini, de taille est plus petite que l'univers observé (dont le rayon apparent est d'environ 15 milliards d'années-lumière).

Les espaces chiffonnés créent un *mirage topologique* qui démultiplie les images des sources lumineuses. Certains mirages cosmologiques sont déjà bien connus des astronomes sous le nom de *mirages gravitationnels*. Dans ce cas, la courbure de l'espace au voisinage d'un corps massif situé sur la ligne de visée d'un objet plus lointain, démultiplie les trajets des rayons lumineux provenant de l'arrière-plan. Nous percevons donc des images fantômes regroupées dans la direction du corps intermédiaire appelé « lentille ». Ce type de mirage est dû à la courbure *locale* de l'espace autour de la lentille.

Dans le cas du mirage topologique, ce n'est pas un corps particulier qui déforme l'espace, c'est l'espace lui-même qui joue le rôle de la lentille. En conséquence, les images fantômes sont réparties dans toutes les directions de l'espace et toutes les tranches du passé. Ce mirage *global* nous permettrait de voir les objets non seulement sous toutes leurs orientations possibles, mais également à toutes les phases de leur évolution.

### *Tests observationnels de l'univers chiffonnés*

Si l'espace est chiffonné, il l'est de façon subtile et à très grande échelle, sinon nous aurions déjà identifié des images fantômes de notre propre galaxie ou d'autres structures bien connues. Or, ce n'est pas le cas. Comment détecter la topologie de l'univers? Deux méthodes d'analyse statistique ont été développées récemment. L'une, la cristallographie cosmique, tente de repérer certaines répétitions dans la distribution des objets lointains. L'autre étudie la distribution des fluctuations de température du rayonnement fossile. Ce vestige refroidi du big-bang permettrait, si l'espace est chiffonné, de mettre en évidence des corrélations



particulières prenant l'aspect de paires de cercles le long desquels les variations de température cosmique d'un point à l'autre seraient les mêmes.

Les projets expérimentaux de cristallographie cosmique et de détection de paires de cercles corrélés sont en cours. Pour l'instant, la profondeur et la résolution des observations ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions sur la topologie globale de l'espace. Mais les prochaines années ouvrent des perspectives fascinantes ; elles livreront à la fois des sondages profonds recensant un très grand nombre d'amas lointains de galaxies et de quasars, et des mesures à haute résolution angulaire du rayonnement fossile. Nous saurons peut-être alors attribuer une forme à l'espace.

### **Bibliographie**

Jean-Pierre Luminet, *Les trous noirs*, Le Seuil / Points Sciences, 1992.

Jean-Pierre Luminet, *L'univers chiffonné*, Fayard, 2001.