



# COSMOLOGIE QUANTIQUE

**La recherche d'une théorie quantique de la gravitation est un des enjeux majeurs de la physique depuis près d'un siècle. L'approche des « boucles » a connu des développements considérables ces dernières années. Appliquée à la cosmologie, elle transforme radicalement notre vision de l'Univers primordial et remplace le Big Bang par un grand rebond (Big Bounce) avant lequel aurait existé un autre Univers.**

**P**rendre l'Univers pour objet n'est pas une démarche anodine. Tenter de décrire, dans les termes usuels de la physique, le « système Univers » en tant que tel est tout sauf simple. Penser le Cosmos, non plus seulement comme contenant, comme substrat des processus ou lieu phénomène, mais comme objet pouvant être lui-même analysé exige de grandes précautions. Les spécificités de la cosmologie sont nombreuses et profondes (voir schéma p. 17).

Pour toutes ces raisons, et beaucoup d'autres plus pragmatiques, la cosmologie est longtemps restée hors du champ de la science orthodoxe. La situation a drastiquement changé dans les dernières décennies. Les observations nombreuses et précises qui ont été menées permettent d'étayer le modèle du Big Bang inflationnaire: l'Univers semble être en expansion depuis 13,7 milliards d'années, d'abord exponentiellement, puis de façon plus lente, jusqu'à une nouvelle phase contemporaine d'accélération. De nombreuses indications confortent ce scénario dont chacune des hypothèses est corroborée par plusieurs observations indépendantes les unes des autres. Aux trois piliers

historiques du Big Bang (récession des galaxies, nucléosynthèse primordiale, fond diffus cosmologique) sont venus s'ajouter beaucoup d'autres éléments convaincants: étude des fluctuations dans la distribution des galaxies, utilisation des supernovae lointaines, effet de lentille gravitationnelle, etc. Le paradigme dominant est aujourd'hui une construction fiable et abondamment testée, qui n'a rien à envier à la physique des particules élémentaires ou à la physique de l'état solide: notre Univers est relativement bien connu et compris. Sa dynamique est correctement décrite par la relativité générale et l'édifice est supporté par de très nombreuses expériences.

#### ■ Les difficultés du modèle standard

Mais, en contrepoint de ces succès, le modèle cosmologique doit aussi faire face à un certain nombre de paradoxes. Le plus discuté à l'heure actuelle est sans aucun doute le mystère de « l'énergie noire », c'est-à-dire l'accélération de l'expansion cosmologique. Si, en effet, l'expansion de l'Univers est connue depuis maintenant un siècle et est bien comprise dans le cadre de la théorie d'Einstein, le fait que celle-ci soit de plus en plus

rapide est difficile à expliquer par une force gravitationnelle purement attractive et devant donc jouer le rôle d'un « freinage ». Pourtant, du point de vue des équations fondamentales de la gravitation – celles d'Einstein qui lient le contenu à la géométrie – la présence d'une constante cosmologique, en mesure de rendre compte de cette accélération, est tout à fait naturelle. Mais d'autres solutions, plus exotiques, sont également envisagées. La seconde difficulté majeure du paradigme cosmologique est l'énigme de la « matière noire ». On sait, là encore suivant plusieurs approches indépendantes, que l'essentiel de la masse de l'Univers n'est pas visible. Et, pire encore, on sait que cette matière n'est pas « baryonique », c'est-à-dire qu'elle n'est même pas composée des particules identifiées au sein du modèle standard de la physique des hautes énergies ! Il s'agit donc d'une question tout à la fois centrale pour la physique des constituants élémentaires et pour la cosmologie : très vraisemblablement, sa résolution fera appel à une « nouvelle physique ».

Mais la plus grande difficulté, qui semble avoir été quelque peu oubliée ces derniers temps suite aux succès heuristiques du modèle du Big Bang, est sans doute... le Big Bang lui-même ! En effet, l'extrapolation du modèle vers des temps de plus en plus reculés mène, inéluctablement, à une singularité, c'est-à-dire à l'apparition d'infinis dans les équations. Cette singularité est très certainement moins un problème, ou une pathologie, de l'espace-temps lui-même que de la théorie qui le décrit. On trouve également de telles singularités au cœur des trous noirs. Leur apparition n'est pas fondamentalement étonnante dans la mesure où elles correspondent à une prédiction (parfois inévitable) de la relativité

### L'expérience

L'expérience dont il est question est unique et irréproducible : il faut se contenter d'un seul Univers. Ce qui rend difficile le processus usuel d'inférence de lois à partir de l'observation de régularités.

### Les énergies

Les énergies en jeu sont, au moins quand on s'intéresse aux premiers instants de l'Univers, plus grandes que ce qui a été jusqu'alors – et sans doute que ce qui sera jamais – testé sur Terre. Il faut extrapoler.

## Les spécificités de la cosmologie sont nombreuses et profondes

### L'observateur

L'observateur est une partie – certes assez dérisoire – du système qu'il entend décrire. Usuellement, la méthode scientifique tente au contraire de séparer l'observé et l'observateur.

### Conditions initiales

Enfin, comme il n'y a ni extériorité ni antériorité à l'Univers dans son ensemble, il est nécessaire d'accorder une importance particulière aux « conditions initiales ». Comment, pourquoi, par qui, sont-elles fixées ?

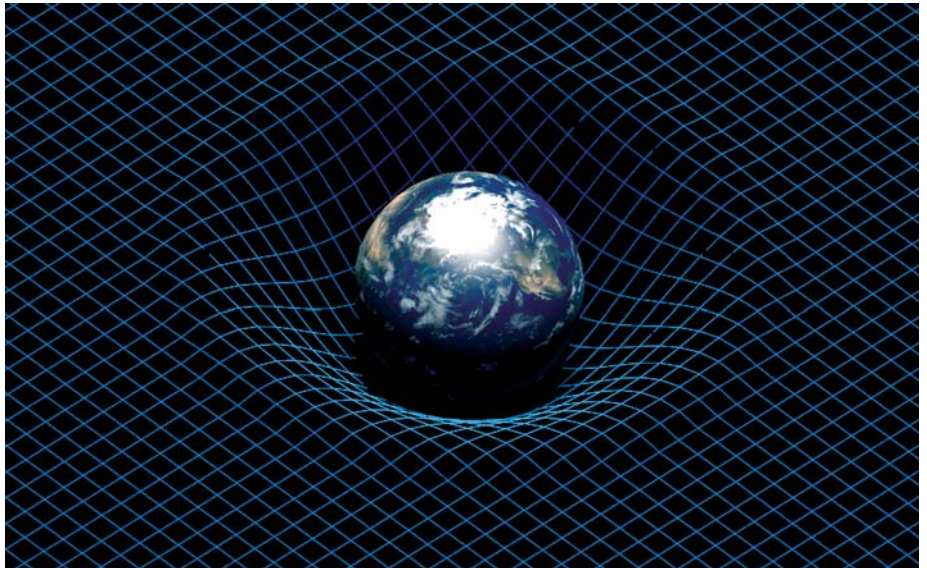
### Le raisonnement

Le raisonnement se fait « contre le sens du temps ». C'est l'état final (c'est-à-dire actuel) qui est connu et c'est à partir de celui-ci que l'état initial (le Big Bang) doit être imaginé.

générale dans un régime où, précisément, elle cesse d'être valide! La relativité générale est une théorie classique. Elle fonctionne remarquablement bien aux grandes échelles en montrant que la géométrie de l'espace-temps est dynamique et liée au contenu matériel. Elle a révolutionné notre manière de penser le monde en imposant une vue purement « relationnelle ». Mais, lorsque l'on s'approche des densités considérables de l'Univers primordial, elle n'est plus une théorie cohérente. La nécessité d'élaborer une théorie quantique de la gravitation n'est donc pas primitivement liée au problème de l'unification de toutes les interactions mais à celui de la cohérence interne de notre théorie de l'espace-temps. C'est le point nodal pour résoudre la singularité primitive.

## QU'EST-CE QUE LA GRAVITATION QUANTIQUE A BOUCLES?

Plusieurs façons d'éviter la singularité primitive ont été explorées. Par exemple, on peut imaginer qu'il existe de la matière « exotique », pour laquelle la gravité deviendrait une force répulsive. Les équations de la relativité générale pourraient alors ne plus conduire à une singularité primordiale. Il y a deux problèmes avec cette approche : d'une part, la matière en question doit présenter certaines propriétés étranges, en particulier une valeur négative de l'énergie cinétique, et, d'autre part, si les singularités disparaissent peut-être dans le passé, elles peuvent réapparaître dans le futur (Grande Déchirure,



1. Déformation de la géométrie par la présence d'un corps, tel que la théorie de la relativité générale le prévoit. (© Mourad Cherfi)

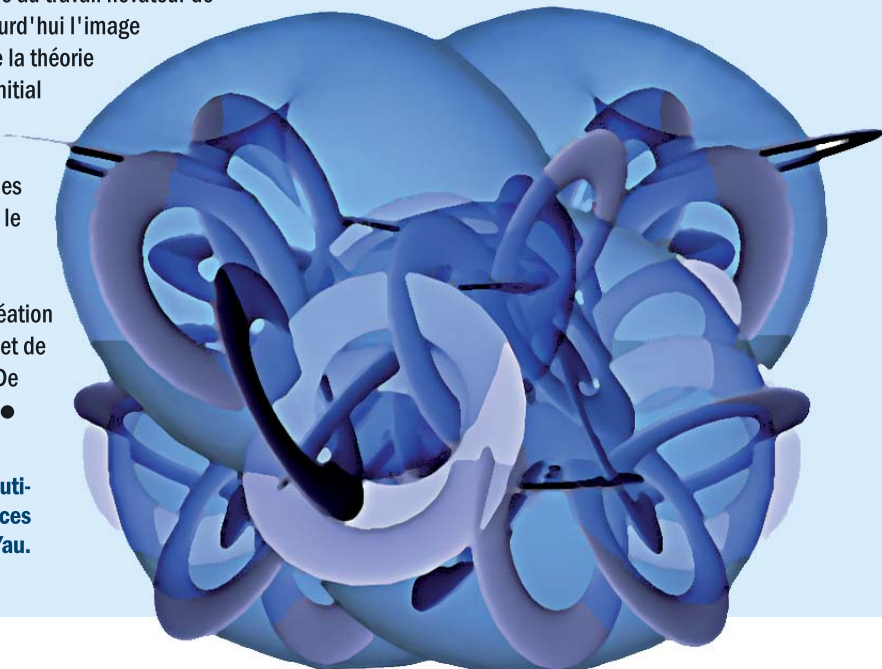
Singularité soudaine, Grand Gel... il y a toute une zoologie de singularités possibles)! Le problème du Big Bang a également été abordé dans le cadre de la théorie des cordes (encadré 1) au sens large dans le scénario dit « ekpyrotique ». Le Big Bang y est décrit comme la collision de deux univers dans un espace avec plus de 4 dimensions, par exemple via le modèle de condensation tachyonique où des particules effondrées « courent » plus vite que la vitesse de la lumière, ou, plus généralement, par des approches où le champ « dilatonique » de la théorie des cordes permet de générer l'inflation.

Toutes ces approches ont en commun la nécessité de postuler quelque chose de radicalement différent de la physique que nous connaissons (matière étrange, dimensions supplémentaires, etc.). De plus, elles demeurent construites sur un espace-temps essentiellement classique. Pourtant, nous l'avons dit, les régimes auxquels les singularités apparaissent sont ceux pour lesquels il faut tenir compte simultanément de la mécanique quantique (encadré 2) et la relativité générale. Ce sont les propriétés quantiques de l'espace-temps qui, vraisemblablement, jouent un rôle majeur pour comprendre le Big Bang ou ce

## 1. LA COSMOLOGIE DES CORDES

La naissance de la cosmologie des cordes peut être attribuée au travail novateur de Veneziano, remontant à une vingtaine d'années environ. Aujourd'hui l'image est celle d'un scénario où, à cause des relations de dualité de la théorie des cordes, l'Univers commence à inflater à partir d'un état initial caractérisé par une très faible courbure et de très faibles interactions. Cet état étant instable, il évolue vers de plus grandes courbures et de plus forts couplages jusqu'à ce que les effets « de cordes » conduisent à un rebond. Dans ce modèle, le rebond est différent de ce dont il est question en cosmologie quantique à boucles. En théorie des cordes, le mécanisme de rebondissement et de chauffage trouve son origine dans la création quantique de particules au sein du régime de haute courbure et de grand couplage se trouvant en amont du Big Bang standard. De plus, il y a génération de membranes multi-dimensionnelles. ●

Exemple d'espace multi-dimensionnel : les 6 espaces de Calabi-Yau.

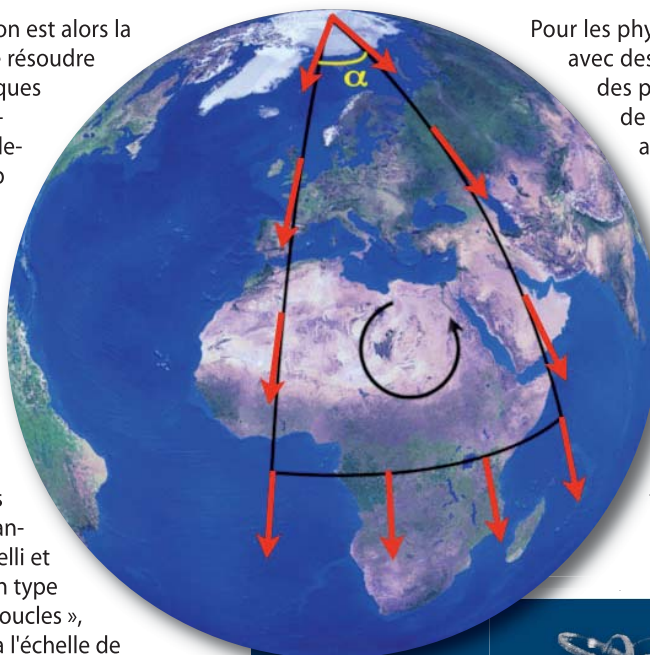


qui en tient lieu. La question est alors la suivante : est-il possible de résoudre les singularités cosmologiques en tenant compte, uniquement, de la nature probablement quantique du champ gravitationnel ?

### ■ Des « boucles » apportent une réponse aux singularités cosmiques

La réponse semble positive si l'on suit la voie de la gravité quantique à boucles. Cette théorie est un des principaux modèles candidats à la « gravité quantique ». En 1988, Carlo Rovelli et Lee Smolin ont introduit un type de quantification, dit « à boucles », qui régit les phénomènes à l'échelle de Planck (donc à des distances minuscules de l'ordre de  $10^{-35}$  m) tandis qu'à plus grande échelle la théorie se réduit à la physique habituelle, c'est-à-dire à la relativité générale. Ce modèle décrit en détail les propriétés quantiques de l'espace-temps. Il permet donc très naturellement de jeter une toute nouvelle lumière sur le Big Bang.

Que sont donc ces « boucles » qui donnent leur nom à la théorie ? Ce sont des « chemins fermés » qui permettent de mesurer le champ gravitationnel. L'une des grandes intuitions d'Einstein est l'équivalence entre la présence d'un champ gravitationnel et la forme de l'espace-temps (figure 1). C'est le cœur de la relativité générale. Comment mesurer la courbure de l'espace ? Et, en particulier, comment le faire sans s'extraire de cet espace ? Par exemple, si nous nous trouvons sur une sphère, comme la Terre, comment pouvons-nous mesurer la courbure de cette surface ? Une possibilité consiste à considérer un vecteur (une « petite flèche ») et à le déplacer suivant un « transport parallèle » (c'est-à-dire en gardant la même direction) le long d'une courbe fermée. Si l'espace est plat, c'est-à-dire s'il n'y a pas de courbure, lorsque le « transporteur » retourne à son point de départ, le vecteur sera identique à ce qu'il était initialement. Mais s'il y a une courbure, il en résultera une différence entre la direction du vecteur au départ et celle à l'arrivée du transporteur ! Si on part du pôle Nord avec un vecteur pointant vers Paris, qu'on va jusqu'à l'équateur, qu'on se déplace le long de celui-ci (toujours « parallèlement ») et qu'on remonte vers le pôle, le vecteur ne pointe plus vers Paris mais dans une autre direction (figure 2) ! Cette différence (l'angle entre le départ et l'arrivée, bien que ces deux points soient les mêmes) est liée à la valeur de la courbure. Pour que cette démarche fonctionne et permette de mesurer la courbure en comparant les deux directions, il est important que le transporteur retourne au point de départ : d'où l'image de la boucle.



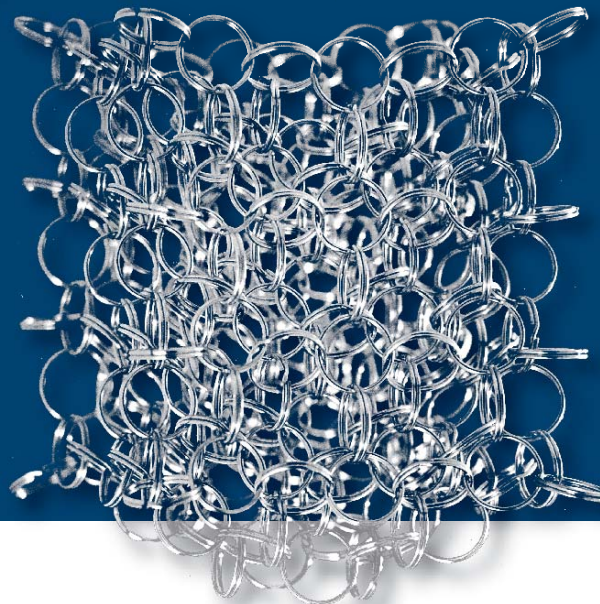
Pour les physiciens, l'idée de mesurer quelque chose avec des boucles n'est pas nouvelle : en physique des particules la technique est appelée « boucle de Wilson ». En gravitation, comme pour les autres forces fondamentales (force électromagnétique, force faible qui régit la désintégration radioactive et force forte qui régit la physique des noyaux atomiques), on peut mesurer le champ de force en se déplaçant le long d'une boucle.

Dans une certaine mesure, on peut considérer que les boucles de gravitation ne sont pas dans l'espace mais constituent l'espace lui-même (figure 3) ! Le monde réinterprété comme une collection de boucles sur lesquelles nous vivons...

**2. Illustration du transport parallèle en présence de courbure. Bien que le vecteur rouge soit toujours transporté parallèlement à lui-même, il a tourné d'un angle quand on revient au point de départ. Cet angle de rotation dépend directement de la courbure.**

(© Carlo Rovelli)

**3. Représentation imagée de l'espace-temps fait de boucles. (IMAGE DE DROITE)**



### ■ Introduction des « quanta d'espace »

Quand on tient compte de la mécanique quantique, on apprend que les processus qui régissent les champs peuvent être décrits en termes d'échanges de « quanta » ou particules. Les particules ne sont que des excitations localisées du champ. Par exemple, les particules associées au champ électromagnétique sont les photons. Le résultat fondamental de la théorie de la gravité quantique à boucles est que la même chose se produit pour le champ gravitationnel, et donc pour l'espace-temps lui-même. Les processus dynamiques de l'espace-temps quantique peuvent être compris en termes de « quanta d'espace ». Ces quanta d'espace ne sont que des excitations localisées de l'espace-temps. Comme dans les processus usuels de la théorie des champs quantiques, où des particules sont créées et détruites, dans les processus impliquant le champ gravitationnel quantique, il y a création ou destruction d'un grand nombre de quanta d'espace. Or, à l'instar des photons (de longueur d'onde donnée) qui ont une énergie minimale et ne peuvent pas être « coupés en deux », les quanta d'espace ont un volume minimal et ne peuvent pas être « coupés en deux ». Il y a un volume minimal, au-dessous duquel il n'y a rien. L'existence d'une longueur minimale en physique a été postulée dans plusieurs théories. De façon très élégante, dans le cadre de la gravité quantique à boucles, cette longueur minimale apparaît, sans aucune hypothèse supplémentaire, comme une conséquence de la nature quantique du champ gravitationnel. Toutes les quantifications de la gravité ne conduisent pas à ce résultat : dans les fameux travaux effectués dans les

années 1960 par Wheeler, DeWitt et Misner, le volume peut prendre n'importe quelle valeur, et il n'y a pas de volume minimal. Le résultat fondamental de la gravité quantique à boucles est celui-ci : la géométrie de notre Univers est constituée de blocs de construction qui ont un volume minimal non nul. C'est une révolution fondamentale dans notre compréhension de la nature ultime de l'espace-temps. Or, l'existence de l'espace quantique est précisément l'ingrédient clé pour la résolution des singularités cosmologiques. De la même manière, plus d'un siècle auparavant, l'introduction de quanta d'énergie, par Planck, avait permis de résoudre le problème de l'instabilité de l'atome d'hydrogène. L'électrodynamique classique prédit que les électrons perdent de l'énergie à cause du rayonnement, et tombent sur le noyau, rendant ainsi l'atome instable. L'électron devrait « tomber sur la singularité », sa distance au noyau devenant nulle et son potentiel infini. Mais l'électron ne peut rayonner qu'à une certaine fréquence, et la mécanique quantique impose qu'à cette fréquence l'énergie ne peut être émise qu'en paquets d'énergie discrets. Quand l'électron n'a plus assez d'énergie pour émettre un paquet, il cesse de rayonner et demeure donc stable. Il y a, par conséquent, un état fondamental de l'atome, avec un minimum d'énergie non nul (les célèbres 13,6 eV nécessaires pour séparer l'électron du noyau auquel il est lié). La discontinuité quantique de l'énergie est le résultat clé pour éviter la « singularité » de l'atome et stabiliser toute la matière. Tout se passe comme si la mécanique quantique donnait lieu à une « force

répulsive » qui empêche l'électron de s'effondrer sur le noyau.

De même, la discontinuité quantique de l'espace-temps est, dans la théorie des boucles, le résultat clé pour éviter le Big Bang, c'est-à-dire la singularité originelle de l'Univers. Classiquement, dans la théorie d'Einstein, le Big Bang est un instant du passé, atteignable à temps fini, où le volume de l'Univers devient nul et la densité d'énergie infinie. À cause de la mécanique quantique, cet instant ne peut en fait jamais être atteint, car il existe un volume minimum et, par conséquent, une valeur maximale de la densité d'énergie. Tout se passe comme si la mécanique quantique donnait lieu, là aussi, à une force répulsive qui empêche l'Univers de « passer par » le Big Bang.

Les équations de la cosmologie sont donc radicalement modifiées par ces effets quantiques. À l'échelle de Planck, la gravité devient répulsive plutôt qu'attractive. Cela implique, en particulier, que non seulement le Big Bang, mais aussi les autres types de singularités plus ou moins exotiques, sont clairement évités ! Par exemple, que se passe-t-il dans le cas d'un Univers à courbure positive, qui devrait, classiquement, s'effondrer dans le futur via un inéluctable Big Crunch ? La force de répulsion quantique fait rebondir l'Univers vers une nouvelle phase d'expansion. La contraction est suivie par un « Grand Rebond » (Big Bounce) et une nouvelle expansion (figure 4) prend naissance. Le scénario qui émerge est celui d'un possible Univers cyclique, invoqué aussi dans d'autres contextes (tels que l'Univers ekpyrotique) mais pour des raisons souvent tout à

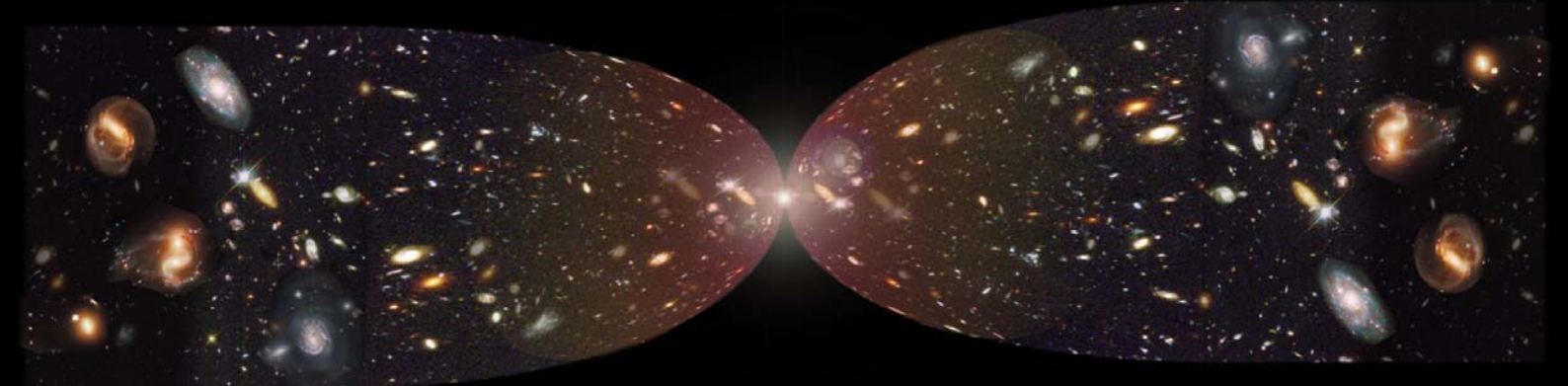
fait différentes. Le Big Bang ne serait donc plus le commencement de tout. À sa place, il y aurait eu une sorte de rebond – comme un goulet d'étranglement – qui connecterait notre Univers à un « autre » Univers classique. Il n'y a plus une singularité, mais un simple événement de l'histoire de l'Univers lors duquel des énergies dramatiques (mais finies) entrent en jeu.

La théorie prévoit que le rebond se produit à une densité d'énergie de l'ordre de  $10^{96}$  kg.m<sup>-3</sup>. C'est une valeur colossale, qui dépasse l'imagination : comme si toutes les galaxies de tout l'Univers que nous observons étaient concentrées dans l'espace d'un noyau atomique ! Alors que la gravitation usuelle est extraordinairement attractive à ces densités, la « répulsion » provenant des effets de géométrie quantique devient assez intense pour éviter la singularité. Certaines informations peuvent-elles survivre et traverser le rebond ? Peut-on « voir » de l'autre côté ? Ce n'est pas exclu mais c'est un problème ouvert très discuté à l'heure actuelle. Bien sûr, il s'agit de conditions extrêmes et d'une approche nécessairement spéculative, mais le fait qu'un scénario « pré-Big Bang » cohérent puisse être échafaudé et étudié confère à ces études une évidente légitimité.

#### ■ Comment les difficultés spécifiques à la cosmologie sont-elles abordées dans cette théorie ?

Une des clés de cette démarche tient au fait que la théorie utilisée n'est pas un nouveau modèle développé spécifiquement à partir de différentes observations d'un seul objet dans le but de résoudre des paradoxes, mais constitue une application spécifique

4. Vue d'artiste du « Big Bounce » (Grand Rebond). © Francesca Vidotto



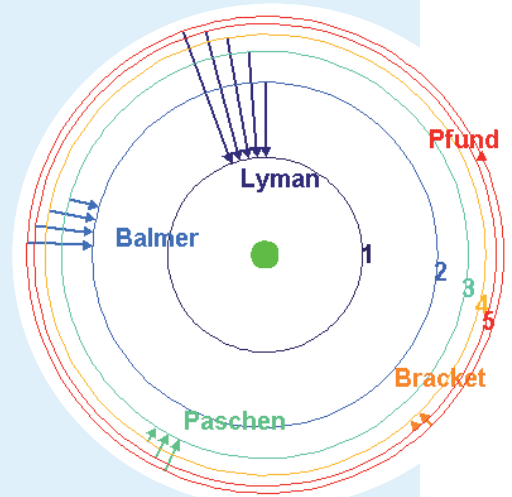
## 2. LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Le début du  $xx^e$  siècle a été marqué par deux grandes révolutions en physique. Albert Einstein a joué un rôle majeur dans chacune d'elles. D'une part, la théorie de la relativité, dont Einstein est reconnu comme le père fondateur, a bouleversé les concepts d'espace et de temps. D'autre part, la mécanique quantique a profondément remis en cause notre compréhension de la matière : contrairement à la mécanique classique, qui décrit le mouvement d'une particule de façon déterministe, la mécanique quantique exprime plutôt la probabilité de trouver une particule dans une certaine position. De plus, la mécanique quantique affirme qu'il y a des quantités

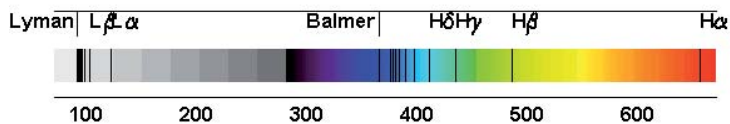
discrètes, qui ne peuvent prendre que certaines valeurs, multiples d'une quantité fondamentale (d'où le terme de « quantification »).

Ceci a pour conséquence, par exemple, que les électrons orbitant autour du noyau atomique ne tombent pas (au contraire de ce qui se passerait en physique classique) et que les atomes présentent des raies spectrales caractéristiques (pensons, en particulier, à la série de Lyman ou la série de Balmer, bien utiles en astrophysique). L'intuition d'Einstein a été d'interpréter les grandeurs discrètes de la mécanique quantique non pas comme des artefacts mathématiques de la théorie, mais comme des objets phy-

siques : c'est la découverte du « photon » ! Il s'agit d'une importante évolution conceptuelle, qui a conduit Einstein à formuler l'effet photoélectrique lui ayant valu le prix Nobel. ●



Familles spectrales de l'hydrogène, définies par le niveau d'énergie inférieur.



Spectre de raies de l'atome d'hydrogène.

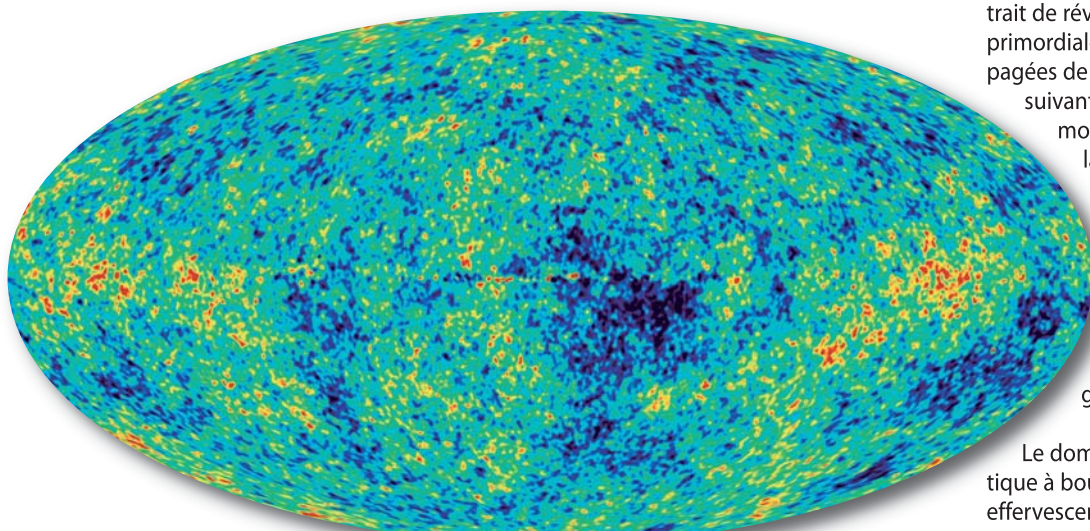
de théories déjà connues et bien corroborées par l'observation (mécanique quantique et relativité générale). De ce point de vue, le cadre est analogue à celui de beaucoup d'autres branches de la science. En géophysique, il n'y a aussi qu'un seul objet, dont la formation est irréproductible : la Terre. Personne, néanmoins, ne doute que la géophysique soit une science légitime et bien fondée : le problème est moins l'inférence de lois à partir de l'observation de régularités au sein d'un seul objet que l'application rigoureuse des lois observées ailleurs, ceci pour comprendre le passé de notre propre planète. Bien sûr, pour ce faire, il faut extrapoler : il faut faire l'hypothèse que des lois trouvées dans un contexte donné demeurent valides dans un contexte plus large. C'est un pari et rien ne peut en prouver la validité a priori. Mais il est, dans une large mesure, l'âme même de la science, et a été gagné à de très nombreuses reprises dans l'histoire de la physique : les équations de Maxwell, trouvées grâce à quelques mesures dans un petit laboratoire, se sont avérées valides dans un contexte immensément plus large, de l'atome aux galaxies. Naturellement, l'extrapolation pourrait s'avérer infructueuse, mais elle reste la première possibilité à considérer, et s'impose très souvent comme la bonne solution, la plus simple et la plus élégante.

L'exemple de la géophysique souligne également le fait que les scrupules liés aux faits que l'observateur est une partie du système qu'il entend décrire sont, en pratique, largement injustifiés. Être sur la Terre n'empêche manifestement pas d'étudier la Terre ! Le point fondamental consiste à bien comprendre que le sujet de la cosmologie n'est pas « l'ensemble de tout ce qui se trouve dans l'Univers », comme le sujet de la géophysique n'est pas « l'ensemble de tout ce qu'il y a sur la Terre ». Le sujet de la géophysique est bien plus limité, il ne s'agit que d'étudier les propriétés à grande échelle de la Terre : les grands équilibres, les mouvements des continents, la température du noyau... De même, le sujet de la cosmologie est bien plus restreint que la compréhension détaillée de tous les constituants de l'Univers : ce ne sont que la structure et la dimension globales, et les grandes fluctuations et l'histoire globale du Cosmos dont il est question. La couleur de cette page ne fait pas partie des degrés de liberté étudiés par la cosmologie ! Cette situation n'est pas rare : le système « global » est souvent plus simple que ses constituants. En mathématiques, par exemple, il est plus simple d'écrire un programme qui génère la totalité des nombres entiers qu'un seul de ces nombres pour peu qu'il comporte beaucoup de chiffres ! Finalement, le problème de la cosmo-

logie consiste probablement, comme pour la géophysique dans son domaine, à comprendre non pas les « conditions initiales », mais plutôt l'état précédant le Big Bang. L'application de la théorie des boucles à la cosmologie a commencé il y a dix ans environ, grâce aux travaux de Martin Bojowald et Abhay Ashtekar. Il a fallu plusieurs années pour éclaircir la théorie et en consolider les fondements. Aujourd'hui, elle peut être utilisée pour étudier des effets observables.

### VERS UN NOUVEAU PARADIGME ?

Le défi qui semble aujourd'hui pouvoir être relevé est considérable. D'une part, le scénario cosmologique « standard » fait appel à une phase dite « inflationnaire ». Dans les premiers instants qui suivirent le Big Bang (ou ce qui en tient lieu), il est probable que le facteur d'échelle de l'Univers se soit accru considérablement. Ce scénario très élégant permet non seulement de résoudre la quasi-totalité des paradoxes cosmologiques mais aussi de générer les perturbations qui serviront de « graines » à la croissance des structures cosmiques. Il souffre néanmoins d'un immense défaut : générer les conditions initiales nécessaires à l'inflation est extrêmement difficile et, finalement, peu naturel.



**5. Observation du fond diffus cosmologique par le satellite WMAP. Les effets de cosmologie quantique à boucles peuvent induire d'infimes différences dans ces structures par rapport aux prédictions du modèle standard. En particulier, on attend moins de « grandes » taches.** (© Nasa/WMAP)

D'autre part, comme nous l'avons vu, la gravitation quantique à boucles offre un cadre convaincant pour quantifier les équations d'Einstein de manière à préserver la propriété essentielle qu'est l'« invariance de fond », c'est-à-dire le fait que toutes les structures sont dynamiques, que rien n'est fixé ou figé dans l'espace-temps. Mais, aussi spectaculaire soit-elle, cette approche souffre d'un défaut majeur : elle est très difficile à tester. Les échelles sondées auprès des accélérateurs de particules comme le LHC sont un million de milliards de fois plus grandes que l'échelle de Planck à laquelle les effets de gravité quantique deviennent importants...

Or, il semble qu'en considérant simultanément inflation et cosmologie quantique à boucles, ces pathologies puissent se guérir mutuellement : la gravitation quantique engendrerait naturellement l'inflation tandis que l'inflation, en étirant les plus petites échelles jusqu'à des tailles macroscopiques, permettrait de tester la gravitation quantique !

Lors de la phase précédant le Big Bang (qu'il faut donc maintenant nommer Big Bounce), l'Univers est en contraction. Or, durant une telle contraction, les oscillations d'un champ vont nécessairement croître. Si donc l'Univers était rempli d'un champ de matière (sans doute l'hypothèse la plus simple qui soit permise), celui-ci va nécessairement osciller de plus en plus fort. Juste après le « rebond », l'Univers entre violem-

ment en expansion. Le champ va alors se figer. Ces conditions, tout à fait artificielles s'il n'y avait eu la phase pré-Big Bang due aux effets de gravitation quantiques mais tout à fait naturelles dans ce contexte, sont exactement celles permettant à l'inflation de prendre naissance ! De plus, il est facile de calculer que l'inflation ainsi générée, de manière « automatique », par la quantification des équations d'Einstein dure suffisamment longtemps pour résoudre les problèmes cosmologiques. Il est remarquable que la démarche des boucles, en s'attaquant à un problème théorique de gravitation quantique, permette de prédire, sans aucun ajustement fin, la phase inflationnaire qui est nécessaire au scénario cosmologique, mais jusqu'alors ajoutée de manière « ad hoc » au modèle.

Réciproquement, il est possible – quoique cela dépende de certains paramètres – que l'inflation, ainsi rendue probable, permette de mettre en évidence des effets de gravitation quantique à boucles. L'histoire cosmologique n'est en effet plus tout à fait la même que dans le scénario habituel et cela laisse quelques empreintes dans les fluctuations de densité. Aujourd'hui, grâce au fond diffus cosmologique, première lumière du Big Bang, on peut observer l'état de l'Univers au moment du découplage, c'est-à-dire dans sa première jeunesse. Dans la prochaine décennie, il sera sans doute possible qu'on puisse même observer, dans ce fond diffus, une polarisation particulière de la lumière qui permet-

trait de révéler les ondes gravitationnelles primordiales. Celles-ci ne se sont pas propagées de la même façon dans un Univers suivant le scénario standard ou dans un monde ayant été régi par les lois de la gravité à boucles. Les effets sont subtils mais pas absolument hors de portée. Il est possible que, paradoxalement, ce soit le macrocosme, c'est-à-dire l'observation de l'Univers à très grande échelle, qui vienne révéler les effets de gravitation quantique (figure 5) !

Le domaine de la cosmologie quantique à boucles est aujourd'hui en pleine effervescence. Il se développe à la fois suivant une voie « phénoménologique » conduisant à calculer les observables et suivant une voie théorique permettant de consolider l'ensemble de l'édifice. Cette dernière n'est pas à négliger. En particulier, des progrès considérables ont été accomplis ces dernières années pour écrire la cosmologie quantique dans l'élégant formalisme des « mousses de spin » qui est aujourd'hui la voie royale pour exprimer la gravitation quantique à boucles. Beaucoup reste à faire mais les avancées de la dernière décennie permettent d'être plus qu'optimiste.

Il est également intéressant de noter qu'en parallèle de ce développement cosmologique, la gravitation à boucles a aussi conduit à des progrès importants en physique des trous noirs. Ce qui n'est pas étonnant puisque la singularité centrale d'un trou noir est, en quelque sorte, analogue à celle du Big Bang. Naturellement, cette singularité disparaît également dans le modèle. De façon peut-être plus surprenante et plus spectaculaire, la gravitation quantique à boucles a permis de rendre compte de l'étrange « entropie » des trous noirs en montrant, sur des arguments microscopiques, que l'information stockée était bien, tel que Hawking et Bekenstein l'avaient conjecturé, proportionnelle à l'aire des trous noirs.

La gravitation quantique a longtemps été considérée comme une pure spéculation mathématique totalement déconnectée de toute forme de physique expérimentale ou observationnelle. Grâce à la cosmologie, la situation pourrait drastiquement changer dans les prochaines années. À suivre !

**A. Barrau/F. Vidotto ■**

## Bibliographie

MARTIN BOJOWALD, *L'Univers en rebond, avant le Big Bang*, Paris, Albin Michel 2011.  
AURÉLIEN BARRAU et DANIEL PARROCH, *Forme et origine de l'Univers*, Paris, Dunod, 2010.  
C. ROVELLI, *Qu'est-ce que le temps? Qu'est-ce que l'espace?*, Bernard Gilson éditeur, Paris, 2006.