

POUR LA  Édition française de Scientific American

# SCIENCE

## HORS-SERIE

M 01930 - 97H - F: 7,50 € - RD



Novembre-décembre 2017  
N° 97



INFLATION  
**UN SCÉNARIO  
DÉBATTU,  
MAIS SOLIDE**

LES THÉORIES  
**TROU NOIR 4D,  
THÉORIE DES  
CORDES...**

MATIÈRE NOIRE  
**POURQUOI  
ELLE NOUS  
ÉCHAPPE**

GRAND  
TÉMOIN  
**ÉTIENNE  
KLEIN**

**NOUVELLE  
FORMULE**

# ET SI LE Big Bang N'AVAIT PAS EXISTÉ ?

## REPENSER L'INSTANT ZÉRO



BEL: 8,9 € - CAN: 12,5 CAD - DOM/S: 8,9 € - ESP: 8,5 € - GR: 8,5 € - LUX: 8,5 € - MAR: 100 MAD - TOM: 2290 XPF - TOM/S: 1260 XPF - PORT: CONT.: 8,5 € - CH: 16,2 CHF

## Collecte et analyse de données texte de multiples sources (Text Mining)



Écoute en temps réel des médias sociaux  
(dont Twitter)

Import, collecte et analyse des données  
de multiples sources

Traitement automatisé de grands  
volumes de données

Optimisation par algorithme de  
Machine Learning

Gestion de projet en équipe



[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris  
Tél. 01 55 42 84 00

**GROUPE POUR LA SCIENCE**

**Directrice des rédactions:** Cécile Lestienne

**HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef adjoint:** Loïc Mangin

**Maquettiste:** Raphaël Queruel

**POUR LA SCIENCE**

**Rédacteur en chef:** Maurice Mashaal

**Rédactrice en chef adjointe:** Marie-Neige Cordonnier

**Rédacteurs:** François Savatier, Sean Bailly

**Développement numérique:** Philippe Ribeau-Gésippe,  
Clément Dufrenne et Donovan Thiebaut

**Directrice artistique:** Céline Lapert

**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,  
Ingrid Leroy et Marie Marty

**Révisseuse:** Anne-Rozenn Jouble

**Marketing & diffusion:** Laurence Hay et Arthur Peys,

**Direction financière et direction du personnel:**  
Marc Laumet

**Fabrication:** Marianne Sigogne et Olivier Lacam

**Directrice de la publication et gérante:** Sylvie Marcé

**Anciens directeurs de la rédaction:** Françoise Pétry  
et Philippe Boulanger

**Conseiller scientifique:** Hervé This

**PRESSE ET COMMUNICATION**

Susan Mackie

[susan.mackie@pourlascience.fr](mailto:susan.mackie@pourlascience.fr) • Tél. 01 55 42 85 05

**PUBLICITÉ France**

Directeur de la Publicité: Jean-François Guillotin

([jf.guillotin@pourlascience.fr](mailto:jf.guillotin@pourlascience.fr))

Tél. 01 55 42 84 28

**ABONNEMENTS**

**Abonnement en ligne:** <http://boutique.pourlascience.fr>

**Courriel:** [pourlascience@abopress.fr](mailto:pourlascience@abopress.fr)

Tél.: 03 67 07 98 17

**Adresse postale:** Service des abonnements

Pour la Science - 19 rue de l'Industrie - BP 90053

67402 Illkirch Cedex

**Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)**

**France métropolitaine:** 79 euros - Europe: 95 euros

**Reste du monde:** 114 euros

**DIFFUSION**

**Contact kiosques:** À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. 04 88 15 12 41

**Information/modification de service/réassort:**

[www.direct-editeurs.fr](http://www.direct-editeurs.fr)

**SCIENTIFIC AMERICAN**

**Editor in chief:** Mariette DiChristina

**President:** Dean Sanderson

**Executive Vice President:** Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier : Italie

Taux de fibres recyclées : 0%

« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :

Ptot 0.008kg/tonne

Ce produit est issu de forêts gérées durablement  
et de sources contrôlées.



10-32-2813

/ Certifié PEFC / [pefc-france.org](http://pefc-france.org)

# ÉDITORIAL



**LOÏC MANGIN**  
Rédacteur  
en chef adjoint

## Le Big Bang selon Saint Augustin

Dans le livre XI de ses *Confessions*, le philosophe et théologien romain saint Augustin (354-430) constate: «Qu'est-ce que en effet que le temps? Si personne ne me pose la question, je le sais; si quelqu'un pose la question et que je veuille expliquer, je ne sais plus». Les cosmologistes ont un peu le même problème avec le Big Bang: l'idée naît naturellement en remontant le film de l'Univers, mais dès qu'ils s'y intéressent de près, ils se heurtent, entre autres, à l'incompatibilité de leurs deux outils théoriques favoris (la relativité générale et la mécanique quantique) qui leur interdit l'accès à l'origine de l'Univers, l'instant zéro de l'espace et du temps.

Comment dans ces conditions comprendre l'origine de l'Univers? Avec intelligence et volonté, deux des piliers de la trinité intérieure selon... saint Augustin dans *De Trinitate* (le troisième, la mémoire, est aussi utile). L'imagination compte aussi pour beaucoup. Et les articles de ce *Hors-Série* montrent que les cosmologistes n'en manquent pas pour comprendre les tout premiers instants de l'Univers, l'idée de l'inflation (une gigantesque expansion pendant une fraction de seconde juste après le Big Bang) en est un bel exemple.

Étonnamment, la plupart des théories qu'ils échafaudent pour éclairer l'instant zéro le font disparaître. En d'autres termes, le Big Bang s'évanouit, se dilue, et laisse la place à une simple transition entre deux états cosmiques. Un Univers aurait donc préexisté au nôtre. L'avenir et les observations trancheront parmi les différentes hypothèses: certains pourront alors faire leur adage de saint Augustin: «Si je me trompe, je suis.»

# SOMMAIRE

POUR LA  
**SCIENCE**  
HORS-SÉRIE

N° 97

Novembre-décembre 2017

## Et si le **Big Bang** n'avait pas existé ?

---

Constituez  
votre collection  
de *Hors-Séries*  
*Pour la science.*  
Tous les numéros  
depuis 1996.

[pouurlascience.fr](http://pouurlascience.fr)



P. 6

### Repères

Définitions, chronologie...  
l'indispensable pour apprécier ce numéro.



P. 10

### Avant-propos

## ÉTIENNE KLEIN

### Qu'est le Big Bang devenu ?



## L'UNIVERS, CET INCONNU

P. 16

### L'étrange affaire Univers

*Alain Riazuelo*

On en apprend toujours plus sur la naissance  
et l'évolution de l'Univers. Où en est l'enquête ?

P. 22

### La naissance de la matière ordinaire

*Élisabeth Vangioni*

La nucléosynthèse primordiale est une des clés  
de la compréhension de l'origine de l'Univers.

P. 26

### L'insaisissable matière noire

*Bogdan Dobrescu et Don Lincoln*

Selon de nouveaux modèles, la matière noire  
serait bien plus complexe qu'on ne le pensait.

P. 34

### La chasse au supervide

*István Szapudi*

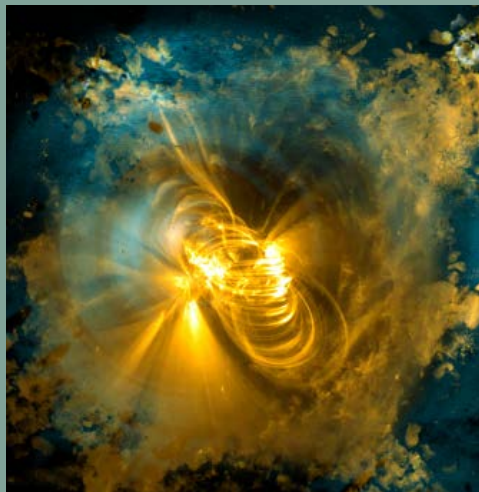
Comment expliquer la zone anormalement  
froide du fond diffus cosmologique ?

P. 42 Entretien

### « Les vides de l'Univers sont nés de fluctuations quantiques dans le plasma primordial »

*Stéphanie Escoffier*





## QUAND L'UNIVERS S'EMBALLÉ

P. 46

### L'Univers au-delà des ténèbres

*Cédric Deffayet*

L'«énergie sombre» ou un «graviton massif» expliqueraient l'expansion accélérée de l'Univers.

P. 54

### La crise de croissance de l'Univers

*Alain Riazuelo*

Malgré un début de controverse, l'idée d'inflation est sans cesse renforcée.

P. 60

### L'inflation va-t-elle faire pschitt ?

*Anna Ijjas, Paul Steinhardt et Abraham Loeb*

L'idée d'inflation serait mise à mal. Le temps des nouvelles idées est venu !

P. 68

### À la recherche des cordes cosmiques

*Erwan Allys*

La symétrie primordiale des tout premiers instants de l'Univers a-t-elle laissé des traces ?



## LE BIG BANG, ET AVANT ?

P. 76

### L'Univers né d'un trou noir

*Niayesh Afshordi, Robert Mann et Raziieh Pourhasan*

L'effondrement d'un trou noir dans un univers à quatre dimensions aurait précédé le Big Bang.

P. 84

### L'Univers ressuscité

*Gabriele Veneziano*

La théorie des cordes suggère que le Big Bang n'est pas le début de l'Univers.

P. 94

### L'essence quantique de l'espace-temps

*Clara Moskowitz*

La gravité et l'espace-temps seraient le fruit de l'intrication quantique !

P. 100

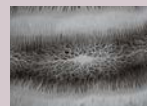
### Le rêve ultime des physiciens

*Juan Maldacena*

L'intrication quantique réconcilierait la relativité générale et la physique quantique.

P. 108

### À lire en plus



## RENDEZ-VOUS

*par Loïc Mangin*

P. 110

### Rebondissements

Un cimetière à usage prolongé • Un rendez-vous manqué • Les saisons du microbiote • L'ordinateur quantique fera-t-il un (flip-) flop ?

P. 114

### Données à voir

Les réfugiés n'ont-ils vraiment en tête que l'idée de rejoindre l'Europe ?

P. 116

### Les incontournables

Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P. 118

### Spécimen

Quand la limace léopard fait tousser.

P. 120

### Art & Science

Dans une sculpture en papier, les détails d'une bactérie apparaissent dans toute leur complexité.

# Il était une fois, L'UNIVERS

Premières galaxies  
(manifestation  
de la matière noire)

Premières étoiles

Fond diffus cosmologique

Big Bang

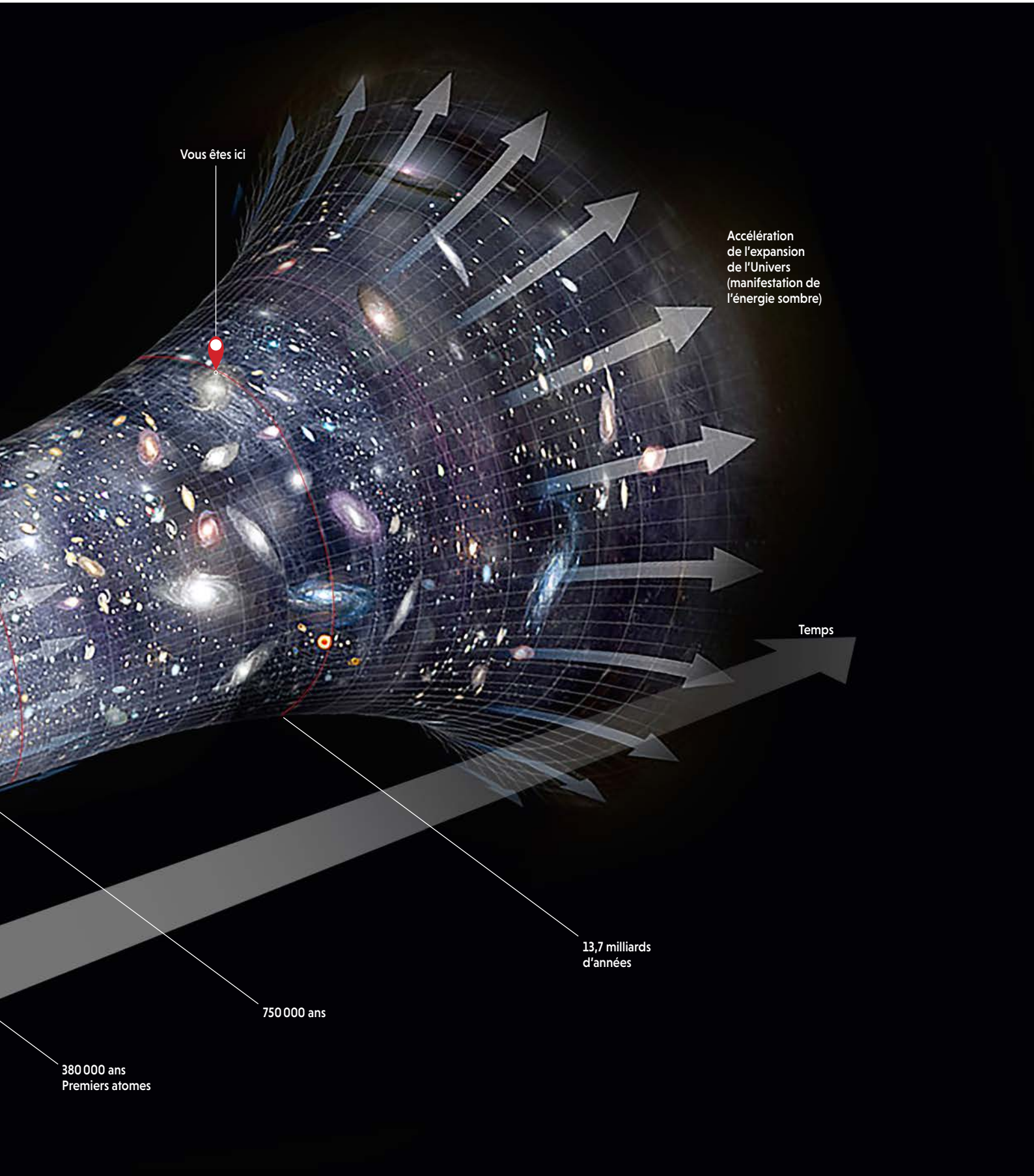
$10^{-32}$  seconde  
Inflation

20 minutes  
Nucléosynthèse  
primordiale  
(premiers noyaux  
d'atomes)

$10^{-3}$  seconde  
Formation  
des neutrons  
et des protons

**S**elon le scénario consensuel, l'Univers est né d'un point géométrique de volume nul et de densité infinie: la singularité initiale. De là, après le Big Bang, c'est-à-dire l'instant zéro, l'Univers s'est déployé.

La première étape est une inflation gigantesque durant laquelle les distances auraient été multipliées par un facteur de  $10^{50}$ , en  $10^{-32}$  seconde! Les différents composants de la matière se sont ensuite formés: les premières particules, les nucléons (neutrons et protons), les premiers noyaux d'atomes légers (hydrogène, hélium...) et, vers 380000ans, les premiers atomes quand les électrons se sont associés aux noyaux. Ce dernier événement a libéré des photons qui constituent le fond diffus cosmologique. ■



Vous êtes ici

Accélération  
de l'expansion  
de l'Univers  
(manifestation de  
l'énergie sombre)

Temps

13,7 milliards  
d'années

750 000 ans

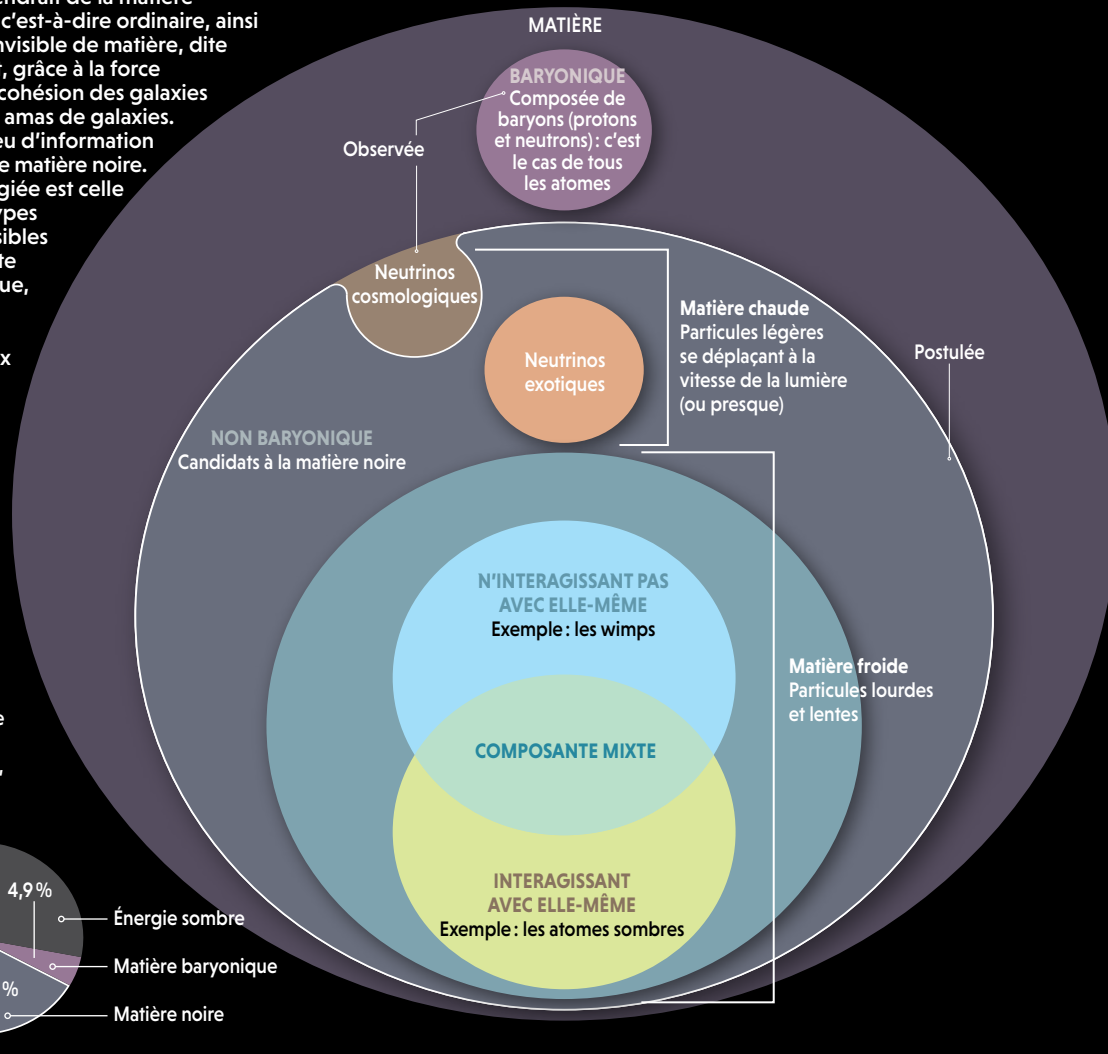
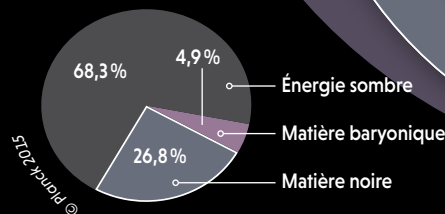
380 000 ans  
Premiers atomes



## LES AVATARS DE LA MATIÈRE DE L'UNIVERS

**L**e cosmos contiendrait de la matière « baryonique », c'est-à-dire ordinaire, ainsi qu'une forme invisible de matière, dite noire, qui assurerait, grâce à la force gravitationnelle, la cohésion des galaxies spirales et celle des amas de galaxies. Cependant, on a peu d'information sur la nature de cette matière noire. L'hypothèse privilégiée est celle d'un ou plusieurs types de particules insensibles aux interactions forte et électromagnétique, et n'émettant donc pas de lumière et ne se liant pas aux noyaux atomiques. La forme exacte que revêtiraient ces particules reste une question ouverte.

La masse étant reliée à l'énergie par la formule d'Einstein  $E = mc^2$ , l'énergie totale de l'Univers inclut la matière baryonique, la matière noire et l'énergie sombre.



## Ont participé à ce numéro

### Inflation

**P**our expliquer les propriétés actuelles de l'Univers, sa géométrie et l'homogénéité de son contenu, les cosmologistes ont recours à l'idée d'inflation. Elle stipule que l'Univers s'est considérablement dilaté : en seulement  $10^{-32}$  seconde, les distances ont été multipliées par un facteur de l'ordre de  $10^{30}$ .

### Matière baryonique

**E**lle correspond à la matière dans son acceptation classique, c'est-à-dire celle qui constitue les étoiles, les planètes, les montagnes, les êtres vivants, les humains... La centaine d'atomes différents qui composent cette matière ordinaire (de l'hydrogène à l'uranium) sont construits sur le même modèle : des électrons sont en orbite autour d'un noyau réunissant des protons et des neutrons. Ces deux derniers types de particules sont des baryons.

### Matière noire

**L**a quantité de matière ordinaire calculée à partir des observations ne suffit pas à expliquer certains comportements, par exemple la rotation des galaxies et celle des amas de galaxies. Pour y remédier, on doit invoquer une matière noire, ou sombre, dont la nature reste inconnue. Elle n'a jamais été détectée. On sait seulement qu'elle représente 26,8% du contenu de l'Univers et qu'elle n'est pas composée de la matière ordinaire. Le problème est de taille, car cette dernière ne correspond qu'à 4,9% du contenu de l'Univers...

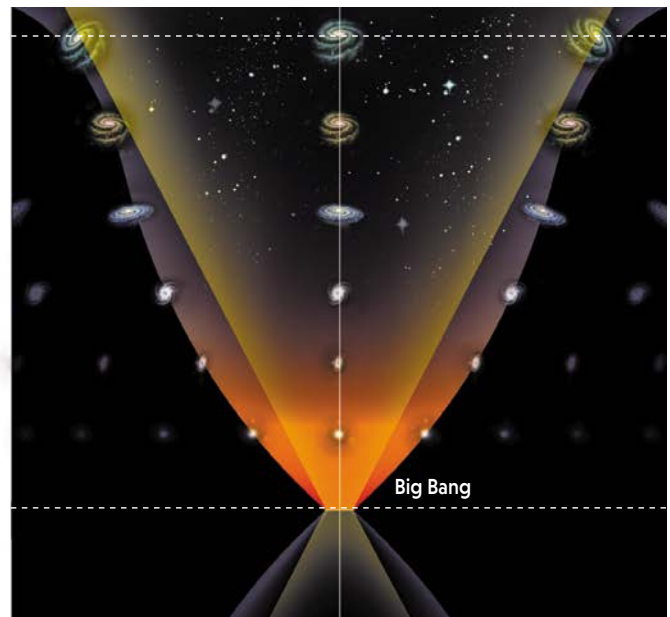
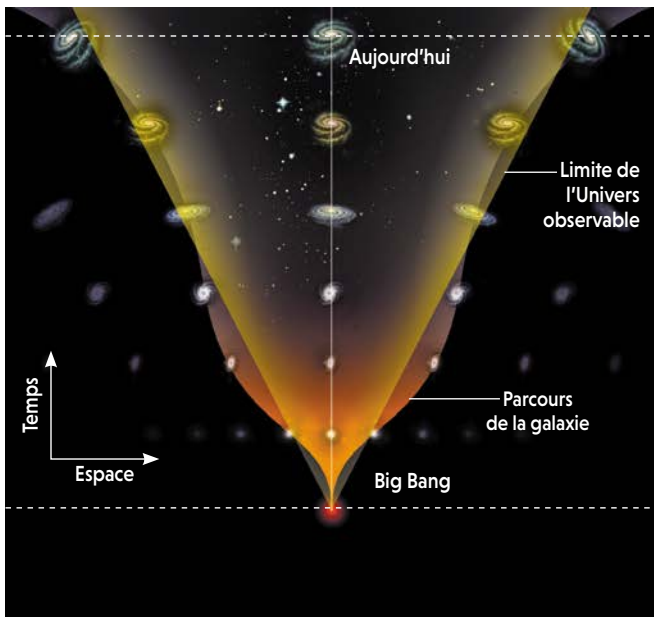
## LA FIN DU COMMENCEMENT ?

**D**ans notre Univers en expansion, les galaxies se fuient à une vitesse proportionnelle à la distance qui les sépare (c'est la loi de Hubble). En conséquence, en rembobinant le film, on en déduit que toutes les galaxies (leurs précurseurs) sont parties du même point au même moment.

Selon la cosmologie standard, fondée sur la théorie de la relativité générale, ce point infinitésimal (une singularité) est situé à un moment fini dans le passé, c'est le Big Bang (à gauche). La notion de temps et d'espace perd toute signification avant cet instant.

Dans les modèles plus élaborés fondés par exemple sur la théorie des cordes ou la gravitation quantique à boucles, les effets quantiques étalent le point infinitésimal de sorte que les précurseurs des galaxies ont émergé d'une région très petite, mais de volume non nul (à droite).

Ces modèles (ekpyrotiques, de pré-Big Bang...) ouvrent la voie à un Univers antérieur au Big Bang. La transition avec le nôtre devient alors une sorte de rebond.



## Expansion

**D**ans l'Univers à grande échelle, les objets (galaxies, amas...) s'éloignent les uns des autres, comme si l'espace tout entier gonflait. Mieux, le décalage vers le rouge du spectre des galaxies révèle qu'elles s'écartent d'autant plus vite qu'elles sont distantes : c'est la loi dite de Hubble.

## Énergie sombre

**D**epuis leur formation, les galaxies s'éloignent les unes des autres, dans un contexte général d'expansion de l'Univers. Cependant, sous l'effet de la gravitation, ce mouvement devrait ralentir. Ce n'est pas le cas ! L'expansion s'accélère au cours du temps. Comment l'expliquer ? En postulant l'existence d'une énergie noire (ou sombre) qui aurait un effet répulsif vis-à-vis de la gravité. On ignore tout de cet ingrédient supplémentaire, qui correspond à... 68,3 % du contenu de l'Univers.

## Quantique vs relativité générale

**À** ses tout débuts, l'Univers était très dense et très chaud. Dans de telles conditions, la gravitation décrite par la relativité générale d'Einstein doit s'associer à la physique quantique, la seule à décrire les trois autres interactions fondamentales de la nature : les interactions nucléaire faible et nucléaire forte ainsi que l'électromagnétique. Or les deux théories sont incompatibles. Plusieurs tentatives essaient de pallier ce problème, les deux plus en vue étant la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes.



# ÉTIENNE KLEIN



## Qu'est le Big Bang devenu ?

**L'idée classique de Big Bang n'est pas physiquement satisfaisante, car elle se fonde uniquement sur la relativité générale sans tenir compte de la physique quantique. Comment la corriger ?**

### Que recouvre l'idée de Big Bang ?

**Étienne Klein :** La plupart du temps, l'expression « Big Bang » est employée comme si elle désignait l'apparition simultanée de l'espace, du temps, de la matière et de l'énergie. C'est ainsi que dans le langage courant, elle en est venue à désigner la création même du monde ou, si l'on préfère, « l'instant zéro ».

#### **Cette assimilation traduit-elle vraiment les équations de la cosmologie ?**

**Étienne Klein :** *A priori*, il ne s'agit nullement d'un contresens: selon les premières versions des modèles de Big Bang, qui remontent aux années 1950, si l'on regarde ce que fut l'Univers dans un passé de plus en plus lointain, on observe que les galaxies se rapprochent les unes des autres, que la taille de l'Univers diminue sans cesse et qu'on finit en effet par aboutir – sur le papier – à un univers « ponctuel », au sens où

#### BIO EXPRESS

##### 1981-1983

Diplôme de l'École centrale de Paris, DEA de physique théorique et entrée au CEA.

##### 1999

Doctorat de philosophie des sciences.

##### 2006

Création au CEA du Larsim, un laboratoire de physiciens et de philosophes dédié à l'étude des fondements de la physique et des implications philosophiques des découvertes.

##### 2010

Publication de *Discours sur l'origine de l'Univers*, chez Flammarion.

il se réduisait à un point géométrique, c'est-à-dire de volume nul et de densité infinie.

En d'autres termes, si on déroule le temps à l'envers, du présent vers le passé, les équations font bel et bien surgir un « instant zéro », qui serait apparu il y a 13,7 milliards d'années: cet instant se trouve directement associé à ce que les physiciens nomment une « singularité initiale », une sorte de situation théorique monstrueuse où certaines quantités, telles la température ou la densité, deviennent infinies. Or qu'est-ce qui empêche d'assimiler cette singularité initiale à l'origine effective de l'Univers? De prime abord, rien.

#### **Pourtant, ce n'est pas aussi simple...**

**Étienne Klein :** En effet, et les raisons en sont faciles à saisir: les premiers modèles de Big Bang – ceux-là même qui ont formaté les tournures de nos discours – ne tenaient compte que d'une seule force de la nature, la gravitation, décrite à l'aide du

formalisme de la relativité générale développée par Einstein au début du xx<sup>e</sup> siècle.

Cette interaction, toujours attractive et de portée infinie, domine à grande échelle. Mais lorsqu'on remonte le cours du temps, la taille de l'Univers se réduit progressivement et, au bout de 13,7 milliards d'années, la matière finit par rencontrer des conditions physiques très spéciales que la relativité générale est incapable de décrire à elle seule. Cette fois, d'autres interactions fondamentales que la gravitation entrent en jeu : il s'agit des interactions électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte, qui déterminent le comportement de la matière, notamment lorsque celle-ci est à très haute température et à très haute densité. Toutes les trois sont décrites selon les principes de la physique quantique, fort différents de ceux de la relativité générale.

La relativité générale ne prenant en compte aucune de ces trois forces, elle n'est pas créée pour décrire à elle seule l'Univers primordial. Par conséquent, il est intellectuellement fâcheux de persister à faire dire à la théorie d'Einstein ce que ses propres principes sont incapables de concevoir. Car pour pouvoir affronter les conditions de l'univers «vraiment primordial» et devenir capables d'en parler, il faudrait que les physiciens théoriciens puissent franchir le «mur de Planck».

### En quoi consiste ce mur ?

**Étienne Klein :** Ce terme désigne un moment particulier de l'histoire de l'Univers, une phase par laquelle il est passé et qui se caractérise par le fait que les théories physiques actuelles sont impuissantes à décrire ce qui s'est passé en son amont.

À ce mur de Planck sont associées une énergie, une longueur et une durée caractéristiques. L'énergie de Planck vaut  $10^{19}$  GeV, soit 10 milliards de milliards de fois l'énergie de masse d'un proton. C'est dire si, à cette époque, la matière était furieusement agitée, affolée de façon paroxystique... La longueur de Planck est égale à quelque  $10^{-35}$  mètre, soit 17 ordres de grandeur de moins que la taille d'un quark ou d'un électron : en deçà de cette échelle de distance, la notion d'espace telle que nous avons l'habitude de la décrire n'a plus guère de sens, et s'effondre même. Letemps de Planck vaut quant à lui  $10^{-43}$  seconde.

Pour exprimer ce résultat, on a pris l'habitude malheureuse de dire que le mur de Planck correspond à l'Univers tel qu'il était « $10^{-43}$  seconde après le Big Bang». Or

# Les théoriciens qui tentent de décrire l'Univers primordial osent toutes les hypothèses

c'est un double abus de langage : d'une part, cette façon de parler admet implicitement l'existence d'un temps zéro, qui n'est plus garanti ; d'autre part, avant le mur de Planck, le concept de temps devient lui-même problématique, au point qu'il n'est plus possible de donner le moindre sens à la notion de durée, en l'occurrence à celle qui se serait écoulée entre le Big Bang et le mur de Planck.

Le mur de Planck représente en définitive ce qui nous barre aujourd'hui l'accès à l'origine de l'Univers, si origine il a eu. Il incarne la limite d'opérativité des concepts de notre physique par ailleurs solidement éprouvés : ceux-ci conviennent pour décrire ce qui s'est passé après lui, pas ce qui a eu lieu avant.

### Comment surmonter cet obstacle théorique ?

**Étienne Klein :** De nombreux travaux sont menés pour tenter de construire un formalisme susceptible de mieux décrire, et surtout plus complètement, l'univers primordial. Les théoriciens qui tentent de décrire cette phase ultrachaud et ultradense osent toutes les hypothèses : l'espace-temps posséderait plus de quatre dimensions ; à toute petite échelle, il serait discontinu plutôt que lisse ; ou encore il serait théoriquement dérivable ou déductible de quelque chose qui n'est pas un espace-temps.

### L'une des pistes est la théorie des supercordes...

**Étienne Klein :** C'est même l'une des démarches les plus suivies pour franchir le mur de Planck. Elle postule que si l'on pouvait regarder une particule élémentaire avec une loupe extrêmement puissante, on découvrirait qu'il s'agit d'un objet non pas ponctuel, mais unidimensionnel, une sorte de corde qui serait soit un fil, soit une boucle (voir *L'Univers ressuscité*, par G. Veneziano, page 84). Cette théorie propose en outre une modification de l'espace-temps, qu'elle dote de dimensions supplémen-

taires qui seraient repliées sur elles-mêmes à une échelle si petite que nous ne pouvons pas les détecter.

Cette théorie est encore à l'ébauche, mais elle a déjà apporté un résultat dont la portée est capitale : elle prédit que la température au sein de l'Univers ne peut être supérieure à une certaine valeur maximale, de sorte qu'elle n'a jamais pu être infinie, à aucun moment de son histoire.

À cette limite supérieure de la température sont associées des limites supérieures de la densité et de la courbure de l'espace-temps. L'univers n'a donc jamais été ponctuel, sa taille n'a jamais été nulle ni sa densité infinie, ce qui revient à dire que la singularité prétendument originelle dont on a pris l'habitude de parler n'a jamais eu lieu. En d'autres termes, si la théorie des supercordes est exacte, le Big Bang n'a pas ressemblé à notre façon canonique de la résumer. Reste à déterminer en quoi il a pu consister.

Certains scénarios, dits de pré-Big Bang, l'assimilent à une phase extrêmement dense qui pourrait servir de «pont quantique» entre notre Univers en expansion et un autre qui l'aurait précédé (en fait le même, mais en contraction). L'Univers aurait connu avant le Big Bang une évolution symétrique de celle qu'il a eue après : au cours de cette phase, la densité de matière, au lieu de décroître comme dans l'Univers actuel, devient de plus en plus élevée, la température augmente, tandis que les dimensions de l'Univers diminuent, jusqu'à ce que la densité d'énergie et la température atteignent les valeurs maximales permises par la théorie des supercordes. À ce moment-là, l'Univers, ne pouvant plus se contracter, car cela accroîtrait encore sa température, rebondit sur lui-même et se dilate. Toutes les grandeurs qui augmentaient se mettent à décroître, et *vice versa*. Ce phénomène renverse l'image que nous faisons du Big Bang, qui n'est plus qu'une sorte de transition entre deux phases distinctes d'un seul et même univers. >

**> Les dimensions supplémentaires d'espace-temps sont-elles nécessairement à des échelles extraordinairement petites ?**

**Étienne Klein :** À l'inverse de la théorie des supercordes « standard », une autre hypothèse à l'étude consiste à dire que ces dimensions supplémentaires seraient de taille infinie. Notre Univers serait alors une sorte de surface à quatre dimensions plongée dans un espace-temps plus vaste, une « brane » où les particules de matière seraient condamnées à se déplacer.

Des physiciens développent dans ce cadre le modèle dit ekpyrotique (du mot grec signifiant « conflagration »), qui s'appuie sur l'hypothèse que notre brane n'est pas seule au monde, que d'autres univers (d'autres branes) flottent à proximité du nôtre. L'espace qui les sépare est constitué de vide. Or, en physique quantique, le vide n'est pas vide d'énergie : il se comporte comme une sorte de ressort, qui conduit deux branes à pouvoir entrer en collision tandis qu'elles se contractent. L'énergie du choc est convertie en matière et en rayonnement.

Si un tel événement s'était produit dans le passé avec notre brane (notre Univers), nous l'interpréterions de là où nous sommes comme s'il s'était agi de ce que nous appelons le Big Bang. Après la collision, les deux branes entrent en phase d'expansion, les galaxies se forment. Mais à mesure que les branes s'éloignent l'une de l'autre, l'énergie du vide vient freiner leur éloignement puis enclencher leur rapprochement. De nouveau en mouvement l'une vers l'autre, elles vont encore une fois entrer en collision, ce qui provoquera un nouveau Big Bang, et ainsi de suite.

De multiples variantes existent autour de ces modèles, que nous ne présenterons pas ici car elles ne changent pas fondamentalement la donne : aucune ne donne corps à l'idée d'une création *ex nihilo* de l'Univers. Elles interprètent le Big Bang soit comme une transition de phase entre deux périodes de l'Univers, soit comme l'effet d'une collision entre la brane qui constituerait notre Univers et une autre brane, ou encore priment de pertinence l'idée que l'Univers a pu avoir un commencement. Dans tous les cas, l'instant zéro s'évanouit, et la singularité initiale, celle des modèles classiques de Big Bang qui ne prenaient en compte que la gravitation, se trouve pulvérisée.

**Dans ces scénarios, que devient l'hypothèse de l'inflation invoquée pour expliquer la géométrie et l'uniformité de l'Univers ?**

**Étienne Klein :** Dans les années 1980, des cosmologistes ont émis l'hypothèse que l'Univers primordial aurait connu une gigantesque « inflation », c'est-à-dire une phase d'expansion furieusement accélérée : les distances auraient été multipliées par un facteur énorme, de l'ordre de  $10^{50}$ , en une durée très courte, de l'ordre de  $10^{-32}$  seconde !

D'autres physiciens ont pu établir que si ce processus a eu lieu, ce qui n'est pas prouvé (voir *L'inflation va-t-elle faire pschitt*, par A. Ijjas, page 60), il pourrait être responsable d'une création permanente d'univers : une multitude de régions de l'espace connaîtraient toujours une telle phase d'expansion accélérée, donnant sans cesse naissance à de nouveaux univers, des « univers-bulles ». L'Univers serait en somme un

données de l'expérience. Il est encore trop tôt pour affirmer que la théorie des supercordes est la bonne.

Des théories concurrentes sont donc développées, telle la théorie de la gravité quantique à boucles ou les multivers. Elles ne constituent encore que des conjectures, mais – point remarquable – elles aussi ont la propriété de dissoudre l'instant zéro : pour elles, plus de singularité initiale, comme si le mariage de la physique quantique et de la relativité générale qu'elles tentent de célébrer devait aboutir nécessairement à l'effacement de la création de l'Univers.

Dans tous les cas, les calculs font en effet apparaître un monde qui aurait pré-existé à notre Univers : le vide quantique, ou une « brane » flottant dans un espace-temps à dix dimensions, voire plus, ou encore un univers en contraction rebondissant sur lui-même lorsque sa densité atteint une valeur indépassable, ou toutes sortes d'autres choses plus ou moins exotiques.

## Ce qui a préexisté à notre Univers n'est jamais rien : il y a toujours eu de l'« être », jamais de néant

univers gigogne ultraproliiférant, un « multivers » composé d'un très grand nombre d'univers-bulles présentant chacun ses propres lois physiques.

S'agit-il d'un délire de théoriciens ? D'une révolution scientifique ? Personne ne pouvant le dire, l'hypothèse des multivers fait débat : certains la considèrent incontournable, d'autres la jugent épistémologiquement dangereuse, car exagérément métaphysique, et en concluent qu'il faut s'acharner à chercher une théorie capable de décrire l'Univers dans lequel nous vivons et non un ou plusieurs autres.

**La théorie des supercordes n'est pas seule en lice pour éclairer les tout débuts de l'Univers et réconcilier relativité générale et physique quantique.**

Non, et ce d'autant plus qu'elle n'a pour l'instant produit aucun effet vérifiable qui permettrait de la confronter aux

Cela conduit à deux constats. Le premier est que, selon ces modèles, ce qui a préexisté à notre Univers n'est jamais rien : il y a toujours eu de l'« être », jamais de néant. Le second, que ces choses pré-existantes sont toutes immanentes : elles font partie de l'Univers et ne correspondent donc pas à des causes premières, extérieures à l'Univers, qui auraient enclenché son apparition d'un simple claquement de doigts.

La seule caractéristique qui les distingue des autres éléments constitutifs de l'Univers tient au fait qu'elles sont censées avoir engendré tout ce qui existe en plus d'elles, mais sans qu'on puisse dire quelle origine elles-mêmes peuvent avoir. D'où vient le vide quantique ? Nul ne le sait. Les branes ? Personne ne peut le dire. Et d'où provenait l'Univers d'avant le Big Bang ? Mystère. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN



**AcademiaNet** offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

**AcademiaNet**, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- :: Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- :: Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- :: Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**nature**

POUR LA  
**SCIENCE**

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec  
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

[www.academia-net.org](http://www.academia-net.org)





Une galaxie, perdue au fin fond de l'Univers. Elle soulève à elle seule le problème de la matière noire et celui de l'énergie sombre.





© Vadim Sedovski/Shutterstock.com

# L'UNIVERS, CET INCONNU

L'Univers s'offre aux cosmologistes depuis des siècles. À force de l'étudier, on connaît de mieux en mieux certaines de ses caractéristiques : son âge, sa dynamique, son histoire, sa composition... D'autres résistent à notre compréhension. Ainsi, la matière ordinaire que nous connaissons, et dont on peut retracer en détail la formation, représente moins de 5 % du contenu de l'Univers ! Le reste, l'énigmatique matière noire et l'étrange énergie sombre, échappe à notre entendement. Quant au fond diffus cosmologique (le rayonnement fossile émis 380 000 ans après le Big Bang), s'il reste l'une des meilleures sources d'informations sur l'Univers, il présente des anomalies inexplicables, notamment une grande zone froide qui intrigue les chercheurs.

## L'ESSENTIEL

● Nos connaissances sur l'Univers ont beaucoup progressé ces dernières années. On sait désormais mieux à quoi il ressemble et quelle fut son histoire.

● Plusieurs caractéristiques sont connues, notamment sa composition en matière ordinaire et en photons.

● Cependant, quelques zones d'ombre demeurent. Comme ce en quoi consistent la matière noire et l'énergie sombre.

● On doit aussi expliquer pourquoi certains paramètres prennent la valeur qu'on leur connaît. Quoi qu'il en soit, le cosmos est bien un objet de science.

## L'AUTEUR



ALAIN RIAZUELO chargé de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique de Paris et ancien membre du consortium de la mission *Planck*.

# L'étrange AFFAIRE Univers

**Que savons-nous de la matière noire ? Pas grand-chose. De l'énergie sombre ? Guère plus... Pourtant, les chercheurs en apprennent toujours plus sur la naissance et l'évolution de l'Univers. Où en est l'enquête ?**

# L'

L'affaire est d'envergure et monopolisée de très nombreux enquêteurs. Il faut dire qu'elle déconcerte par son ampleur et son ancienneté : les événements en question datent de... 13,7 milliards d'années ! Et le « crime » ? Le Big Bang tout simplement ! De fait, à l'instar d'autres disciplines historiques, comme l'archéologie et la paléontologie, la

cosmologie s'apparente à une enquête policière. Ici, l'objectif est de reconstituer l'histoire, la structure et l'évolution de l'Univers. Les indices sont tapis dans les lois physiques et dans les traces que l'on peut relever en laboratoire ou dans le cosmos. Depuis une vingtaine d'années, l'enquête a connu une accélération notable. Le moment est venu de faire le point sur l'affaire. Commençons par le portrait-robot du suspect...

## ET LA LUMIÈRE FUT

De quoi est composé l'Univers ? Le premier constituant, évident, est la lumière. Celle des étoiles, mais pas seulement. Même de nos jours, 13,7 milliards d'années après le Big Bang, l'écho lumineux de celui-ci, le



rayonnement fossile, ou fond diffus cosmologique, représente la plus grande quantité d'énergie lumineuse de l'Univers: 95% de la lumière actuelle est directement issue du Big Bang, les 5% restant se partageant en parts à peu près égales entre le rayonnement émis par les étoiles depuis le Big Bang et le rayonnement thermique de la matière, encore froide, qui ne s'est pas encore condensée en étoiles.

En termes de photons, la domination du rayonnement fossile est encore plus grande: plus de 99% des photons de l'Univers ont été émis à l'occasion du Big Bang, ce qui représente une densité de 413 photons par centimètre cube. Ces photons ont encore la mémoire des quelques centaines de milliers d'années qui ont suivi le Big Bang, une époque où ils interagissaient sans cesse avec la matière. Ils en ont conservé une distribution d'énergie spécifique d'un milieu en équilibre thermique (on parle de distribution de corps noir), à laquelle on peut associer une température donnée. Celle-ci a été mesurée par le satellite *Cobe* en 1990: 2,726 kelvins (voir la figure page 19). Dans notre description de l'Univers, c'est le paramètre le mieux connu.

À cet écho lumineux du Big Bang s'ajoute celui des neutrinos présents dans la fournaise primordiale. Ces particules évanescentes sont très difficiles à détecter même à haute énergie. Or, comme les photons du rayonnement fossile, elles ont aussi perdu une grande partie de leur énergie du fait de l'expansion de l'Univers, et ne sont pas détectables directement. On >

L'univers s'offre à nous dans son immensité. C'est l'occasion d'enquêter sur son histoire encore jalonnée de quelques zones troubles.



► peut cependant mesurer leur faible influence gravitationnelle, et déterminer une partie de leurs propriétés, notamment contraindre leur masse. On est ainsi certain que celle du neutrino le plus lourd est plus d'un million de fois inférieure à celle de l'électron.

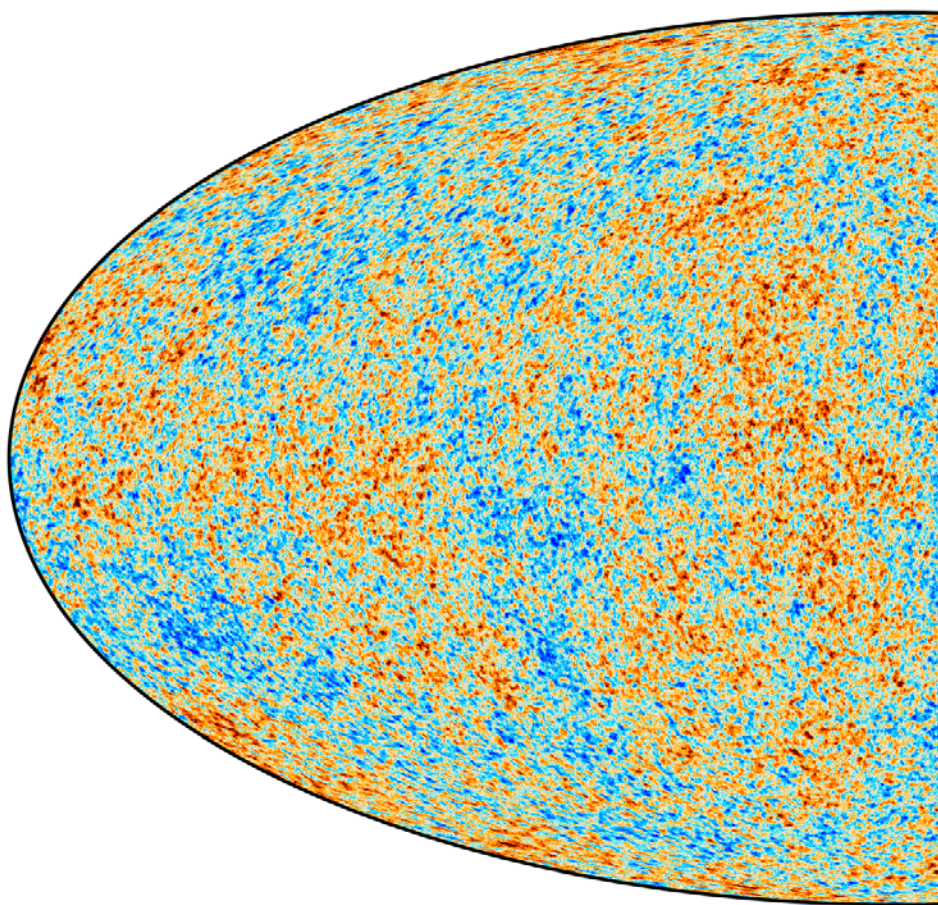
L'autre constituant évident de l'Univers est la matière dont les étoiles, les planètes, les êtres vivants sont faits. Cette matière dite baryonique est répartie de façon très hétérogène à petite échelle. Là où, dans l'air ambiant, on trouve plus de  $10^{26}$  atomes par mètre cube, on en trouve bien moins d'un seul par mètre cube en dehors des amas de galaxies. Ces structures étant rares au regard du volume de l'Univers, la densité globale de matière baryonique est du même ordre, et elle est désormais connue avec une précision de l'ordre du pourcent. Même rares, les quelques caractéristiques du portrait-robot de l'Univers sont connues avec force précision!

À l'issue du Big Bang, la matière est composée d'hydrogène (76% en masse) et d'hélium (24%), avec quelques traces de lithium (voir *La naissance de la matière ordinaire*, par E. Vangioni, page 22). Par la suite, ces éléments se combinent pour former des éléments plus lourds au sein des étoiles, mais à un rythme assez lent. De nos jours, la fraction d'hélium est passée à 28% et celle d'hydrogène à 70%. Le reste des atomes (2%) correspond aux 90 autres espèces d'atomes, du lithium à l'uranium, inégalement distribués. En termes de nucléons (protons et neutrons), la densité moyenne de la matière est alors de 0,249 nucléon par mètre cube, avec une précision de un pourcent.

## LA MATIÈRE INVISIBLE

Longtemps, les astrophysiciens ont pensé que la matière connue, la baryonique, était la seule existante dans l'Univers. Mais les galaxies ne se comportent pas comme si elles étaient entièrement composées de matière ordinaire. De nombreuses observations suggèrent qu'il existe une autre forme de matière, totalement inconnue en laboratoire dont on détecte l'influence gravitationnelle, mais qui n'interagit pas directement avec la matière baryonique. Cette matière supplémentaire est nommée faute de mieux matière noire, ou matière sombre.

Historiquement, c'est dans les amas de galaxies que la matière noire a été identifiée. Mais la situation reste la même: galaxies ou amas de galaxies possèdent des constituants (respectivement les étoiles et les galaxies), dont on peut déterminer la vitesse orbitale par spectroscopie. Par ailleurs, les lois de la mécanique céleste nous renseignent sur la masse que doit avoir l'objet initial pour expliquer la vitesse des constituants autour du centre. Reste alors à vérifier que la somme des masses



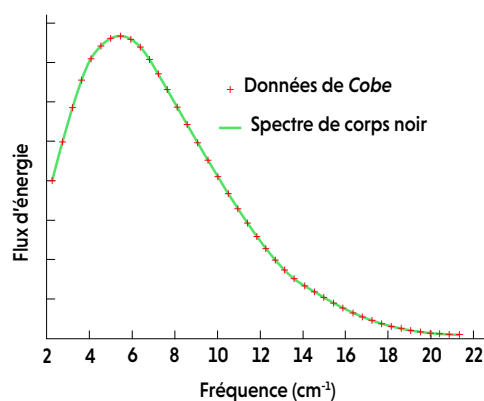
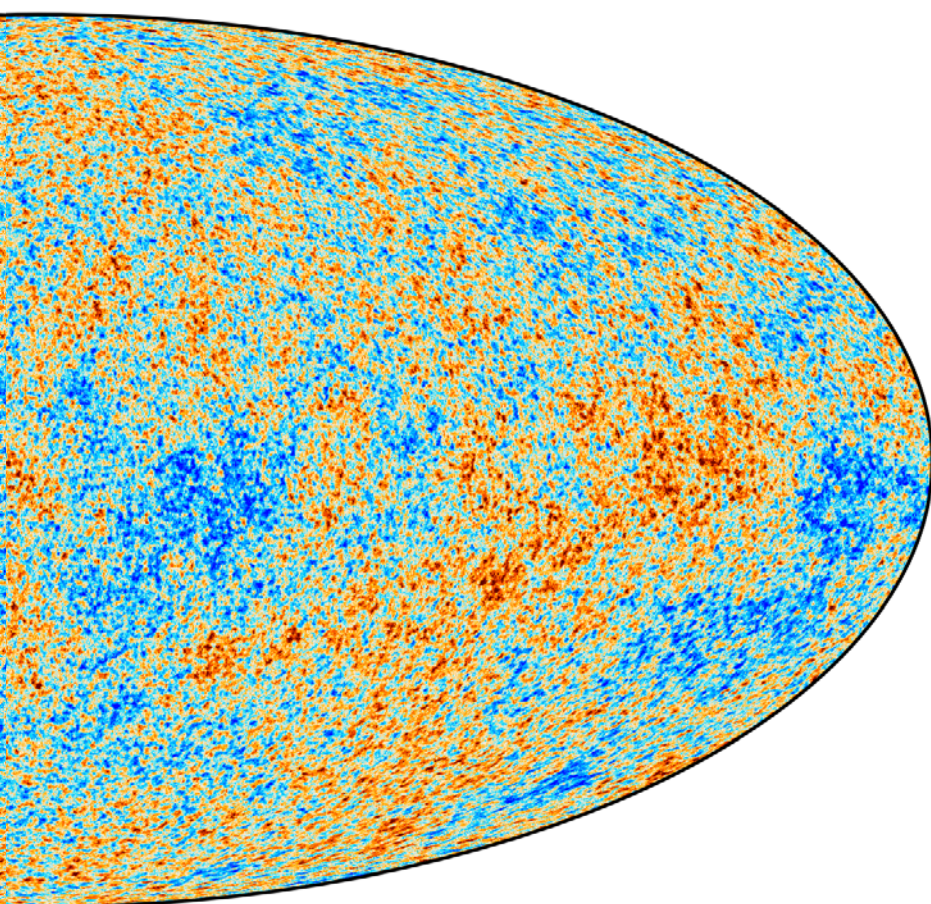
des constituants correspond bien à la masse calculée... Ce qui n'est pas le cas: galaxies et amas de galaxies sont bien plus massifs que les étoiles et galaxies qui les contiennent.

Face à ce constat, l'astrophysicien suisse Fritz Zwicky formula en 1933 le concept de « matière sombre », nécessaire pour expliquer cet écart. À l'époque de Zwicky, cette matière sombre ne posait guère de problème conceptuel, car il suffisait d'imaginer qu'elle était composée de matière ordinaire n'émettant pas de quantités notables de rayonnement.

Cependant, un faisceau d'observations infirma lentement mais sûrement cette idée: la matière sombre ne peut pas être composée de matière ordinaire, pour deux raisons principales. La première est que quel que soit l'état dans lequel se trouve la matière ordinaire, celle-ci émet toujours une forme de rayonnement (infrarouges, rayonnement X...). Or, si ces rayonnements, indétectables à l'époque de Zwicky, ont fini par être détectés, la quantité de matière cachée qu'ils ont révélée était de beaucoup insuffisante pour la matière sombre attendue.

La seconde raison est que la façon dont l'Univers se structurait était tout simplement incompatible avec l'idée que cette matière





Le fond diffus cosmologique a été mesuré avec précision par le satellite *Planck*. Il correspond au rayonnement, aujourd'hui en microondes, émis 380 000 ans après le Big Bang quand la lumière a cessé d'interagir avec la matière. Les différentes couleurs illustrent de très faibles fluctuations de température (de l'ordre de  $10^{-5}$  kelvin) par rapport à la moyenne (2,726 kelvins) correspondant à des fluctuations de densité de matière. La superposition parfaite du spectre d'émission du fond diffus et de celui d'un corps noir à 2,726 kelvins confirme que l'Univers était rempli d'un gaz ionisé chaud et homogène, il y a quelque 13,7 milliards d'années.

soit composée d'atomes ou de molécules. En effet, le fond diffus cosmologique indique que l'Univers était très peu structuré quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang. Par ailleurs, à partir de ce moment-là, les calculs indiquent que l'Univers ne se structure pas très rapidement. Or l'Univers est assez hétérogène aujourd'hui, ce qui est incompatible avec ce que révèle le rayonnement fossile.

Dans les deux cas, l'échappatoire le plus simple consiste à imaginer qu'il existe un autre type de matière, radicalement différent de tout ce que nous connaissons, et qui se caractérise par le fait qu'il n'émet pas de lumière du tout. Ainsi, nous n'arrivons pas à peser correctement les galaxies et amas de galaxies, car nous ne voyons pas, au sens littéral du terme, tous leurs constituants. En outre, si l'Univers ne se structure pas au rythme attendu, c'est que la matière noire se structure plus rapidement sans que l'on s'en rende compte, et qu'elle permet à la matière ordinaire de s'organiser plus rapidement qu'elle ne pourrait le faire si elle était seule dans l'Univers.

Cette matière noire, comme on la nomme désormais, n'est donc pas tant noire qu'invisible, ou transparente. Fût-elle noire, elle pourrait être détectée par le fait qu'elle absorbe la lumière, mais il n'en est rien. Tout se passe comme si elle n'interagissait avec le reste de l'Univers que *via* la gravitation, à l'inverse de la matière baryonique qui peut émettre des quantités importantes de lumière.

## UNE TROUBLANTE RÉGULARITÉ

La structure à grande échelle de l'Univers peut se résumer en une phrase : des galaxies à perte de vue, et un aspect identique dans toutes les directions. Mais pourquoi devrait-il en être ainsi ? Si nous regardons deux régions distantes de l'Univers situées dans des directions diamétralement opposées, elles ont le même aspect. Pour autant, ces deux régions, que nous voyons à une époque reculée du fait que la lumière qu'elles émettent met un temps fini pour nous atteindre, n'ont pas encore, à cette époque, eu le temps d'échanger des signaux lumineux. En d'autres termes, ces deux régions n'ont aucune raison d'avoir le même aspect, n'ayant pas eu le temps d'échanger de la matière ou une quelconque forme d'information pour ce faire. Mais pourtant, elles ont le même aspect. Pourquoi ?

Force est d'admettre qu'un phénomène physique a autorisé des régions désormais très distantes, d'avoir suffisamment d'échanges pour avoir une évolution comparable. Les lois physiques et la matière que nous connaissons (même la matière noire) ne permettent pas de tels échanges. Les physiciens ont été contraints d'imaginer de nouveaux



➤ phénomènes physiques, probablement à l'œuvre très tôt dans l'histoire de l'Univers, pour expliquer la régularité de l'Univers à grande échelle. Plusieurs scénarios existent, mais, de nos jours, le plus populaire reste celui de l'inflation cosmique (voir *La crise de croissance de l'Univers*, par A. Riazuelo, page 54).

### UNE ACCÉLÉRATION ANORMALE

Un caillou lancé en l'air s'élève, ralentit, puis retombe, sauf quand il est jeté à plus de 40 000 kilomètres par heure, il s'arrache alors à l'attraction terrestre et ne retombe pas. Dans les deux cas, la vitesse d'éloignement du caillou diminue toujours au cours du temps et s'annule avant qu'il ne retombe ou tend vers une constante (s'il ne retombe pas).

Ce phénomène devrait se produire à l'identique à l'échelle de l'expansion de l'Univers. En principe, les galaxies devraient s'éloigner les unes des autres, mais de plus en plus lentement, car leur attraction mutuelle devrait s'opposer au mouvement global d'expansion. Or la grande découverte cosmologique de la fin du xx<sup>e</sup> siècle a été que, loin de ralentir, cette expansion s'accélère au cours du temps!

Prenons deux galaxies suffisamment lointaines pour que leurs mouvements propres au sein de leur amas respectif soient négligeables devant le flot de l'expansion. Alors la vitesse à laquelle elles s'éloignent va croître, augmentant d'environ 10% en un milliard d'années. Toute se passe donc comme si une force supplémentaire, de nature répulsive cette fois, supplantait depuis cinq milliards d'années environ la force de gravité que nous connaissons, à moins, hypothèse privilégiée aujourd'hui, qu'une entité supplémentaire, l'énergie noire (ou énergie sombre) n'ait un effet répulsif vis-à-vis de la gravité.

De cette énergie sombre, on sait peu de chose, et même moins encore que pour la matière noire. On peut certes déterminer assez précisément sa densité d'énergie (l'équivalent de 3,45 nucléons par mètre cube, avec une incertitude de 2%), mais rien ne permet d'affirmer qu'elle s'incarne sous la forme de particules qu'on peut espérer détecter individuellement.

Peu d'espoir donc de détecter directement cette énergie sombre en laboratoire, tout au plus peut-on essayer de déterminer son comportement répulsif exact vis-à-vis de la gravitation, et si ses propriétés évoluent avec le temps. Aujourd'hui, l'énergie sombre semble se comporter de façon assez simple, et rester constante. Une telle évolution est néanmoins difficile à déterminer avec précision, aussi de nombreux scénarios la décrivant ont-ils été élaborés, de même que d'autres où cette énergie sombre n'existe pas. Dans ces derniers, les lois de la gravitation

diffèrent, à grande échelle, de celles que nous croyons connaître (voir *L'Univers au-delà des ténèbres*, par C. Deffayet, page 46).

### PRÉCIS, MAIS INEXPLICABLES

La densité de photons (413 par centimètre cube) est plus d'un milliard et demi de fois inférieure à celle des baryons (0,249 nucléon par mètre cube). L'essentiel des photons et des nucléons étant, nous l'avons dit, issus du Big Bang, ce rapport prévaut depuis les tout débuts de l'Univers. Il est inconfortable pour les scientifiques. En effet, quand l'Univers est très chaud, matière ordinaire et antimatière coexistent et ont, selon toute probabilité, des propriétés identiques. Les calculs indiquent

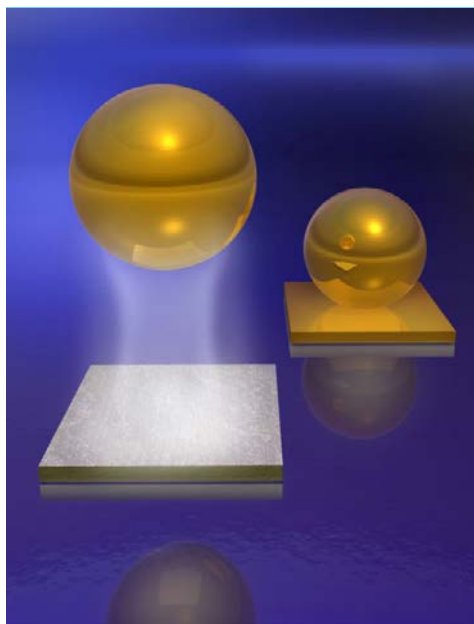
**L'Univers devrait être un million de milliards de fois moins fourni en matière que ce que l'on observe...**

par ailleurs que leur abondance commune était du même ordre que celle des photons au moment du Big Bang.

Mais à plus basse énergie, un peu après, les deux ne se comportent plus tout à fait pareil, et un léger déséquilibre est susceptible d'apparaître. Plus tard, à plus basse température, les deux s'annihilent en quantités exactement égales. Ne subsiste alors que la matière, celle dont nous sommes constitués, l'antimatière, minoritaire, ayant totalement disparu.

La très faible proportion de matière par rapport aux photons du rayonnement fossile est donc le reliquat de l'asymétrie entre matière et antimatière qui s'est produit à une époque lointaine. Cette asymétrie est en apparence faible, mais elle est en réalité considérable, car d'après le Modèle Standard de la physique des particules, cette asymétrie ne devrait pas excéder les  $10^{-25}$ . L'Univers devrait donc être un million de milliards de fois moins fourni en matière qu'observé. Comment dès lors expliquer que l'une soit prépondérante

En 1948, le physicien néerlandais Hendrik Casimir avait calculé que deux surfaces parfaitement conductrices séparées par du vide devaient s'attirer faiblement, cette force attractive a pour origine les fluctuations quantiques du vide. On peut mettre en évidence cet effet Casimir entre de la silice et de l'or séparés par du bromobenzène (ici, une vue d'artiste). Même si compte tenu des propriétés des matériaux employés la force en question est répulsive, les mêmes mécanismes en jeu sont identiques.



par rapport à l'autre? Ce désaccord entre théorie et expérience n'est pas le pire que nous réserve l'Univers.

Car un problème bien plus prégnant se pose aussi pour l'énergie noire. La physique des particules propose une explication simple à ce phénomène : ce pourrait être une manifestation de l'énergie du vide. Le vide, en physique des particules est l'état de plus basse énergie qui puisse exister, ce qui, intuitivement, correspond à l'absence totale de particules. Mais les incertitudes inhérentes au monde microscopique nous disent que le vide n'est jamais tout à fait vide.

Tout se passe comme s'il fourmillait de particules apparaissant soudainement par paires et s'annihilant presque immédiatement après. Ce phénomène, nommé fluctuations quantiques du vide, est intrinsèquement doté d'une énergie que l'on peut, dans certaines circonstances, mettre en évidence, par exemple par l'effet Casimir (voir la figure ci-dessus).

L'énergie du vide n'est donc pas une vue de l'esprit. Mais, via la loi  $E = mc^2$ , cette énergie doit forcément graviter. Or, en y regardant de plus près, la façon dont cette énergie du vide gravite est, d'après les calculs, exactement celle de l'énergie noire qui trouve là une justification toute naturelle.

Un problème de taille demeure néanmoins : la quantité d'énergie du vide devrait être considérablement plus grande que la quantité d'énergie noire observée, l'écart selon les estimations (entachées d'incertitude pour diverses raisons techniques) variant de  $10^{60}$  à...  $10^{121}$ . Insistons sur le fait que ce problème est fondamental. Si l'énergie noire dont nous observons les effets n'est pas due à l'énergie du vide, alors celle-ci est

strictement nulle, et on n'a aucune idée du pourquoi...

Quant à la matière noire, son abondance dépend des propriétés des particules qui la composent... et dont on ignore presque tout. Pendant longtemps, on a pensé qu'elle était constituée de particules massives équivalentes à quelques dizaines voire centaines de protons. De telles particules pouvaient le cas échéant interagir, quoique très faiblement, avec la matière ordinaire et être détectable par ce biais, par exemple par l'infime tintement d'un cristal de silicium qui aurait été heurté par une unique particule de matière noire. De nombreuses expériences de détection directe de la matière noire ont vu le jour, mais aucune particule de matière noire n'a encore été détectée, peut-être parce qu'elles interagissent trop faiblement avec la matière ordinaire, ou qu'elles sont de masse trop faible pour que ces rares interactions laissent une trace mesurable.

## AFFAIRE NON CLASSÉE

Longtemps la scientificité de la cosmologie a été mise en doute, au motif qu'elle s'intéressait à un objet unique, l'Univers, et surtout qu'elle ne disposait guère de données sur lesquelles appuyer les idées des théoriciens. Par exemple, au début des années 1980, le décalage vers le rouge n'avait été mesuré avec précision que pour quelques centaines de galaxies, un nombre qui a été multiplié par plus de 1000 depuis. De même, on ne savait quasiment rien du rayonnement fossile, alors que c'est aujourd'hui un des rayonnements les mieux cartographiés de l'Univers.

Dans les articles de *Pour la Science* d'il y a vingt ans consacrés à l'Univers, les auteurs annonçaient sans doute avec un optimisme prudent connaître les paramètres qui décrivent l'Univers. Aujourd'hui, ils ont gagné en assurance grâce à l'explosion des données observationnelles.

Mais pour autant, ces paramètres connus avec une précision certaine ne nous renseignent pas sur la nature profonde des phénomènes qui ont façonné l'Univers. Nous ignorons la nature de la matière noire, celle de l'énergie noire, nous ne savons pourquoi il y a 0,249 nucléon par mètre cube... Nous avons ainsi quelques détails de la « scène de crime », assez précis, mais nous ne savons pas très bien comment s'arrangent les pièces du puzzle.

La balle semble désormais dans le camp des théoriciens, des cosmologistes-profilers, qui ont fort à faire pour proposer des explications plus satisfaisantes que celles avancées jusqu'ici. À moins qu'une pièce à conviction inattendue ne vienne éclairer cette étrange affaire d'un jour nouveau. Dans tous les cas, elle est loin d'être classée. ■

## BIBLIOGRAPHIE

PLANCK COLLABORATION  
Planck 2015 results. XIII.  
Cosmological parameters  
A&A, vol. 594, A13, 2016.

## L'ESSENTIEL

● Les premiers noyaux d'atomes de l'Univers (de l'hydrogène au lithium) se sont formés durant les 20 minutes qui ont suivi le Big Bang.

● Cette nucléosynthèse primordiale est notamment gouvernée par l'expansion qui refroidit et dilate l'Univers.

● Les calculs théoriques sont en accord avec les observations. Cependant, le lithium pose encore problème.

● La nucléosynthèse est suffisamment établie pour aider à explorer une nouvelle physique non standard, en particulier au tout début de l'Univers.

## L'AUTEURE



ÉLISABETH VANGIONI  
astrophysicienne  
à l'Institut d'astrophysique  
de Paris, CNRS.

# LA NAISSANCE de la matière ordinaire

**La nucléosynthèse primordiale, c'est-à-dire la formation des premiers noyaux d'atomes, est l'un des piliers de la théorie standard du Big Bang. Elle est une des clés de la compréhension de l'origine de l'Univers.**

# E

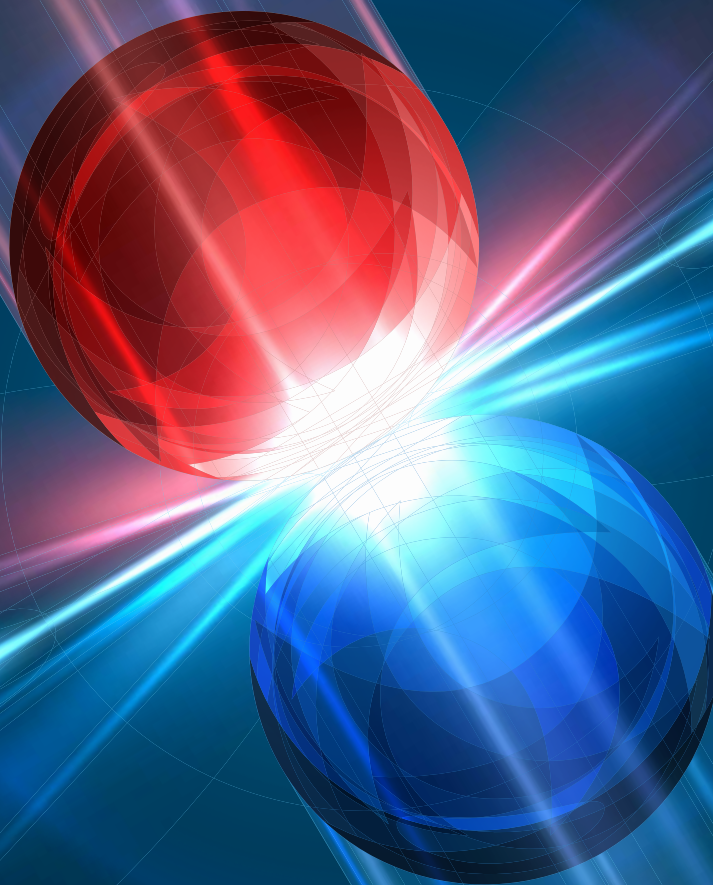
**En astronomie, l'observation du cosmos lointain est équivalente à un voyage dans le temps.** En effet, compte tenu de la vitesse constante de la lumière dans le vide, plus les objets astronomiques que nous voyons sont éloignés de nous, plus leur rayonnement a été émis tôt. Jusqu'où peut-on ainsi remonter dans le temps grâce à la lumière? Peut-on espérer

contempler les toutes premières étapes de l'évolution de l'Univers? Non, car une limite physique se dresse devant nous, infranchissable.

En réalité, le plus ancien rayonnement accessible – le fond diffus cosmologique, ou rayonnement fossile – a été émis environ 380 000 ans après le Big Bang. Auparavant, l'Univers était si chaud et si dense que tout photon libéré était immédiatement réabsorbé par la matière: l'Univers était opaque. Il n'est devenu transparent qu'ensuite, quand les photons ont pu voyager sans interagir avec la matière. Le début de l'Univers nous est-il pour autant à jamais interdit? Pas nécessairement, mais il faut compter sur autre chose que la lumière.

Une voie sans égale pour sonder les premiers instants de l'Univers est l'étude de la nucléosynthèse primordiale, c'est-à-dire la formation des premiers noyaux d'atomes qui a débuté seulement quelques secondes après le Big Bang.

À ce stade primordial, l'Univers est alors un plasma constitué de rayonnement et de particules



La fusion des baryons (*ici une vue d'artiste*), conduit à la fabrication des premiers noyaux d'atomes.

en interaction. Juste avant l'«ère de la nucléosynthèse primordiale», l'Univers était composé d'électrons, de positons (les antiparticules de l'électron), ainsi que de photons, de neutrinos et d'antineutrinos, cela en nombre comparable. Seule une pincée de protons et de neutrons (les baryons), était présente. On comptait au moins 1 milliard de photons pour chaque baryon.

### LE TAUX D'EXPANSION, MAÎTRE DE LA MATIÈRE

Les noyaux d'atomes produits ensuite, lors de la nucléosynthèse primordiale proprement dite, ainsi que leurs proportions relatives résultent, d'une part, d'une compétition entre les diverses réactions nucléaires (*voir la figure page suivante*) et, d'autre part, de la diminution de la température et de la densité. Le rythme de cette diminution est gouverné par le taux d'expansion de l'Univers.

Les paramètres physiques dont dépend la nucléosynthèse primordiale sont aujourd'hui

bien contraints: trois familles de neutrinos; un temps de vie du neutron de 885,7 secondes; une densité d'atomes actuelle (on parle de densité baryonique) d'environ  $5 \times 10^{-31}$  gramme par centimètre cube, une valeur déduite des mesures des anisotropies du rayonnement fossile.

Durant cette époque, entre 1 centième de seconde et 1 seconde après le Big Bang, le contenu de l'Univers était en équilibre thermique. La température était supérieure à 10 milliards de degrés, les particules mutaient constamment les unes en les autres, de sorte que la production de protons et de neutrons était en équilibre: leurs proportions, mesurées par le rapport neutrons/protons ( $n/p$ ) sont identiques;  $n/p$  est égal à 1.

Ensuite, lorsque la température atteint 10 milliards de degrés (en raison de l'expansion de l'Univers), les réactions produisant les neutrons à partir des protons ralentissent. Le taux de production des premiers devint inférieur à celui des seconds. Le rapport  $n/p$  est ainsi passé ainsi de 1 à 1/3. C'est alors que les protons et les neutrons >



> individuels issus de la soupe primordiale commencent à se rassembler pour former des noyaux plus lourds et plus complexes.

À peu près au même moment, l'interaction faible (l'une des quatre interactions fondamentales avec l'interaction forte, l'électromagnétisme et la gravitation) perd de son efficacité. De fait, cette force a un impact important seulement quand les particules subatomiques sont très proches et très énergétiques. Or en raison de l'expansion de l'Univers, ces conditions ne sont pas longtemps remplies, notamment pour les neutrinos. Ces particules n'étant sensibles qu'à l'interaction faible, elles ne peuvent plus engager de réactions aussi vite que les électrons et les positons, qui eux interagissent *via* l'électromagnétisme, beaucoup plus efficace dans les conditions ambiantes. Les neutrinos et les antineutrinos se «*découplent*» alors du reste de la matière et traversent l'espace sans interaction ou presque avec les autres particules.

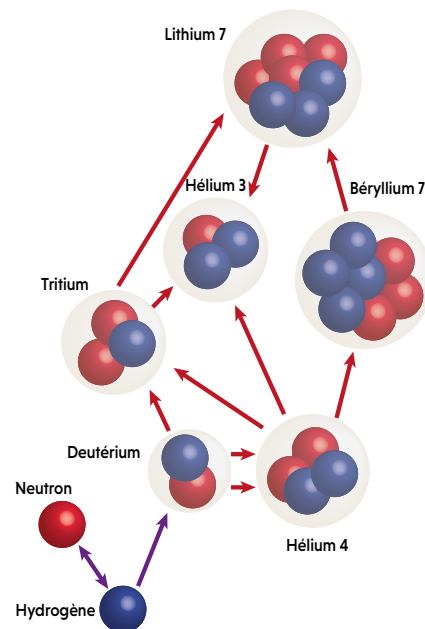
À ce moment, aucun noyau complexe ne peut encore se former de façon durable. Protons et neutrons pouvaient effectivement fusionner pour former des noyaux de deutérium, mais ces derniers, nucléairement très fragiles, se désagrégeaient aussitôt.

### LES NEUTRONS CÈDENT LE PAS

Au fil de l'expansion de l'Univers, la température chute encore, et avec elle, le rapport *n/p*. Après une centaine de secondes environ, il ne vaut plus que 1/7. Cette fois, la température de l'Univers est suffisamment basse pour autoriser la formation durable de deutérium. D'autres unions beaucoup plus stables sont également permises : deux neutrons et un proton en un noyau de tritium ; deux protons et un neutron en un noyau d'hélium 3 ; deux protons et deux neutrons en hélium 4. Ce noyau d'hélium 4 étant le plus stable (il a une grande énergie de liaison), presque tous les neutrons disponibles se sont retrouvés inclus dans de tels noyaux.

La proportion d'hélium 4 dans l'Univers, dépend donc de la valeur de *n/p* à l'instant où la synthèse du deutérium se produit et que les noyaux complexes commencent à se former. Avec un neutron pour sept protons (*n/p* = 7), un quart de ces baryons s'est transformé en hélium 4. En effet, à chaque fois qu'un neutron s'associe à un proton, six protons restent seuls. Quatre des seize baryons impliqués (deux neutrons et quatorze protons), donnent un noyau d'hélium. Ce qui produit au final un noyau d'hélium pour 12 noyaux d'hydrogène, soit environ He/H = 0,08. Enfin, puisque les protons et les neutrons ont essentiellement la même masse, 1/4 de la matière de l'Univers se transforme en hélium. Cette prédiction est confirmée par les observations spectroscopiques de l'hélium.

Le réseau des réactions nucléaires les plus importantes pour la nucléosynthèse primordiale (*ci-contre*). Parmi les noyaux produits, deux sont radioactifs : le tritium et le béryllium 7 qui se désintègrent respectivement en hélium 3 et en lithium 7. On compte ainsi 12 réactions essentielles, dont deux (*en violet*) ont été évaluées par la théorie, les autres (*en rouge*) l'ayant été en laboratoire. On peut suivre (par le calcul) l'évolution des abondances de ces différents noyaux en fonction du temps et de la température de l'Univers (*page ci-contre*). Dès que la température (*la courbe décroissante en violet*) devient inférieure à 200 millions de degrés, la nucléosynthèse se fige (les courbes des abondances restent horizontales). L'hydrogène (<sup>1</sup>H) est l'espèce la plus abondante avec 75% de la masse totale, suivi de l'hélium 4 (<sup>4</sup>He) avec 25%. Les autres isotopes sont à l'état de traces.



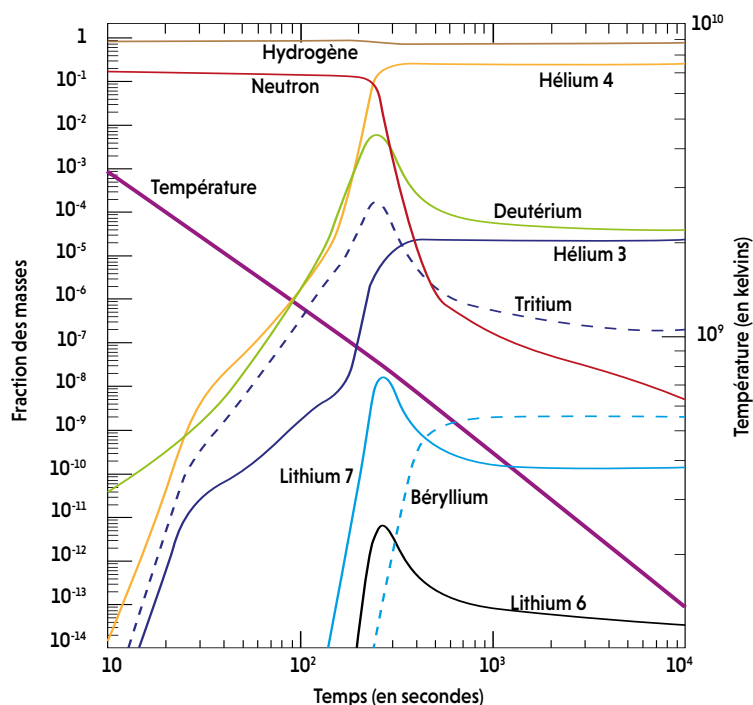
Ainsi, tous les baryons de l'Univers étaient soit sous forme de protons libres, ou noyaux d'hydrogène (75% de la masse), soit dans les noyaux d'hélium (25% de la masse). Quelques rares noyaux de deutérium, d'hélium 3 ainsi que de lithium 7, se retrouvent à l'état de trace. À une température d'environ 200 millions de degrés, 20 minutes après le Big Bang, les réactions nucléaires ne sont plus efficaces, la nucléosynthèse primordiale s'arrête et les abondances des isotopes se stabilisent (*voir la figure ci-dessus*).

Enfin, au bout de 380000 années, l'expansion ayant grandement refroidi le milieu, les électrons libres se lient à ces noyaux primordiaux pour former des atomes. L'Univers devient alors transparent car les photons peuvent désormais le traverser en ayant une très faible probabilité d'être absorbé par la matière cosmique. C'est, nous l'avons vu, la fin de la période opaque.

Les prédictions théoriques quant aux abondances des différents atomes, peuvent être confrontées aux mesures dans différents sites astrophysiques. Le deutérium, très fragile, est détruit dans les étoiles : son abondance décroît au cours du temps. Ainsi, les nuages de gaz situés à très grande distance (et donc primitifs) sont les mieux à même de nous renseigner sur le deutérium primordial. Leur étude révèle un rapport D/H (exprimé en nombre d'atomes) compris entre 2 et 3x10<sup>-5</sup>, ce qui est en accord avec les calculs de la nucléosynthèse primordiale.

À l'inverse du deutérium, l'abondance en hélium 4 croît continûment au cours de l'évolution, car cet atome est aussi produit par les étoiles. Aussi, la mesure de son abondance dans les régions HII (où l'hydrogène est ionisé) des galaxies peu évoluées chimiquement dites bleues





compactes est privilégiée et on y observe une fraction de masse d'hélium allant de 0,24 à 0,25. Là encore, les prédictions sont validées.

Le cas de l'hélium 3 est complexe, car certaines étoiles le produisent et d'autres le détruisent, de sorte que les prédictions sont hautement tributaires des modèles stellaires. Néanmoins, son abondance observée dans le disque de la Voie lactée ( $^3\text{He}/\text{H}$  égal à environ  $10^{-5}$ ) s'accorde avec les calculs théoriques.

Quant au lithium, son abondance est recherchée dans de vieilles étoiles du halo de notre Galaxie. Ces astres, de faible masse initiale, ont en conséquence une durée de vie très longue. Certains se sont formés à peine 1 milliard d'années après le Big Bang. Les valeurs observées de lithium dans ces étoiles présentent une caractéristique étonnante: elles sont presque indépendantes de l'enrichissement en éléments chimiques complexes et forment ainsi un plateau. L'abondance de lithium associée à ce plateau serait représentative de la valeur primordiale, en l'occurrence  $\text{Li}/\text{H} = 1 \text{ à } 2 \times 10^{-10}$ .

### LE PROBLÈME DU LITHIUM

Toutefois, un désaccord surgit quand on confronte ces observations aux résultats obtenus *via* l'étude du fond diffus cosmologique du satellite *Planck*. L'écart correspond à un facteur de l'ordre de 4 à 5. Comment réconcilier ces résultats apparemment incohérents? En d'autres termes, comment modifier l'abondance de lithium sans entraver l'ensemble du calcul? Plusieurs voies ont été explorées, en physique nucléaire, en physique des particules, en astrophysique, en cosmologie ou en physique fondamentale, mais sans succès jusqu'ici.

Malgré ce problème du lithium, la nucléosynthèse primordiale reste, au même titre que le rayonnement fossile, l'une des preuves les plus tangibles du Big Bang standard. Les modèles de nucléosynthèse primordiale permettent de calculer les abondances d'éléments concordant dans les grandes lignes avec les observations astrophysiques sur dix ordres de grandeur. De même, les paramètres physiques de la nucléosynthèse primordiale sont bien établis.

Pour autant, la matière ordinaire, c'est-à-dire la matière baryonique issue de la nucléosynthèse primordiale, ne représente qu'une faible proportion du contenu de l'Univers. En quoi consiste le reste? Pour répondre, nous devons nous intéresser à la densité critique de l'Univers. Dans le cadre de la relativité générale d'Einstein, la courbure de l'espace est directement liée à la densité de matière (ou d'énergie). La densité critique correspond à la valeur de la densité conduisant à un espace de courbure nulle à grande échelle.

Les derniers résultats du satellite *Planck* montrent que la densité totale est très proche de la densité critique. C'est là une prévision des modèles d'inflation, qui postulent une phase exponentielle d'expansion violente et très courte (voir *La crise de croissance de l'Univers*, d'A. Riazuelo, page 54): la géométrie de l'Univers serait donc euclidienne à grande échelle. Dans ce bilan, la densité de matière noire compte pour 26% de la densité d'énergie totale, la mystérieuse «énergie sombre» pour 69% et la matière baryonique, pour seulement 5%.

Les densités de matière noire et d'énergie sombre (95% de la substance de l'Univers!) n'influent en rien sur la nucléosynthèse primordiale, mais la compréhension de ces entités «sombres» passe par l'exploration de la matière ordinaire, les atomes.

En effet, malgré leur quantité relativement faible, toute l'information que nous pouvons obtenir provient *in fine* des baryons. Ils jouent donc un rôle de traceur cosmique essentiel et interviennent de façon centrale dans la chaîne théorique menant à la compréhension du contenu global de l'Univers.

Le calcul de la nucléosynthèse du Big Bang est suffisamment bien maîtrisé et solide pour l'utiliser désormais dans les tests de la physique fondamentale et aborder des questions telles que: les lois physiques sont-elles immuables? Ont-elles changé au cours de l'évolution? L'exploration d'une physique nouvelle non standard est à notre portée. Toutes les disciplines (la cosmologie primordiale, la physique des particules, la physique fondamentale, l'astrophysique...) s'appuient désormais sur la nucléosynthèse primordiale, cette étape cruciale de l'évolution de l'Univers, pour en tester et contraindre les multiples aspects. ■

### BIBLIOGRAPHIE

A. COC ET E. VANGIONI  
Primordial nucleosynthesis  
*Int. J. Mod. Phys. E*,  
vol. 26, 1741002, 2017.

A. COC ET AL.,  
Standard Big Bang  
nucleosynthesis and primordial  
CNO abundances after Planck,  
*JCAP*, vol. 10, 050, 2014.

E. VANGIONI  
*La nucléosynthèse primordiale*,  
IN J. AUDOUZE  
*Le ciel à découvrir*,  
CNRS Editions, 2010.

## L'ESSENTIEL

- L'Univers serait constitué à environ 80 % d'une matière inconnue, la matière noire, que l'on n'a pas encore détectée.
- Les modèles sur lesquels se fonde la recherche de cette matière postulent qu'elle n'est composée que d'un seul type de particules.
- Pourtant, la matière noire pourrait rassembler plusieurs types de particules interagissant à peine avec la matière ordinaire, ce qui expliquerait l'absence de détection.
- Dans certains scénarios, la matière noire formerait par exemple des « atomes », ou un disque à l'échelle de la galaxie.

## LES AUTEURS



BOGDAN DOBRESCU est physicien des particules au Fermilab, aux États-Unis.



DON LINCOLN est chercheur au Fermilab et travaille sur les données du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern.

# L'insaisissable MATIÈRE NOIRE

**Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou bien parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?**

# L

La galaxie d'Andromède, notre voisine céleste, pose problème : elle tourne trop vite sur elle-même ! En effet, les lois connues de la physique sont incapables d'expliquer sa cohésion. La gravité engendrée par la matière visible de la galaxie est trop faible pour retenir les étoiles à sa périphérie qui, filant à toute vitesse, devraient être projetées hors de la galaxie. Si la

matière existante se résumait à la matière visible, Andromède, comme presque toutes les galaxies spirales, ne devrait tout simplement pas exister.

Pourtant, elle est bien là. Pour l'expliquer, les cosmologistes pensent qu'un type de matière invisible – la matière noire – entoure et imprègne Andromède et les autres galaxies, apportant le supplément de force gravitationnelle nécessaire pour en maintenir la cohésion. Cette matière noire représenterait plus de 80 % de la matière contenue dans l'Univers.

Dans les théories les plus simples, la matière noire est composée d'un unique type de particules, qui reste à identifier, car des décennies de recherche n'ont pas permis sa détection. De plus, quelques désaccords subsistent entre les observations astronomiques et cette théorie >



La galaxie d'Andromède, comme la plupart des galaxies spirales, tourne trop vite sur elle-même pour que la force gravitationnelle due à sa matière visible assure sa cohésion. Pour expliquer cette rotation rapide, les physiciens supposent que la galaxie est nimbée d'un halo sphérique de matière noire, une substance abondante dans l'Univers mais qui échappe à toute détection directe.



➤ simple. Combinés, ces désaccords résiduels et l'échec de la détection conduisent certains à remettre en cause la piste d'un seul type de matière noire. En effet, l'absence de détection est une information en soi, dont on déduit des contraintes sur certaines propriétés de la matière noire. Par exemple, on peut calculer une limite supérieure à la probabilité d'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire. Et ces contraintes sont de plus en plus sévères et d'autant moins compatibles avec un modèle de matière noire à un seul type de particules.

Certains physiciens explorent des scénarios qui se dispensent de matière noire. Par exemple, ils étudient des théories où les lois de la gravitation sont modifiées et dont le comportement s'écarte de la mécanique newtonienne pour des accélérations extrêmement faibles, comme dans les régions périphériques des galaxies. Cette approche reproduit de façon satisfaisante la rotation des galaxies spirales. Mais elle a ses défauts et requiert, par exemple, l'ajout de matière invisible pour décrire la dynamique des amas de galaxies.

De nombreux physiciens restent convaincus par l'hypothèse de la matière noire, car elle explique une grande variété d'observations astronomiques et cosmologiques: le mouvement des galaxies au sein des amas galactiques, la distribution de la matière à l'échelle de l'Univers, la dynamique de la matière lors d'une collision de deux amas ou le phénomène de lentilles gravitationnelles.

Dès lors, si l'hypothèse de la matière noire semble fondée, mais que le scénario à un seul type de particules n'est pas satisfaisant, on doit envisager que la matière noire puisse être plus complexe. Après tout, la matière ordinaire se présente bien sous de nombreuses formes, pourquoi la matière noire serait-elle moins riche ?

Ces dernières années, des physiciens ont exploré cette possibilité. Elle pourrait impliquer un nouveau type de forces jusque-là insoupçonnées, agissant fortement sur la matière noire et très faiblement, voire pas du tout, sur la matière ordinaire. Des observations récentes de collisions de galaxies apporteraient un premier soutien à cette hypothèse. De tels modèles expliqueraient de façon plus naturelle l'absence de signaux de la matière noire dans les différentes expériences actuelles et proposent des solutions à certaines difficultés théoriques posées par les modèles simples. Si la matière noire complexe existe, l'Univers est alors encore plus riche et fascinant qu'on ne l'imaginait.

Bien que nous ne sachions pas encore de quoi est constituée la matière noire, nous en déduisons certaines propriétés grâce à son influence sur la matière ordinaire, par des observations ou des simulations numériques. Par exemple, les particules qui composent la matière noire sont probablement assez lourdes. Des

particules de matière noire légères fileraient à une vitesse proche de celle de la lumière et ne se seraient pas accumulées dans des régions de l'Univers primordial qui sont à l'origine des grandes structures observées aujourd'hui.

## PORTRAIT ROBOT DE LA MATIÈRE NOIRE

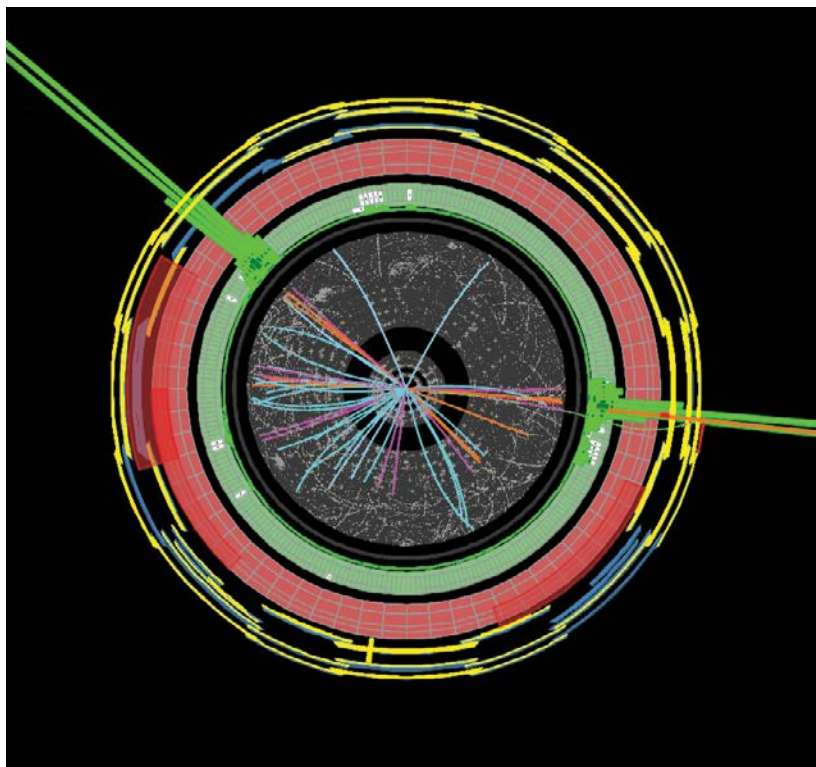
Parce qu'elles n'absorbent pas de rayonnement électromagnétique et n'en émettent pas, elles doivent être électriquement neutres. Elles ne sont pas non plus sensibles à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques, sinon nous en aurions vu des signes dans l'interaction de la matière noire avec les particules chargées de haute énergie que sont les rayons cosmiques. La matière noire pourrait cependant interagir avec la matière ordinaire *via* l'interaction faible, mais les expériences montrent que si de telles interactions sont possibles, elles sont extrêmement rares.

**La matière noire, dans certains modèles, formerait des sortes d'atomes qui échangeraient des photons sombres**

Nous savons aussi que la matière noire est stable aux échelles de temps cosmiques: elle ne se désintègre pas. En effet, la totalité de la matière noire a été produite dans les premiers instants du Big Bang, car nous ne connaissons pas de mécanisme qui aurait pu en produire en grande quantité depuis cette époque. Or, en principe, une particule massive se désintègre plus ou moins vite en particules plus légères. Si elle ne le fait pas, c'est qu'une certaine grandeur associée à cette particule doit être «conservée».

Illustrons ce principe avec l'électron. Il est électriquement chargé, et les seules particules plus légères connues, le neutrino et le photon, sont électriquement neutres. Des considérations énergétiques permettraient à l'électron de se désintégrer en ces particules, mais la





L'expérience Atlas du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, pourrait détecter des signaux trahissant la production de particules de matière noire et confirmer ou infirmer des modèles théoriques postulant l'existence de photons sombres.

conservation de la charge interdit de telles désintégrations. L'électron est, de fait, stable.

Dans la plupart des théories, les particules de matière noire ont une quantité conservée nommée «parité» qui vaut  $-1$ , tandis que les autres particules connues ont une parité de  $+1$ . La désintégration d'une particule de matière noire en particules ordinaires ne conserverait pas la parité: la particule de matière noire est donc stable.

La théorie la plus simple, et satisfaisant à toutes les conditions listées ci-dessus, postule un unique type de particules formant la matière noire, le «wimp» (pour *weakly interacting massive particle*, soit particule massive interagissant faiblement). Le terme «faiblement» est utilisé ici au sens large, et ne se réfère pas seulement à l'interaction faible. Plusieurs arguments théoriques sont en faveur de l'hypothèse des wimps (par exemple, la production de matière noire estimée dans les premiers instants de l'Univers est du même ordre de grandeur que le recensement qu'on en fait dans l'Univers actuel). Mais si les wimps existent, leur détection semble plus difficile que les physiciens ne s'y attendaient.

Depuis les années 1990, les physiciens ont mis en place de nombreuses expériences pour détecter les wimps par le biais de leurs très rares interactions avec la matière ordinaire. Afin de parvenir à la sensibilité nécessaire, les détecteurs sont refroidis à des températures très

basses et installés sous terre pour les protéger des rayons cosmiques. Malgré des expériences de plus en plus précises, aucun signe concluant de wimps n'a émergé. On peut supposer que les interactions sont si rares qu'elles restent en deçà du seuil de détection des expériences, mais de telles caractéristiques ne s'accordent pas de façon naturelle avec le modèle des wimps.

Par ailleurs, ce modèle prévoit que les petites galaxies satellites en orbite autour de la Voie lactée devraient être bien plus nombreuses que celles observées. Cependant, la situation évolue rapidement; la découverte récente par la collaboration DES (*Dark Energy Survey*) de galaxies satellites supplémentaires suggère que les galaxies naines satellites de la Voie lactée n'auraient tout simplement pas encore été trouvées.

## LE CÔTÉ OBSCUR DES PHOTONS

Pour expliquer de façon plus naturelle la non-détection de matière noire, certains physiciens ont commencé à explorer des modèles de matière noire moins classiques. Une piste consiste à supposer qu'il existe plus d'un type de particules de matière noire et que celles-ci seraient sensibles à une force qui n'agirait pas sur la matière ordinaire.

Dans ces modèles, ces particules porteraient, par exemple, un nouveau type de «charge sombre», attractive ou répulsive tout en les laissant électriquement neutres. De la même façon que les particules ordinaires dotées d'une charge électrique peuvent émettre des photons (les particules de lumière, vectrices de l'interaction électromagnétique), ces hypothétiques particules dotées de cette charge sombre pourraient émettre des «photons sombres».

On retrouve des lois qui rappellent celles de la matière ordinaire sans pour autant en être une réplique exacte. Par exemple, l'échange de photons noirs entre particules de matière noire doit être moins fréquent que l'échange de photons pour la matière ordinaire. L'une des raisons est la suivante. Au sein de la matière ordinaire, l'émission de photons permet aux particules d'échanger de l'énergie. Cela a une conséquence importante sur la formation des galaxies. Les nuages de gaz au sein d'une galaxie en formation rayonnent de l'énergie, ce qui a pour effet d'agréger la matière au sein des nuages. La conservation du moment cinétique (qui mesure une rotation) empêche la matière de se contracter jusqu'à un certain point, et la structure forme un disque. Si les particules de matière noire émettaient des photons sombres comme la matière ordinaire échange des photons, on aurait aussi des disques de matière noire. Or pour expliquer la forme des galaxies, la matière noire devrait être plutôt distribuée sous la forme d'un nuage sphérique, le «halo».

Avec des échanges de photons noirs limités, la perte d'énergie du halo de matière noire serait minime. On peut cependant imaginer des ➤



➤ modèles où une petite fraction de la matière noire échange des photons noirs en grande quantité, tandis que la majeure partie se comporterait plutôt comme de simples wimps. Les théoriciens, dont l'un de nous (Bogdan Dobrescu), étudient ces différentes possibilités en prenant en compte les limites imposées par les expériences actuelles. L'un des scénarios les plus simples implique deux sortes de particules de matière noire et offre un aperçu de la physique qui pourrait être à l'œuvre dans ce domaine.

Imaginez un univers où il existe une particule avec une charge sombre positive et son homologue de charge négative. Dans ce modèle, il y aurait une forme d'électromagnétisme sombre, conduisant les particules de matière noire à émettre et absorber des photons sombres. Et de la même façon qu'une particule de matière ordinaire et son homologue d'antimatière, de charge opposée, s'annihilent en libérant des photons, deux particules de matière noire de charges sombres opposées s'annihileraient en photons sombres.

Comme nous l'avons vu, ces échanges de photons sombres influeraient sur la forme des galaxies. Les physiciens utilisent ces contraintes pour estimer l'intensité de l'interaction électromagnétique sombre et la fréquence à laquelle se produit l'annihilation de la matière noire. Cette interaction ne doit pas être trop forte pour maintenir un halo sphérique autour des galaxies. En 2009, Lotty Ackerman, Matthew Buckley, Sean Carroll et Marc Kamionkowski, tous alors à l'Institut de technologie de Californie, ont montré que

cette contrainte implique que la charge liée à l'interaction sombre doit être très petite, environ 1% de la valeur de la charge électrique.

Jusqu'à présent, nous avons décrit une version de la matière noire comportant simplement une particule sombre chargée et son homologue de charge opposée, qui échangent des photons sombres. Ce scénario reste simple comparé à la complexité de la matière ordinaire. À quoi ressemblerait un univers de matière noire avec plus de particules dotées de charges sombres?

**ATOMES ET MOLÉCULES NOIRES**

Un exemple intéressant a été proposé en 2013 à l'université Harvard par JiJi Fan, Andrey Katz, Lisa Randall et Matthew Reece. Ces chercheurs ont développé un scénario de « matière noire interagissant partiellement ». Ils ont supposé que l'essentiel de la matière noire était constitué de wimps, et qu'une petite composante comprenait deux types de particules, les unes lourdes et les autres légères. En outre, à l'instar des protons et des électrons, ces particules porteraient une charge sombre et échangeraient des photons sombres.

Il faut se garder de surinterpréter la correspondance, mais la situation proposée revient, à peu de chose près, à postuler un proton et un électron sombres, ainsi qu'un photon sombre pour porter l'électromagnétisme sombre qui les lie. Il n'est pas exclu que ces particules sombres se combinent pour créer des atomes sombres ou même des molécules sombres, avec toute une chimie associée.

Xenon1T est le plus gros – donc le plus sensible – détecteur de matière noire. Il est enfoui dans les souterrains du laboratoire national du Gran Sasso.



© COLLABORATION XENON

Les auteurs de ce modèle ont calculé une limite supérieure à la fraction de matière noire qui pourrait interagir avec les photons sombres, au regard des contraintes imposées par les observations astronomiques. Ils ont déterminé que cette part de la matière noire aurait une masse globale comparable à celle de toute la matière visible. Dans ce modèle, la Galaxie aurait trois composantes : un grand nuage sphérique de particules de type wimps, qui représente 70 % de toute la matière, et deux disques aplatis, contenant chacun 15 % de la matière, l'un en matière ordinaire (la Voie lactée que nous voyons, par exemple), l'autre en matière noire interagissant fortement avec elle-même. Les deux disques seraient alignés ou à peine inclinés l'un par rapport à l'autre. Ainsi, une « galaxie » de matière noire coexisterait dans le même espace que la Voie lactée. Cependant, dans cette galaxie sombre, la matière noire ne formerait ni étoiles sombres ni grosses planètes sombres. En effet, de tels objets massifs

**Une « galaxie »  
de matière noire  
coexisterait dans  
le même espace  
avec la Voie lactée**

seraient aisément détectés par des effets de lentille gravitationnelle : en courbant localement l'espace-temps, ces astres sombres dévièrent la lumière qui nous parvient depuis des étoiles de matière ordinaire.

L'hypothèse d'un secteur sombre complexe offre de riches possibilités avec des conséquences astrophysiques intéressantes, mais comment tester ces modèles ? Les physiciens recherchent la matière noire complexe de la même façon que les wimps : à l'aide de détecteurs souterrains. Un modèle où la matière noire interagit partiellement, tel celui proposé par JiJi Fan et ses collègues, présente un intérêt particulier pour les expériences de détection directe : le disque de matière noire situé dans le même plan que celui de la Voie lactée se traduit par une densité de matière noire plus importante que dans le simple modèle des wimps.

Cela impliquerait des chances de détection plus élevées, même si l'absence de signal montre que cette probabilité est malgré tout très faible.

Outre les expériences de détection directe, les physiciens espèrent créer de la matière noire dans les accélérateurs de particules. Comme ils ont peu d'indications sur la façon dont la matière noire interagit avec la matière ordinaire (et donc sur les processus spécifiques susceptibles d'en fabriquer dans l'accélérateur), ils étudient aussi bien des modèles à simples wimps que ceux à secteur sombre plus complexe.

## DE LA MATIÈRE NOIRE AU LHC

Le LHC (grand collisionneur de hadrons) du Cern, près de Genève, est l'accélérateur le plus puissant du monde et peut donc sonder des scénarios à versions lourdes de la matière noire (en vertu de la relation  $E=mc^2$ , plus une particule est massive, plus il faut d'énergie pour la produire dans un accélérateur). Ces particules de matière noire ne seraient pas directement visibles dans les détecteurs du LHC, car elles traverseraient les capteurs sans interagir. Les physiciens tentent de déduire leur présence de façon indirecte. Comme l'énergie est conservée, les chercheurs comparent l'énergie de la collision à celle de toutes les particules produites par la collision.

S'il manque de l'énergie dans le bilan, c'est peut-être qu'une particule de matière noire non détectée a emporté l'énergie qui fait défaut. Une perte d'énergie peut avoir d'autres explications : une particule qui passe entre les détecteurs, un neutrino qui n'interagit que rarement... Il n'est donc possible de conclure qu'en analysant un grand nombre de collisions. Concrètement, les physiciens calculent combien de collisions produisent une signature particulière d'énergie manquante, avec ou sans la présence de matière noire, et comparent aux données.

Jusqu'à présent, aucun signe de matière noire n'a été identifié au LHC, ce qui indique que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont très rares, si toutefois il s'en produit. Le LHC continue de prendre des données à plus haute énergie, ce qui augmente nos chances de découvrir un jour la matière noire.

De l'autre côté des Alpes, en Italie, le laboratoire national du Gran Sasso traque la matière noire grâce au détecteur le plus sensible à ce jour, Xenon1T (voir la figure page ci-contre). Inauguré fin 2015, il est composé d'une cuve contenant près d'une tonne de xénon liquide à une température de  $-95$  °C. Si une particule de matière noire entre en collision avec un atome de xénon, elle déclenche un signal enregistré par des capteurs. La collaboration a publié ses résultats en mai 2017 issu d'une première campagne de mesures effectuées durant 34,2 jours (un tremblement de terre a interrompu la campagne).

Parmi les 63 interactions observées, aucune n'est imputable à un wimp. Ces résultats sont >

➤ tout de même importants, car ils permettent aux physiciens d'évaluer le taux de bruit de fond, en l'occurrence  $1,93 \cdot 10^{-4}$  événements/(kg.jour.keV), dû à la radioactivité ambiante notamment. C'est un record de «silence», indispensable pour une recherche directe de matière noire. La traque continue...

Dans les expériences de détection directe et de production, les physiciens font l'hypothèse que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont beaucoup plus fortes que la gravitation (la plus faible de toutes les interactions), mais assez faibles pour ne pas encore avoir été observées. Cette hypothèse est nécessaire, car si la matière noire n'interagit que de façon gravitationnelle – dans cette éventualité, on parle parfois de «superwimps» –, nous ne l'observerons jamais dans ces expériences.

En plus des recherches de matière noire que nous venons de décrire, et qui conviennent pour trouver à la fois des wimps et de la matière noire complexe, certaines approches visent plus spécifiquement le secteur sombre complexe. Celles-ci ciblent en particulier le photon sombre qui, dans certains modèles, peut spontanément se transformer en photon ordinaire et se retransformer en photon sombre en vertu des lois de la physique quantique. Or le photon ordinaire est détectable.

De plus, si le photon sombre a une masse non nulle (le terme de «photon» est alors un peu abusif puisqu'un photon n'a *a priori* pas de masse), le photon ordinaire produit peut avoir assez d'énergie pour créer une paire constituée d'un électron et de son homologue d'antimatière, le positron, ou une paire muon-antimuon (le muon étant un cousin, plus lourd, de l'électron).

Partant de ce scénario, plusieurs collaborations expérimentales, dont une à laquelle participe l'un de nous (Don Lincoln), étudient la production de paires électron-positron ou muon-antimuon dans des accélérateurs de particules. Si des photons sombres existent et interviennent dans le processus, les caractéristiques des paires seront altérées. Des études de ce genre sont en cours au LHC et dans d'autres accélérateurs, tel le projet *KLOE-2*, en Italie, les expériences *HPS* et *BaBar*, aux États-Unis.

Le Fermilab, près de Chicago, offre une autre piste intéressante. Les physiciens y produisent actuellement des faisceaux intenses de neutrinos dirigés vers des détecteurs lointains. Les neutrinos sont des particules très légères, qui interagissent avec les électrons des détecteurs par l'interaction faible (en échangeant un boson *W*). Il est possible de calculer la probabilité d'interaction selon ce processus. Mais, si les photons sombres existent, les neutrinos interagissent aussi avec les électrons du détecteur en échangeant un photon sombre. Et cela

modifie les probabilités d'interaction. Il serait possible de mesurer ces interactions neutrino-électron dans les expériences *MiniBOONE*, *MINOS* ou *NOVA* du Fermilab.

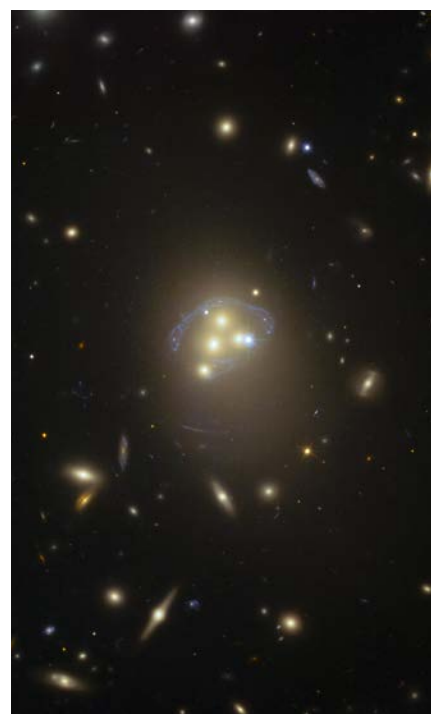
Enfin, les scientifiques recherchent des indices astrophysiques de l'interaction de la matière noire dans des situations telles que les collisions de galaxies. Quand la matière noire d'une galaxie heurte celle d'une autre galaxie, les particules devraient se repousser en échangeant des photons sombres. Plusieurs études de collisions de galaxies n'ont pas permis de trouver d'indices de ce phénomène, mais, en 2015, l'observation de l'amas Abell 3827, particulièrement proche de la Terre et bien orienté, a suggéré un tel motif (*voir la photo ci-contre*). C'est un premier indice en faveur d'une matière noire complexe, mais des observations complémentaires de ces galaxies et d'autres sont nécessaires pour le confirmer.

## LES ÉPICYCLES DU XXI<sup>e</sup> SIÈCLE ?

Nous sommes indiscutablement confrontés à une énigme profonde. À grande échelle, de nombreuses observations s'expliquent par la présence de matière noire, sous une forme ou sous une autre. L'échec de la détection directe de matière noire souligne l'urgence qu'il y a à identifier la nature de la matière noire. Là où les modèles de wimps ont du mal à expliquer cette non-détection, les modèles complexes s'en accommodent plus naturellement, dans la mesure où ils reposent sur un nombre plus grand de paramètres à ajuster.

On pourrait adresser une critique à cette approche: on se donne beaucoup de mal pour maintenir en vie l'hypothèse de la matière noire. La situation est-elle analogue à celle des épicycles, quand les astronomes du XVI<sup>e</sup> siècle tentaient à tout prix de sauver le géocentrisme en ajoutant une série constante d'ajustements à une théorie nécessairement défectueuse? Ce n'est pas notre avis: la matière noire explique remarquablement bien de nombreuses énigmes astronomiques, et il n'y a *a priori* pas de raison pour que la matière noire soit aussi simple que dans le modèle des wimps – le plus répandu car le plus simple à étudier.

Par ailleurs, les modèles de matière noire complexe apportent des solutions à certaines difficultés théoriques des wimps. Par exemple, dans les simulations numériques de formation des galaxies, les modèles de wimps prévoient des halos ayant une densité très élevée au centre, ce qui ne s'accorde pas avec les observations. Les modèles de matière noire complexe aplanissent, eux, la distribution au centre. Il y a donc plus d'un intérêt à explorer ces modèles complexes. En outre, tant que nous ne trouverons pas la solution au mystère de la composition du cosmos, nous devons être ouverts à la multitude d'explications possibles. ■



Dans l'amas Abell 3827, quatre galaxies sont entrées en collision. Des astrophysiciens pensent avoir détecté les signes d'une interaction des halos de matière noire qui entourent chacune lors de cet événement.

## BIBLIOGRAPHIE

E. APRILE ET AL., First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment, <https://arxiv.org/pdf/1705.06655.pdf> 2017.

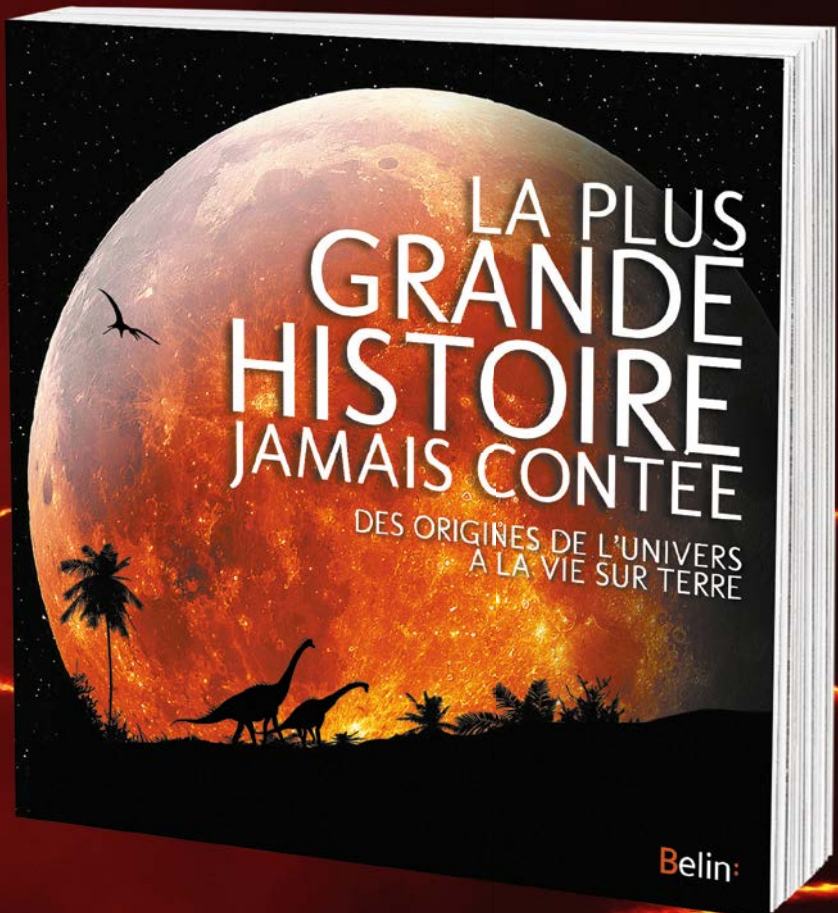
K. FREESE, *The cosmic cocktail: Three parts dark matter*, Princeton University Press, 2014.

JIJI FAN ET AL., Dark-disk universe, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110(21), art. 211302, 2013.

D. E. KAPLAN ET AL., Atomic dark matter, *JCAP*, vol. 2010(5), article 21, 2010.

L. ACKERMAN ET AL., Dark matter and dark radiation, *Phys. Rev. D*, vol. 79(2), article 023519, 2009.





25 X 25 cm - 224 pages + 224 pages cahier photo - 38 €

# Un voyage unique dans l'histoire de l'Univers, de la Terre et du vivant

En librairie  
le 19 octobre



**Belin:**  
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter sur [www.belin-editeur.com](http://www.belin-editeur.com)

[/EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions\\_belin](https://twitter.com/editions_belin)



# La chasse AU SUPERVIDE

Dans le fond diffus cosmologique, une zone apparaît anormalement froide. Comment l'expliquer ? Peut-être par une vaste région où la matière se fait rare.





### L'ESSENTIEL

● Le fond diffus cosmologique, la lumière émise par l'Univers à l'âge de 380 000 ans, présente un étrange « point froid », une zone où la température associée aux photons est inférieure à la moyenne.

● Une explication possible serait une vaste région d'espace relativement vide. La lumière qui la traverserait aurait

tendance à perdre de l'énergie (devenir plus froide) à cause d'un effet produit par l'expansion accélérée de l'Univers.

● Les astronomes ont récemment découvert un tel supervide s'étendant sur 1,8 milliard d'années-lumière et aligné avec le point froid.

### L'AUTEUR



**ISTVÁN SZAPUDI** chercheur à l'Institut d'astronomie de l'université de Hawaï. Il étudie la cosmologie et la structure de l'Univers à grande échelle.

# V

**vous voulez apercevoir la lumière la plus ancienne de l'Univers? Rien de plus simple : allumez un vieux poste de télévision !** Réglé entre deux chaînes, l'écran est constellé de minuscules points qui correspondent au fait que l'antenne est bombardée en permanence par des photons dont certains ont été émis environ 380 000 ans après le Big Bang, il y a quelque 13,8 milliards d'années. Ces photons volent à travers l'espace dans toutes les directions, et correspondent à une température moyenne de 2,7 kelvins ( $-270,45^{\circ}\text{C}$ ). Ils forment le fond diffus cosmologique. La carte bidimensionnelle de ce rayonnement est en quelque sorte la première photographie de l'Univers, dans sa prime jeunesse (voir *L'étrange affaire Univers*, de A. Riazuelo, page 16).

Cette photo présente de petites imperfections. La température fluctue d'environ  $10^{-5}$  à  $10^{-4}$  kelvin autour de la valeur moyenne. On parle d'anisotropies du fond diffus. Ainsi, certaines régions de la carte semblent un peu plus froides,

Un nuage moléculaire opaque masque la lumière venant de l'arrière-plan et crée l'illusion d'une zone vide dans l'Univers. Mais c'est bien une véritable région cosmique vide que traquent les astrophysiciens.

d'autres plus chaudes. Les cosmologistes analysent ces anisotropies pour déterminer certaines caractéristiques de l'Univers primordial.

La carte du fond diffus cosmologique souffre aussi d'anomalies que les théories cosmologiques standard ne peuvent expliquer entièrement. La plus grande de ces anomalies, initialement repérée en 2004 sur la carte du fond diffus établie par la sonde WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), est le « point froid », une zone du ciel couvrant environ vingt fois la largeur de la pleine lune, où les photons sont inhabituellement froids. Pour certains, cette structure casse la majestueuse symétrie du fond diffus; pour d'autres, elle met en valeur les traits de l'Univers et ajoute à son mystère. Je fais partie du second camp: dès sa découverte, cette anomalie et ce qu'elle cache m'ont fasciné.

## JOUER À PILE OU FACE AVEC L'UNIVERS

Cette énigme a suscité beaucoup de débats parmi les chercheurs. Une première explication est tout simplement qu'elle serait le fruit du hasard, une accumulation fortuite de photons froids sans cause spécifique. Par analogie, cette idée revient à tirer dix fois de suite pile avec une pièce non truquée: la probabilité est faible, mais non nulle. Dans le cas du point froid, la probabilité que le hasard en soit à l'origine est faible, de l'ordre de 0,5%. D'autres explications ont été proposées, des plus triviales aux plus fantaisistes, allant de problèmes techniques avec les instruments qui analysent le cosmos à la suggestion que la région froide serait un portail vers un autre univers ou vers des dimensions cachées.

En 2007, avec d'autres astrophysiciens, nous avons proposé l'idée qu'un tel point froid pouvait se former s'il existait dans la >



> même région du ciel un supervide, c'est-à-dire une vaste région d'espace relativement dépourvue de matière et de galaxies. Ce vide serait le lieu le plus vide de l'espace, un désert gigantesque entouré d'un environnement plus dense. Depuis, mes collègues de l'université de Hawaï et moi-même avons confirmé l'existence du vide, et nous avons trouvé des indices tendant à prouver qu'il pourrait bien rendre compte du point froid.

## LA TRAVERSÉE D'UN VIDE

Nous en sommes venus à envisager l'existence d'un supervide en considérant la manière dont nous pensons que la lumière interagit avec les vides plus petits. Le supervide postulé serait extrême, mais les vides ordinaires de taille moyenne (des zones contenant relativement peu de galaxies) sont assez répandus dans l'Univers. C'est aussi le cas de leurs contraires, les amas, qui sont de grandes congrégations rassemblant jusqu'à un millier de galaxies.

Les cosmologistes pensent que les germes des vides et des amas sont apparus très tôt dans l'Univers, quand des processus quantiques aléatoires ont produit une légère surdensité de matière dans certaines parties de l'espace et une sous-densité dans d'autres. La masse plus importante des régions de surdensité a produit une attraction gravitationnelle plus forte qui a attiré davantage de matière vers elles au fil du temps, au détriment des régions de sous-densité. Les premières ont fini par devenir des amas, et les secondes des vides.

Pour comprendre l'effet de ces vides contenant peu de matière sur la lumière qui les traverse, partons d'une analogie. Ces vides se comportent avec tout ce qui les traverse comme des collines parcourues par une balle (voir l'encadré page 37). Dans un premier temps, quand une particule pénètre dans le vide, elle s'éloigne de régions environnantes de densité supérieure qui exercent une force gravitationnelle tendant à la retenir. Elle ralentit comme une balle qui roulerait en remontant la pente. Dans un second temps, alors que la particule commence à sortir du vide, elle se rapproche de zones denses qui l'attirent. La particule accélère comme une balle dévalant la colline.

Les photons du fond diffus se comportent de façon analogue, sans pour autant changer de vitesse (la vitesse de la lumière est toujours constante) : ils perdent de l'énergie puis en gagnent, ce qui se traduit par une variation de leur longueur d'onde, qui est directement proportionnelle à leur température. Quand un photon pénètre dans un vide, il grimpe la colline et perd de l'énergie, en d'autres termes il se refroidit. En descendant la colline de l'autre

côté, le photon récupère son énergie. Par conséquent, il arriverait de l'autre côté avec la même température qu'il avait au départ... si l'Univers était statique ou en expansion constante (auquel cas l'effet serait infime).

Or ce n'est pas le cas. Depuis les travaux d'Edwin Hubble, on sait que l'Univers est en expansion. Mais ces deux dernières décennies, grâce à l'étude des supernovæ de type Ia (des explosions d'étoiles particulières), les chercheurs ont découvert que cette expansion accélère. La plupart des cosmologistes attribuent cette accélération à l'énergie sombre, un élément de nature inconnue présent dans tout l'espace qui semble contrer l'attraction gravitationnelle.

L'accélération de l'Univers complique le scénario de la colline : dans la perspective de notre photon du fond diffus, cela signifie que pendant qu'il traverse le vide, celui-ci s'est agrandi, mais aussi tout l'espace qui l'entoure. En d'autres termes, quand le photon arrive de l'autre côté, il trouve un espace de densité

**Le supervide nous permettrait de tester des théories se substituant à celle de la relativité générale**

énergétique inférieure à celle qu'il avait quittée en entrant dans le vide, ce qui revient à dire que la plaine entourant la colline s'est surélevée, de telle sorte que le sol plat de l'autre côté est désormais plus haut que ne l'était le sol du côté de départ. Par conséquent, le photon ne récupère pas toute l'énergie qu'il a perdue en grimant la colline.

L'effet net est que les photons du fond diffus perdraient de l'énergie en traversant un vide. Et nous verrions donc des régions plus froides dans le fond diffus cosmologique près des régions de faible densité. Ce phénomène est nommé effet Sachs-Wolfe intégré. L'effet s'applique aussi aux superamas, mais



Les relevés du ciel par le télescope PS1 du projet Pan-STARRS, à Hawaï, ont permis aux astronomes d'identifier un « supervide » (une immense étendue d'espace relativement vide) qui expliquerait la présence d'un énigmatique point froid dans la lumière la plus ancienne de l'Univers.

dans ce cas, les photons cette fois gagnent de l'énergie en traversant de vastes régions contenant un supplément de masse et sont donc un peu plus chauds.

L'effet Sachs-Wolfe intégré est normalement infime. Même pour de grands vides, il occasionne typiquement des variations de température inférieures aux fluctuations moyennes du fond diffus. Or celles-ci, dues aux légères différences de densité au sein de l'Univers naissant – au moment où la lumière a été émise –, ne varient guère plus que de une partie pour 10000. Mais nous avons réalisé que dans le cas d'un vide véritablement énorme, un supervide, la différence suffirait à produire le point froid. Trouver un supervide dans la région du point froid permettrait d'expliquer ce dernier. Mais pas uniquement; nous aurions une preuve, différente de l'observation des supernovæ, de l'accélération de l'expansion de l'Univers, car l'effet Sachs-Wolfe intégré n'est notable que dans cette situation.

### MAIS OÙ EST LE SUPERVIDE ?

Les astronomes ont commencé à chercher un supervide coïncidant avec le point froid en 2007. La détection d'une structure aussi vaste est plus difficile qu'il n'y paraît. La plupart des relevés astronomiques produisent des images bidimensionnelles du ciel, sans données sur la distance des objets observés. Les galaxies que nous voyons pourraient aussi bien être toutes regroupées, ou très espacées, le long de la ligne de visée. Les astronomes

doivent donc recueillir des informations supplémentaires sur chaque galaxie pour estimer sa distance, une tâche laborieuse et d'un coût souvent prohibitif.

En 2007, à partir du catalogue NVSS (*NRAO VLA Sky Survey*) de galaxies, Lawrence Rudnick, de l'université du Minnesota, aux États-Unis, et ses collaborateurs ont découvert qu'une région de l'espace à peu près alignée avec le point froid contient moins de galaxies que la moyenne. Bien que le catalogue NVSS ne comporte pas de données concernant les distances spécifiques des galaxies du relevé, les astronomes savaient que la plupart des galaxies NVSS sont très éloignées de nous. Sur la base de ces données, ils ont émis l'hypothèse qu'un supervide se trouverait à 11 milliards d'années-lumière.

Cette distance posait une difficulté: la lumière qui nous parvient maintenant aurait traversé ce supervide lointain il y a près de 8 milliards d'années – et non 11 milliards d'années, car il faut prendre en compte que l'Univers a doublé de taille depuis que la lumière a été émise. À une époque cosmique aussi reculée, l'énergie sombre ne représentait qu'une composante mineure de l'Univers – d'abord dominé par le rayonnement, puis la matière – et donc influait beaucoup moins sur la dynamique cosmique qu'aujourd'hui, et l'effet Sachs-Wolfe intégré était trop faible pour produire le point froid.

Les travaux de Lawrence Rudnick, même s'ils n'ont pas confirmé le scénario imaginé, ont retenu mon attention. Avec Ben Granett et Mark Neyrinck, alors respectivement étudiant en thèse et postdoctorant à l'université de Hawaï, nous avons mené une analyse statistique afin de déterminer si des petites structures du fond diffus (des zones relativement chaudes ou froides, mais moins extrêmes que le point froid) coïncidaient souvent avec de petits amas ou des vides connus de l'Univers. Nous avons trouvé que ces recouvrements étaient fréquents. Même si aucune de ces structures connues ne correspondait au point froid, les résultats nous ont convaincus de poursuivre la recherche d'un supervide dans la direction du point froid.

Nous avons alors utilisé le télescope du CFHT (Observatoire Canada-France-Hawaï) pour cibler plusieurs petites zones du ciel dans la région du point froid et nous avons compté le nombre de galaxies à l'intérieur de chacune d'elles. Nous avons effectué ces observations début 2010, mais nous n'avons pas trouvé de signe de supervide à la distance prédite par Lawrence Rudnick. Nous avons même exclu la présence d'un supervide au-delà d'environ 3 milliards d'années-lumière. Grâce à d'autres observations, Malcolm Bremer, de l'université de Bristol, en Angleterre, et ses collaborateurs >

➤ sont arrivés à la même conclusion. Et dans le même temps, l'incertitude statistique des résultats de Lawrence Rudnick, réévaluée par des pairs, s'est révélée beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Ainsi, pendant un moment, nous nous sommes demandé s'il fallait abandonner l'idée d'expliquer le point froid par l'effet Sachs-Wolfe intégré.

Mais il restait un petit espoir ! Dans nos données, un indice suggérait la possibilité qu'un supervide se trouve plus près de nous. Paradoxalement, il est plus difficile de trouver un supervide proche avec les données du *CFHT* : chaque zone observée est un cône dont nous constituons le sommet et qui s'élargit à mesure que l'on regarde loin. Plus la distance est grande et plus la région physique couverte est vaste, ce qui nous a permis d'avoir un décompte précis des galaxies des zones éloignées. Mais près de nous, l'aire couverte est petite et, par conséquent, la marge d'erreur plus importante. Il y avait ainsi seulement 75 % de chances que le faible nombre de galaxies obtenu à courte distance corresponde à un supervide – un résultat insuffisamment fiable selon les critères scientifiques. Pour trancher la question, il fallait observer une zone beaucoup plus grande, couvrant toute la région du point froid. À l'époque, les télescopes à notre disposition ne nous le permettaient pas. Depuis, Ben Granett a obtenu son doctorat et travaille maintenant à l'observatoire astronomique de Brera, en Italie, et Mark Neyrinck est parti à l'université Johns-Hopkins.

## UNE HEUREUSE PERCÉE

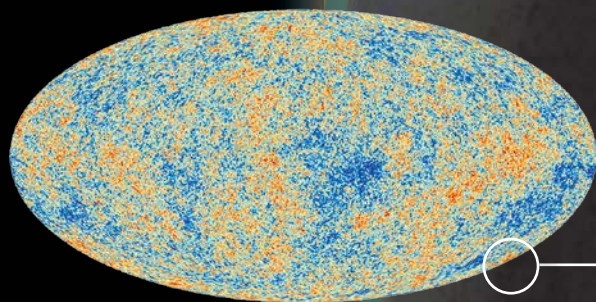
Par chance, je n'ai pas attendu trop longtemps pour obtenir de nouvelles données. Au moment où je disais au revoir à mes collègues, l'Institut d'astronomie de l'université de Hawaii achevait la construction d'un nouveau télescope : *PS1*, le premier observatoire du projet *Pan-STARRS* (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, télescope de relevé panoramique et système de réponse rapide). C'était exactement ce dont j'avais besoin. Équipé de la plus grande caméra du monde avec 1,4 gigapixel, le télescope est situé à 3 000 mètres d'altitude au sommet du volcan Haleakalā, sur l'île de Maui.

En mai 2010, au sein d'un consortium rassemblant plusieurs autres universités, mes collègues et moi avons commencé à cartographier les trois quarts du ciel à l'aide de *PS1*. Je me rappelle avoir essayé de convaincre Nick Kaiser, alors responsable scientifique de *Pan-STARRS*, que nous devions cartographier la région du point froid avant toute autre chose, dès la mise en service de l'instrument. Même si cela ne s'est pas fait, la région faisait partie de la zone observée durant les premières années de ➤

## UNE FROIDE ET SOLITAIRE COLLINE D'ÉNERGIE

Les astrophysiciens ont découvert un vaste supervide : une région de l'espace pauvre en galaxies. Il pourrait expliquer un mystérieux « point froid » découvert il y a plusieurs années dans le fond diffus cosmologique ❶. La lumière du fond diffus a été émise peu après le Big Bang et se propage vers nous depuis lors. Quand une partie de cette lumière a traversé le supervide ❷, elle a pu perdre de l'énergie par le processus dit de Sachs-Wolfe intégré ❸, ce qui aurait entraîné son refroidissement.

❶ LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE est la lumière la plus ancienne de l'Univers, et elle imprègne tout l'espace. La carte du fond diffus sur l'ensemble du ciel (*ci-dessous*) présente de légères différences de température des photons incidents, avec la lumière chaude (plus énergétique) en rouge et la lumière froide (moins énergétique) en bleu. Une certaine amplitude de variation est attendue, mais une zone particulière (*en bas à droite*) est trop froide et trop étendue pour être expliquée facilement. Ce « point froid » plonge les chercheurs dans la perplexité depuis sa découverte dans les données de la sonde *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) de la Nasa en 2004.

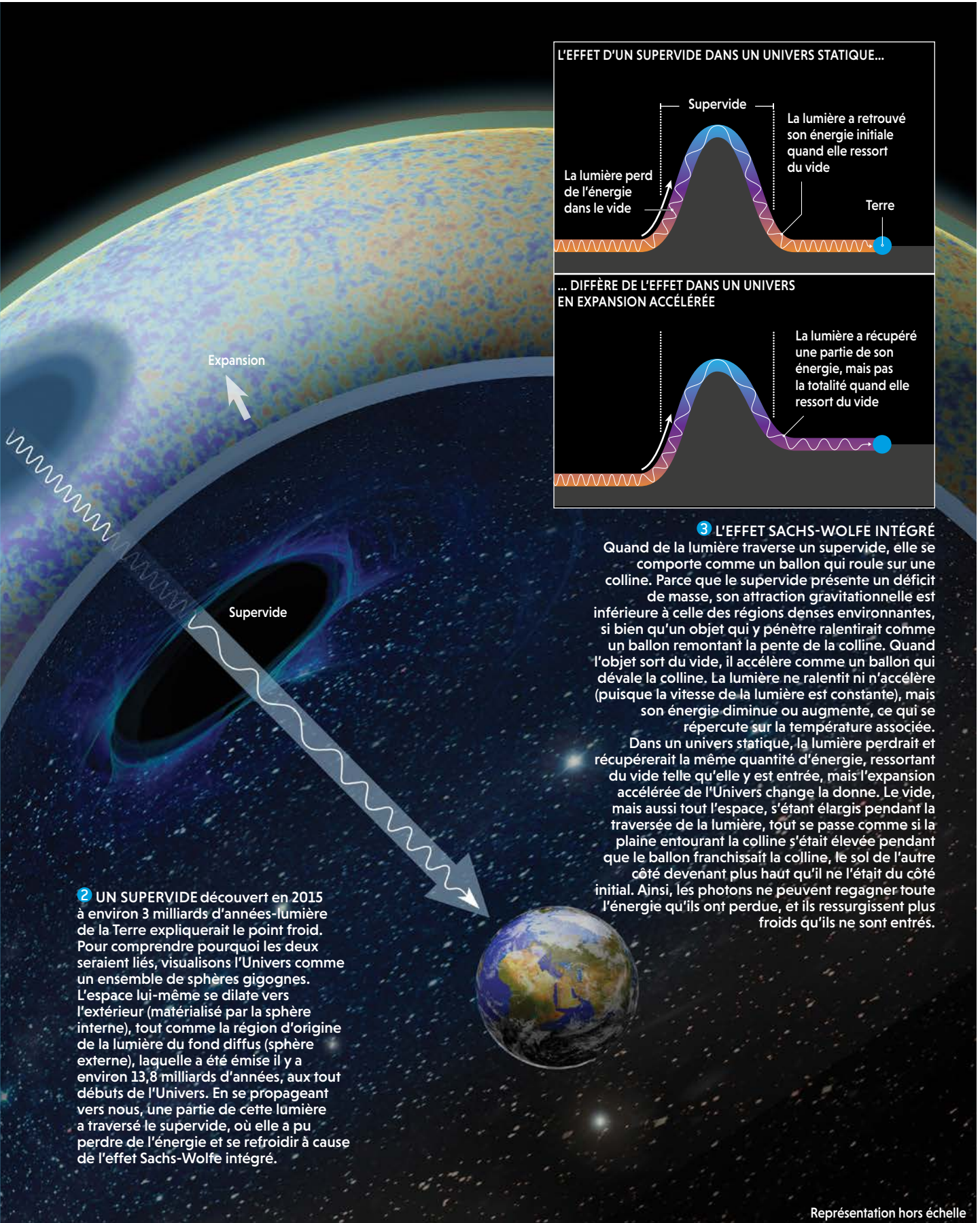


Expansion

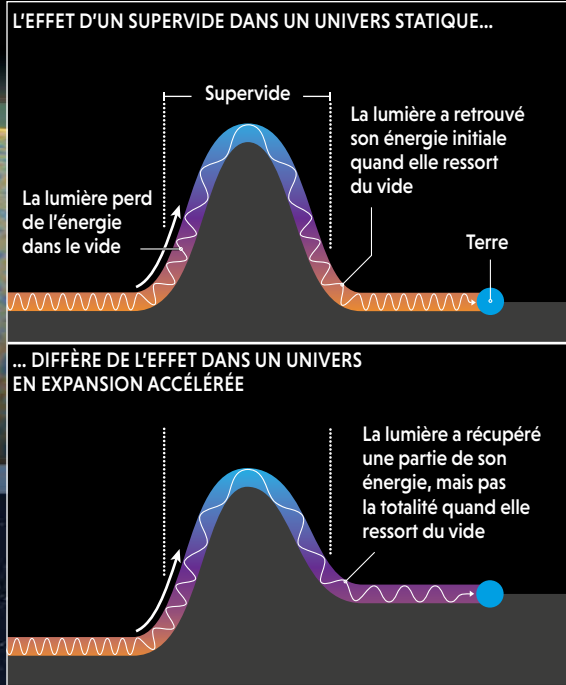
Point froid  
du fond diffus  
cosmologique

Point froid





**2 UN SUPERVIDE** découvert en 2015 à environ 3 milliards d'années-lumière de la Terre expliquerait le point froid. Pour comprendre pourquoi les deux seraient liés, visualisons l'Univers comme un ensemble de sphères gigognes. L'espace lui-même se dilate vers l'extérieur (matérialisé par la sphère interne), tout comme la région d'origine de la lumière du fond diffus (sphère externe), laquelle a été émise il y a environ 13,8 milliards d'années, aux tout débuts de l'Univers. En se propageant vers nous, une partie de cette lumière a traversé le supervide, où elle a pu perdre de l'énergie et se refroidir à cause de l'effet Sachs-Wolfe intégré.



**3 L'EFFET SACHS-WOLFE INTÉGRÉ**  
 Quand de la lumière traverse un supervide, elle se comporte comme un ballon qui roule sur une colline. Parce que le supervide présente un déficit de masse, son attraction gravitationnelle est inférieure à celle des régions denses environnantes, si bien qu'un objet qui y pénètre ralentirait comme un ballon remontant la pente de la colline. Quand l'objet sort du vide, il accélère comme un ballon qui dévale la colline. La lumière ne ralentit ni n'accélère (puisque la vitesse de la lumière est constante), mais son énergie diminue ou augmente, ce qui se répercute sur la température associée. Dans un univers statique, la lumière perdrait et récupérerait la même quantité d'énergie, ressortant du vide telle qu'elle y est entrée, mais l'expansion accélérée de l'Univers change la donne. Le vide, mais aussi tout l'espace, s'étant élargi pendant la traversée de la lumière, tout se passe comme si la plaine entourant la colline s'était élevée pendant que le ballon franchissait la colline, le sol de l'autre côté devenant plus haut qu'il ne l'était du côté initial. Ainsi, les photons ne peuvent regagner toute l'énergie qu'ils ont perdue, et ils resurgissent plus froids qu'ils ne sont entrés.

Représentation hors échelle

> service du télescope, et les mesures dont j'avais besoin allaient arriver peu à peu.

Tandis que nous attendions avec impatience ces nouvelles données, j'ai commencé à travailler avec un étudiant, András Kovács, sur les données publiques des observations du fond diffus par les satellites *Planck* et *WMAP*, ainsi que sur les données du satellite *WISE* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) portant sur des galaxies récemment observées en lumière infrarouge.

András Kovács étudiait à l'université Loránd Eötvös, à Budapest. Nous avions des téléconférences hebdomadaires et, à cause du décalage de douze heures entre Honolulu et Budapest, nos conversations se poursuivaient souvent tard dans la nuit européenne. Au cours

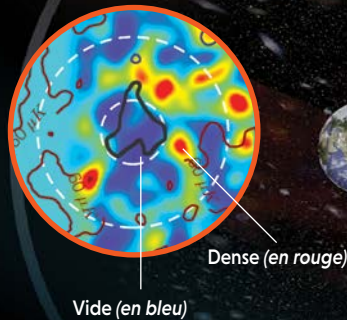
d'une de ces sessions, je lui ai demandé de trouver les plus grandes régions de basse densité, ou vides, dans le catalogue *WISE* de galaxies. Quelques jours plus tard, il m'a envoyé un courriel avec les images et les coordonnées des plus grands vides du catalogue. En lisant son message, j'ai remarqué que l'un des vides qu'il avait repérés coïncidait avec la région du ciel où se trouve le point froid. Or je n'avais pas encore parlé à András Kovács de mon intérêt pour un lien éventuel entre un supervide et le point froid. Sa découverte ne pouvait donc pas être biaisée par l'espoir d'établir ce lien. Parce que *WISE* observe un grand nombre de galaxies plus proches que *NVSS*, nous avons là un second indice que peut-être nous devrions chercher le supervide à proximité.

## LA RECHERCHE D'UN SUPERVIDE

La recherche d'un supervide nécessite d'établir une carte en trois dimensions de la distribution des galaxies ①, d'isoler les galaxies à la même distance ② et d'y chercher les régions de faible densité ③.

### ① MESURER LES DISTANCES

Les astronomes ont analysé le catalogue de galaxies du satellite *WISE* et du projet *Pan-STARRS*. Ce catalogue indique la position des galaxies sur l'ensemble du ciel, mais pas leur distance, un paramètre indispensable pour établir une carte tridimensionnelle de la distribution des galaxies. Pour évaluer leur distance, les chercheurs ont analysé les couleurs optiques de chaque galaxie, ce qui a fourni, pour chacune, une estimation du degré de décalage vers le rouge que sa lumière a subi. Cet effet est la conséquence de l'expansion de l'Univers : quand l'espace s'étire pendant que la lumière le traverse, la longueur d'onde des photons de lumière s'étire elle aussi. Plus le décalage vers le rouge d'une galaxie est important, plus elle est éloignée de la Terre. En combinant les positions des galaxies sur le ciel avec leurs distances estimées, les astronomes ont créé une carte tridimensionnelle de la densité de galaxies dans la direction du point froid.

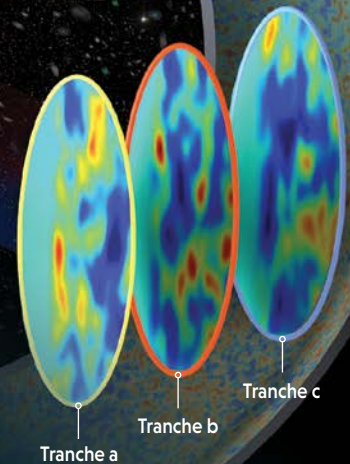


### ② DÉCOUPER L'UNIVERS EN TRANCHES

Les chercheurs ont décomposé leur carte tridimensionnelle de densité en une série de tranches montrant la répartition des galaxies à différentes distances de la Terre. Pour chaque tranche, les zones rouges correspondent aux régions denses avec beaucoup de galaxies et les régions bleues, aux zones plutôt vides. Le contour noir au centre correspond au point froid dans le fond diffus cosmologique.

### ③ COMPARER LES TRANCHES

Les astronomes ont créé des cartes montrant la densité des galaxies dans trois plages de distances : jusqu'à 1,24 milliard d'années-lumière de distance (a), entre 1,5 et 1,9 milliard d'années-lumière (b) et entre 2,3 et 2,9 milliards d'années-lumière (c). La tranche la plus proche ne révèle pas de vide, et la plus lointaine semble indiquer un petit vide un peu trop excentré pour correspondre au point froid. Mais la tranche du milieu révèle une vaste zone vide essentiellement centrée sur le point froid.



Représentation hors échelle



Il nous restait donc à confirmer que nous tenions là un supervide. Plusieurs années ont été nécessaires pour rassembler les données des différents programmes d'observation et établir de façon certaine la découverte. Nous avons utilisé un ensemble de données provenant de WISE, de Pan-STARRS et de 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*, relevé de tout le ciel à deux micromètres).

Mais nous avons besoin d'attribuer des distances aux galaxies observées. Une manière de les mesurer est d'observer le « décalage vers le rouge » d'un objet (lorsqu'une source lumineuse s'éloigne de l'observateur, sa lumière est détectée avec un décalage vers de plus grandes longueurs d'onde, vers le rouge dans le cas du spectre visible). Plus une galaxie est éloignée, plus elle s'éloigne vite de nous, et plus son décalage vers le rouge est important. Même si nous ne disposons pas de mesures précises de décalage vers le rouge pour les galaxies, nous pouvions suffisamment bien l'estimer pour attribuer une distance à chacune d'elles dans la direction du point froid. Nous avons créé une série de tranches tomographiques: des images planes de l'Univers correspondant à différentes distances à la Terre. Le premier jeu d'images révélait un supervide approximativement sphérique et plus poussé près du centre. Ce vide géant se cache très près de nous, à environ 3 milliards d'années-lumière, ce qui explique pourquoi il a été si difficile à mettre en évidence lors de nos premiers essais de détection.

Après plusieurs mois d'analyse, nous étions convaincus d'avoir des preuves solides de l'existence du supervide. En d'autres termes, nous étions certains de l'existence d'une région de basse densité dans la direction du point froid. Ce supervide est même énorme; avec 1,8 milliard d'années-lumière de diamètre, c'est peut-être la plus grande structure jamais identifiée. L'objet est probablement très rare: les théories cosmologiques suggèrent qu'il n'y en aurait tout au plus que quelques autres dans tout l'Univers observable.

Nous avons enfin trouvé notre supervide aligné avec la plus grande anomalie du fond diffus cosmologique, le point froid. L'énigme était-elle donc résolue? Pas tout à fait. Le supervide et le point froid pouvaient être alignés par hasard, sans lien de cause à effet, même si, d'après nos calculs, une telle coïncidence était 20000 fois moins probable que la possibilité que le supervide ait créé le point froid.

Cependant, nous avons un problème plus sérieux. Bien que le supervide soit au bon endroit pour expliquer le point froid, il n'a pas exactement la bonne taille. Pour rendre compte de la température du point froid, bien plus basse que la température moyenne du fond diffus, le supervide devrait être encore

plus grand qu'il ne semble l'être, peut-être d'un facteur 2 à 4. Ce désaccord entre la théorie et les observations est si important que certains chercheurs pensent que le chevauchement du supervide avec la région du point froid est un pur hasard. Et que d'autres explications sont donc à chercher, comme la possibilité que les galaxies émettent moins de rayonnement dans l'espace que nous ne le supposons, ce qui crée des biais dans la carte du fond diffus cosmologique – un phénomène qui pourrait, dans une certaine mesure, imiter l'effet Sachs-Wolfe intégré.

## UN SUPERVIDE PAS ENCORE ASSEZ GRAND ?

Par ailleurs, même si nos observations prouvent l'existence du supervide, nous ne pouvons connaître sa taille, sa forme ni sa position avec assez de précision pour calculer en détail les effets qu'il devrait avoir sur le fond diffus. En particulier, le supervide pourrait être allongé dans notre direction, ou composé de plusieurs vides sphériques juxtaposés et alignés dans la direction du point froid (comme un bonhomme de neige) – autant de configurations qui influent sur l'effet Sachs-Wolfe intégré. Ainsi, nous ne savons pas encore dans quelle mesure la taille du supervide met en difficulté notre théorie.

Nous avons déjà prévu de recommencer notre étude avec les nouvelles données de PS1, plus complètes que celles que nous avons utilisées précédemment, et en utilisant des observations que les astronomes ont encore affinées. Nous pourrions alors quantifier l'écart entre les mesures et la théorie afin de déterminer si l'hypothèse de l'effet Sachs-Wolfe intégré et du supervide est à écarter définitivement. Une étude menée par Seshadri Nadathur et Robert Crittenden, de l'université de Portsmouth, en Angleterre, suggère, grâce à des données récentes du *Sloan Digital Sky Survey*, que notre supervide ne peut pas expliquer le point froid.

Si le désaccord devait persister, il pourrait être révélateur d'un phénomène d'une autre nature. Par exemple, il existe des théories se substituant à celle de la relativité générale d'Einstein, dont certaines se manifestent par une signature unique qui n'apparaîtrait que dans les vides. Si l'une de ces théories est celle qui décrit correctement la force gravitationnelle, le mécanisme Sachs-Wolfe intégré pourrait opérer différemment. Notre supervide nous offrirait un indice allant dans le sens de ces théories. Nous aurions là une piste passionnante pour comprendre l'Univers à un niveau plus profond qu'il n'est possible aujourd'hui.

Dans tous les cas, la découverte des supervides est cruciale. Et les prochaines années devraient nous en apprendre encore davantage sur eux – et donc sur la nature de l'Univers. ■

## BIBLIOGRAPHIE

Y.-C. CAI ET AL., The lensing and temperature imprints of voids on the cosmic microwave background, *MNRAS*, vol. 466, n° 3, pp. 3364-3375, 2016.

F. FINELLI ET AL., Supervoids in the WISE-2MASS catalogue imprinting cold spots in the cosmic microwave background, *MNRAS*, vol. 455, n° 2, pp. 1246-1256, 2016.

I. SZAPUDI ET AL., Detection of a supervoid aligned with the cold spot of the cosmic microwave background, *MNRAS*, vol. 450, n° 1, pp. 288-294, 2015.



# STÉPHANIE ESCOFFIER



## « Les vides de l'Univers sont nés de fluctuations quantiques dans le plasma primordial »

### Qu'est-ce qu'un vide cosmique et comment se forme-t-il ?

**Stéphanie Escoffier:** En vertu du principe cosmologique, l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire identique quel que soit l'endroit où l'on se place et la direction dans laquelle on regarde. Si on observe de plus près, ce n'est pas le cas, l'Univers semble composé de grandes structures: les galaxies se regroupent en amas et superamas, formant eux-mêmes de grands filaments. Entre ces structures, on trouve les «vides» cosmiques, d'immenses espaces pratiquement déserts où la densité en galaxies est très faible. La taille des vides est variable, du supervide énorme de plus d'un milliard d'années-lumière de rayon, à des tout petits. Je travaille principalement sur des vides de 50 à 400 millions d'années-lumière de rayon.

L'origine des vides se cache dans le plasma de l'Univers primordial. Des fluc-

#### BIO EXPRESS

**1974**  
Naissance à Paris.

**2001**  
Docteurat de Physique à l'Université Paris 7 Diderot.

**2006**  
Chargée de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille.

**2017**  
Directeur de Recherche au CNRS.

**2010-2019**  
Membre de la collaboration BOSS.

tuations quantiques qui s'y manifestaient ont créé des zones de surdensité de matière, où la matière ordinaire et la matière noire (dont la nature est encore inconnue) se sont accumulées et ont donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les zones de sous-densité de matière ont formé les vides cosmiques.

#### Comment les détecte-t-on ?

**Stéphanie Escoffier:** Les premiers ont été découverts en 1978 par Stephen Gregory et Laird Thompson, de l'observatoire américain de Kitt Peak. Les vides sont définis à partir des amas et des filaments qui les cloisonnent, donc nous avons besoin de catalogues de galaxies relevées sur un vaste champ du ciel. Nous appliquons alors un algorithme qui isole et recense les vides. Mon équipe utilise la carte tridimensionnelle la plus riche en galaxies, qui est celle du programme BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*) lié au relevé SDSS III (*Sloan Digital Sky*

Survey), réalisé avec un télescope de 2,5 mètres de diamètre situé au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Le relevé, effectué entre 2009 et 2014, comprend 1,5 million de galaxies. Nous y avons détecté plusieurs centaines de vides.

### Quelles informations les vides cosmiques apportent-ils dans l'étude de l'Univers ?

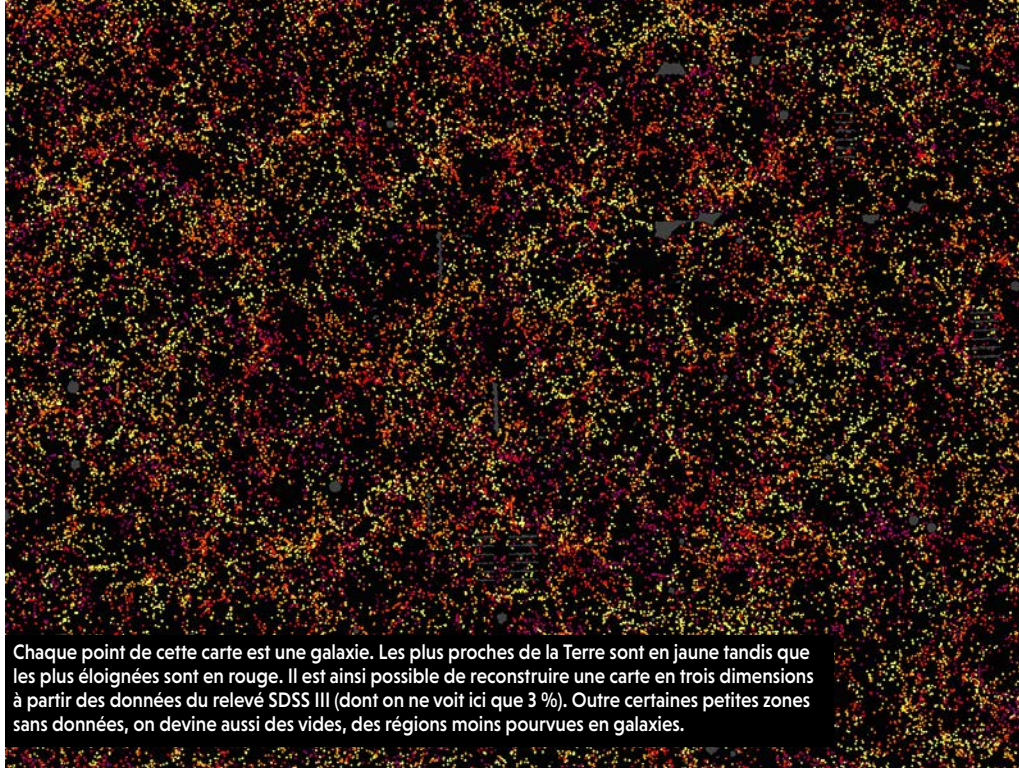
**Stéphanie Escoffier:** Les vides nous renseignent sur de nombreux aspects de l'Univers: le processus de formation des grandes structures, des effets de lentille gravitationnelle en champ faible ou certaines anomalies du fond diffus cosmologique, tel le point froid (voir *La chasse au supervide*, par I. Szapudi, page 34).

Les vides nous permettent aussi d'étudier l'expansion accélérée de l'Univers. En 1998, en utilisant des supernovæ de type Ia, plusieurs équipes ont montré que l'expansion du cosmos accélère depuis environ 7 milliards d'années. Pour expliquer cette dynamique, il faut supposer que l'Univers contient de l'énergie sombre ou qu'il faut modifier les lois de la relativité générale d'Einstein. La nature de l'énergie sombre reste inconnue, mais, si elle existe, elle représenterait près de 70% du contenu de l'Univers.

Avec les vides cosmiques, nous commençons depuis peu à tester les modèles d'énergie sombre et de gravité modifiée. L'idée d'utiliser les vides pour répondre à ces questions n'est pas nouvelle, mais cette approche était confrontée à un obstacle expérimental important: la difficulté de sonder de grandes portions du ciel profondément, avec une bonne précision sur les mesures de distance des galaxies. L'avènement des grands sondages cosmologiques tels que le programme BOSS ont stimulé l'intérêt des vides pour la cosmologie. En effet, les vides cosmiques, qui remplissent la majeure partie de l'Univers, contiennent très peu de matière, et pourraient être composés principalement d'énergie sombre. Ces régions se présentent donc comme un laboratoire idéal pour tester les scénarios d'énergie sombre ou les théories de gravité modifiée, pouvant se substituer à celle de la relativité générale.

### Les vides commencent-ils à révéler leurs secrets ?

**Stéphanie Escoffier:** Petit à petit. Une étude récente menée par Nico Hamaus, de l'université de Munich, à laquelle j'ai participé, s'est concentrée sur la vitesse des galaxies au sein des vides.



Chaque point de cette carte est une galaxie. Les plus proches de la Terre sont en jaune tandis que les plus éloignées sont en rouge. Il est ainsi possible de reconstruire une carte en trois dimensions à partir des données du relevé SDSS III (dont on ne voit ici que 3 %). Outre certaines petites zones sans données, on devine aussi des vides, des régions moins pourvues en galaxies.

Cette démarche présente une difficulté observationnelle, car la vitesse que nous mesurons pour une galaxie donnée a deux composantes difficiles à dissocier. La première est liée à l'expansion de l'Univers, le fameux décalage vers le rouge, qui conduit toutes les galaxies à s'éloigner de la Voie lactée. La seconde provient du fait que les galaxies sont dotées d'une vitesse propre au sein d'un vide. En moyenne, elles devraient se déplacer dans toutes les directions.

Cependant, les régions denses en matière, qui bordent les vides, attirent les galaxies du vide. En isolant cette dernière composante de vitesse, Nico Hamaus et son équipe ont estimé avec une bonne précision la densité moyenne de matière dans l'Univers et ils ont évalué le taux de croissance des grandes structures.

Cette approche permet aussi de mettre à l'épreuve la relativité générale d'Einstein dans les vides, ces régions de faible densité. Une déviation des observations par rapport aux calculs théoriques serait un indice qu'il faut modifier les lois de la gravitation. Pour l'instant, la conclusion est que la relativité générale tient bon.

### Vous vous intéressez aussi à un autre aspect des vides cosmiques, leur forme.

#### En quoi consistecette approche ?

**Stéphanie Escoffier:** Avec ma postdoctorante Alice Pisani (qui a récemment obtenu une bourse «L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science»), nous nous intéressons à l'effet Alcock-Paczynski appliqué aux vides cosmiques. Ceux-ci n'ont pas de raison particulière d'être de forme sphérique. Cependant, si l'Univers est homogène et isotrope à grande

échelle, et que nous regardons un grand nombre de vides, leur forme moyenne doit être sphérique, dans l'espace réel. Or, lorsque nous construisons une carte tridimensionnelle des galaxies, nous ne mesurons pas directement leur position, nous enregistrons le décalage vers le rouge de leur spectre lumineux. Pour effectuer la conversion en distance et revenir dans l'espace réel, nous devons choisir un modèle cosmologique. Et si le modèle choisi n'est pas correct, la forme moyenne des vides ne sera pas sphérique. Nous avons là un moyen de tester un grand nombre de modèles, c'est le test d'Alcock-Paczynski. Cette approche est prometteuse et devrait bientôt donner ses premiers résultats.

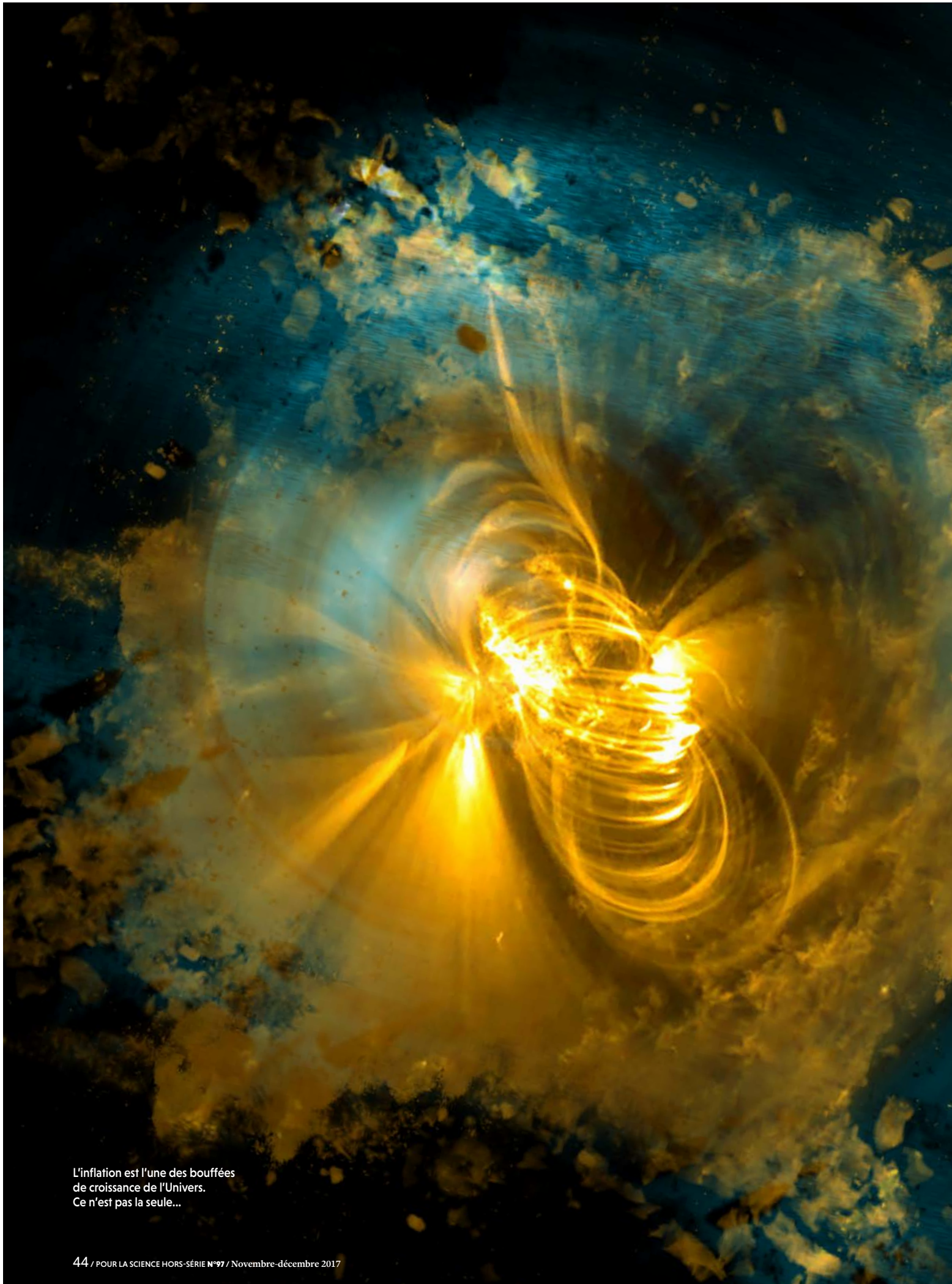
### Quelles sont les perspectives dans le domaine des vides cosmiques ?

**Stéphanie Escoffier:** Depuis 2014, le programme BOSS est devenu eBOSS (e pour *extended*). L'idée est de chercher des galaxies à plus grande distance que BOSS. C'est très excitant pour nous car, en étudiant des vides plus lointains, nous regardons l'Univers plus jeune et nous pouvons voir si la dynamique de l'énergie sombre a changé au cours du temps. Cela permettra de mettre à l'épreuve les prévisions de certains modèles d'énergie sombre.

Un autre programme très attendu est *Euclid*, un satellite européen prévu pour 2020. L'objectif est d'observer plus de 10 milliards d'objets dont 50 millions de galaxies très précisément. Avec un aussi vaste catalogue, les vides auront encore beaucoup de choses à nous révéler. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY





L'inflation est l'une des bouffées  
de croissance de l'Univers.  
Ce n'est pas la seule...





# QUAND L'UNIVERS S'EMBALLÉ

L'histoire de l'Univers est jalonnée d'épisodes de croissance plus ou moins cataclysmiques. Le premier, l'inflation, est une théorie postulée il y a 40 ans pour expliquer les propriétés géométriques de l'Univers et son homogénéité : quelques fractions de secondes après le Big Bang, l'Univers a gonflé démesurément l'espace d'un instant. Certains cosmologistes émettent des doutes, mais ils se heurtent aux observations qui la confirment toujours plus précisément. L'autre épisode de croissance hors normes a lieu en ce moment ! L'expansion de l'Univers s'accélère. Pour expliquer ce phénomène, on a recours à l'énergie sombre, dont on ne sait pas grand-chose... C'est l'occasion pour les physiciens de laisser libre cours à leur imagination.

## L'ESSENTIEL

- En 1998, les cosmologistes ont découvert que l'expansion de l'Univers accélère.
- Ce phénomène s'expliquerait par une «énergie sombre», qui représenterait 70% de la densité d'énergie de l'Univers.
- L'énergie sombre pourrait correspondre à une constante cosmologique liée aux fluctuations quantiques du vide.
- D'autres pistes sont explorées, comme la «quintessence» ou des modifications des lois de la gravitation.

## L'AUTEUR



**CÉDRIC DEFFAYET** est chercheur au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris et à l'Institut des hautes études scientifiques.

# L'Univers au-delà DES TÉNÉBRES

**L'Univers s'agrandit... de plus en plus vite. La raison de cette expansion accélérée ? Aujourd'hui, les physiciens la cherchent du côté de la mystérieuse «énergie sombre». Ou autour d'un «graviton massif».**

# C

Cet été, peut-être avez-vous profité d'une nuit claire pour contempler les étoiles. Face à cette immensité, une question qui revient souvent est celle de la distance des étoiles. Rien de nouveau sous le Soleil, les Grecs se posaient déjà la question! D'ailleurs, au III<sup>e</sup> siècle avant notre ère, Aristarque de Samos tenta d'estimer la distance qui nous sépare de

notre étoile. L'ingéniosité de son calcul n'a pas pallié le manque de précision des instruments dont il disposait: il se trompa d'un facteur 20. C'était les débuts de l'exploration de l'Univers pour y déterminer les distances.

Au cours des siècles, les techniques de mesure se sont améliorées. L'invention de la lunette astronomique a étendu le champ d'investigation à un domaine jusqu'alors invisible. Les techniques géométriques ont ensuite fait leurs preuves, mais ont vite trouvé leurs limites. Aujourd'hui, pour se repérer dans l'Univers, les astrophysiciens utilisent les céphéides (des étoiles à luminosité variable) ou les supernovæ de type Ia. Ainsi équipés, ces chercheurs cartographient le cosmos. C'est là que les surprises commencent...





En combinant l'observation précise de la lumière émise par les galaxies lointaines avec des mesures de distance, les cosmologistes ont découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies semblent s'éloigner les unes des autres, car l'espace-temps qui les contient s'étire. Plus étonnant, en observant des supernovæ très éloignées, les scientifiques ont découvert que l'expansion se fait à un rythme qui s'accélère.

Pour l'expliquer, on doit se placer dans la description géométrique de l'Univers qu'ont développé les théoriciens. Le modèle standard cosmologique, le modèle du Big Bang, décrit avec succès les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a un siècle. La «force de gravitation» y est décrite de façon géométrique dans un espace-temps courbe. Plus précisément, le mouvement d'un objet en chute libre, qui est dû à une attraction gravitationnelle dans la théorie de Newton, est interprété dans la théorie d'Einstein comme un trajet qui suit le plus court chemin dans un espace-temps courbe. La géométrie de l'espace-temps définit les trajectoires des objets et, en retour, le contenu matériel de l'Univers déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et contenu matériel sont intimement liés dans les équations de la relativité générale.

### L'ÉNERGIE SOMBRE EN LUMIÈRE

Dans ce contexte, comment expliquer l'expansion accélérée de l'Univers? Une réponse possible est la présence dans l'Univers d'une «énergie sombre», dont la nature reste inconnue, mais dont on peut déduire certaines caractéristiques des observations astrophysiques. C'est cette hypothèse qui nous intéresse ici. Nous présenterons des pistes que les cosmologistes explorent, de l'énergie du vide en lien avec l'énergie sombre à des modifications des lois de la gravitation aux grandes échelles.

Avant d'aborder la question de la nature de l'énergie sombre, voyons comment les cosmologistes en ont eu l'idée et comment ils ont estimé son abondance dans l'Univers. Toute substance influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Or l'analyse du fond diffus cosmologique (voir *L'étrange affaire Univers*, par A. Riazuelo, page 16) indique que l'Univers suit une géométrie euclidienne aux grandes échelles. Une telle propriété n'est possible que si le contenu de l'Univers a une certaine densité moyenne d'énergie, une densité d'énergie critique.

Par ailleurs, les astrophysiciens déduisent le contenu en matière ordinaire (dite baryonique, elle compose les planètes, les étoiles...) de l'étude de la formation des noyaux atomiques légers dans les premières minutes de l'Univers. Cette matière ne représente que 5% de la densité d'énergie critique. Ainsi, 95% du contenu de l'Univers est sous une forme inconnue. >



> Ce contenu mystérieux se manifeste néanmoins de façon indirecte par son influence gravitationnelle sur la matière baryonique. Les cosmologistes le séparent en deux composantes selon son comportement, soit aujourd'hui environ 25% de matière noire et 70% d'énergie sombre (voir les Repères, page 6).

La matière noire a été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle: la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire.

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont, nous le verrons, plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est née lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

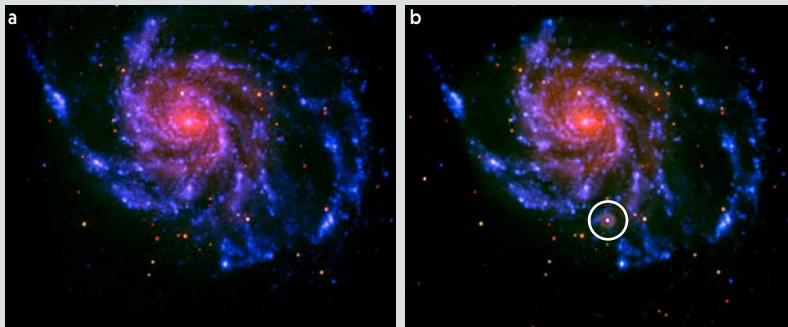
### QUAND LA CONSTANTE VARIE

La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, lorsqu'on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était décalé vers le rouge de façon systématique. Ce résultat est dû à l'effet Doppler: la longueur d'onde d'un signal sonore ou électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la «loi de Hubble», entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée. Dans le cadre de la relativité générale, les observations de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers: c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres.

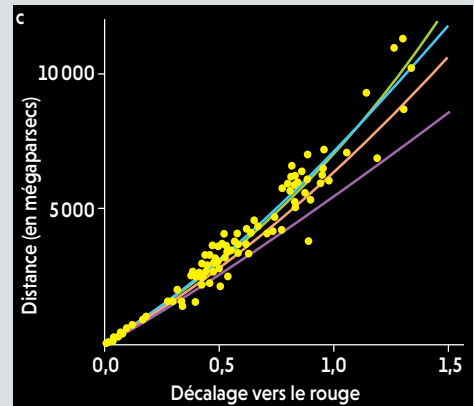
## LES CHANDELLES COSMOLOGIQUES

Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). Elles servent donc de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable: une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (a et b)! Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. La quantité de lumière émise étant connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi

le décalage vers le rouge de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers. En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (c). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible.



Les mesures de la distance et de la vitesse d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches (telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b) vérifient la loi de Hubble linéaire (c, en violet). Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines (les autres courbes représentent plusieurs modèles cosmologiques).



Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble – la constante de Hubble – a été déterminé avec une précision de l'ordre de 1% et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique) selon lequel il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la

Ces trois astrophysiciens ont reçu le prix Nobel de physique en 2011 pour ces travaux, qui reposaient sur la mesure de la distance et de la vitesse de fuite de supernovæ de type Ia (*voir l'encadré page ci-contre*). Les premiers résultats ont été publiés en 1998 et ce fut une surprise: l'expansion de l'Univers accélère. Par ailleurs, ce phénomène a débuté relativement récemment dans l'histoire cosmique, quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui, soit à peine 7 milliards d'années.

## L'ASTUCE D'ALBERT EINSTEIN

Si ce résultat n'était pas celui que les chercheurs attendaient, il n'est cependant pas difficile à reproduire dans le cadre de la relativité générale: il suffit de donner une valeur non nulle à la « constante cosmologique ». Rappelons que cette constante a été introduite par Einstein dans ses équations de la relativité générale – avant la découverte de l'expansion cosmique – pour que ces équations correspondent à un univers statique. Il suffisait d'ajuster la valeur de cette constante pour contrebalancer l'effet attractif de la matière.

Mais que représente physiquement cette constante cosmologique? L'ajout de ce terme dans les équations d'Einstein est l'équivalent mathématique de l'addition d'un nouveau contenu dans l'Univers dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, ce nouveau contenu a une densité d'énergie constante au cours de l'histoire cosmique, alors que celle de la matière ordinaire diminue avec l'expansion de l'espace-temps (la quantité de matière ordinaire initialement présente dans l'Univers reste constante, tandis que le volume augmente). La densité d'énergie associée à la constante cosmologique ne varie pas, ce qui signifie que, dans un volume d'Univers dilaté par l'expansion cosmique, il y a une création continue d'énergie.

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'il lui est associé une pression négative. De façon générale, la pression est définie comme une force agissant sur une surface. Par exemple, la pression cinétique d'un fluide est due aux chocs des molécules sur les parois du récipient. Le fluide exerce une poussée sur les parois et la pression est positive. Une pression négative peut apparaître sur les parois d'un récipient, par exemple si la pression extérieure est plus élevée que celle à l'intérieur.

Comment la pression d'une composante de l'Univers agit-elle sur la dynamique de celui-ci? La pression positive de la matière est interprétée comme un surplus d'énergie cinétique qui s'ajoute au bilan de la densité d'énergie de l'Univers. Elle tend donc à ralentir l'expansion. En revanche, un fluide présentant une pression négative, tel celui associé à la constante cosmologique, a une contribution opposée et crée une sorte de

**Une galaxie  
distante de  
100 millions  
d'années-lumière  
s'éloigne de nous  
à 8 millions  
de kilomètres  
par heure**

constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat aujourd'hui. En effet, la constante a pu varier au cours du temps. Mesurer cette variation consiste précisément à estimer l'accélération ou la décélération de l'expansion de l'Univers. Jusqu'en 1998, le consensus chez les cosmologistes était que l'expansion devait ralentir. En effet, la matière ordinaire et la matière noire s'opposent à l'expansion, un peu comme l'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil tend à ralentir le mouvement d'une comète.

Dans les années 1990, deux équipes, l'une dirigée par Saul Perlmutter (du Laboratoire américain de Berkeley), et l'autre par Brian Schmidt et Adam Riess (respectivement à l'université de Canberra, en Australie, et à l'université de Californie à Berkeley), ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années.



➤ force répulsive: la vitesse d'expansion de l'Univers augmente au lieu de diminuer.

La constante cosmologique est donc associée à une pression négative et à une densité d'énergie constante, dont la valeur est estimée grâce aux observations astrophysiques. Elle est très faible: l'énergie contenue dans un volume équivalent à celui d'une piscine olympique pourrait alimenter une ampoule de 1 watt pendant moins d'un millionième de seconde!

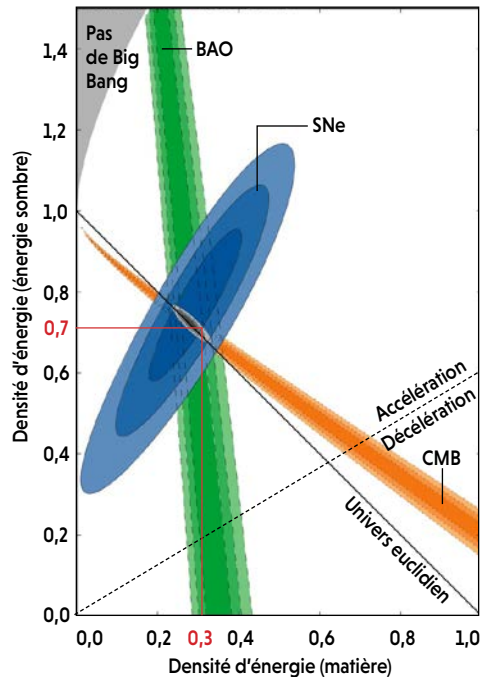
À partir de ces propriétés, les physiciens ont commencé à réfléchir à la nature de l'énergie sombre. Une possibilité émerge naturellement dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les interactions fondamentales en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Ainsi, le modèle standard de la physique des particules est formulé dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Il est testé notamment dans les accélérateurs de particules tels que le LHC au Cern; les observations s'accordent avec une grande précision aux calculs théoriques du modèle.

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, on montre que, même en l'absence de matière, tout volume d'Univers doit contenir une certaine énergie (on parle alors d'énergie du vide) et une pression qui sont compatibles avec les caractéristiques de la constante cosmologique. D'où vient cette énergie du vide? D'après le principe d'incertitude de Heisenberg, des paires particule-antiparticule naissent et disparaissent, sans cesse et partout dans l'espace. Il est possible de calculer les grandeurs caractéristiques associées à cet ensemble de particules virtuelles, tels le spin (moment cinétique intrinsèque d'une particule), la polarisation, l'énergie... Ces grandeurs sont nulles en moyenne, à l'exception de l'énergie qui, par ailleurs, ne se dilue pas avec l'expansion de l'Univers puisqu'elle est reliée au vide.

## UN PROBLÈME DE 120 ORDRES DE GRANDEUR

L'énergie du vide pourrait donc résoudre la question de la nature de l'énergie sombre, mais la valeur que l'on calcule pour la densité d'énergie du vide et celle requise pour l'énergie sombre de la cosmologie sont incompatibles. Une estimation simple indique que l'énergie du vide dans un volume égal à celui d'une piscine olympique devrait suffire à pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant  $10^{97}$  ans! Ce résultat est supérieur de plus de 120 ordres de grandeur à ce qui est nécessaire pour s'accorder aux observations cosmologiques.

Comment résoudre ce problème? En réalité, les physiciens ne savent pas calculer rigoureusement la valeur de l'énergie du vide dans le cadre de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une valeur en accord avec



La composition de l'Univers en énergie sombre et en matière s'exprime sous la forme de densités d'énergie qui doivent être compatibles avec la géométrie euclidienne que l'on observe pour l'Univers à grande échelle. La combinaison des observations du fond diffus cosmologique (CMB), des oscillations acoustiques des baryons (BAO) et des supernovæ (SNe) donne (en rouge) une répartition d'environ 70 % d'énergie sombre et 30 % de matière (25% de matière noire et 5% de matière ordinaire).

les observations cosmologiques en la fixant «à la main», par l'ajustement de certains paramètres. Mais aucun principe connu ne justifie ce qui apparaît alors comme un tour de passe-passe et qui nécessite un ajustement extrêmement fin des paramètres (à plus de 120 décimales près si l'on considère le calcul simple mentionné plus haut). C'est ce que l'on nomme le premier problème de la constante cosmologique.

Un second problème apparaît lorsqu'on constate que la densité d'énergie associée à la constante cosmologique dans l'Univers aujourd'hui est du même ordre que celle de la matière (ordinaire et noire), alors même que le rapport de ces deux densités d'énergie a changé au cours de l'histoire cosmique. Il semble donc que l'humanité soit apparue à un moment particulier de l'histoire de l'Univers, celui où ces deux densités d'énergie sont proches. Certains chercheurs s'efforcent d'expliquer cette «coïncidence cosmique» qui traduit aussi le fait que l'accélération cosmique n'a débuté que récemment dans l'histoire de l'Univers.

Plusieurs approches ont été suivies pour tenter de résoudre les problèmes posés par la constante cosmologique. Mais avant d'en décrire certaines, précisons qu'aucune n'est unanimement partagée.

Le premier problème de la constante cosmologique a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, et à une époque où l'on penchait pour une décélération de l'expansion cosmique, avec une constante cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc être nulle, ce que contredisait l'estimation évoquée précédemment. Pour y remédier, une idée était d'introduire une

nouvelle symétrie en théorie quantique des champs, qui impose que cette valeur soit nulle sans avoir à faire des ajustements artificiels. Notons que si une telle symétrie existait, elle pourrait aussi conduire à une faible valeur qui suffirait à expliquer l'expansion accélérée de l'Univers. Il suffit pour cela de supposer que la symétrie est légèrement brisée dans l'Univers.

Une telle symétrie est par exemple la « supersymétrie », qui stipule que chaque particule du modèle standard a un « superpartenaire ». Ces particules appariées ont la même masse, mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie totale du vide serait nulle. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie existe, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée. Cependant, le degré de brisure requis par la physique des particules est trop important pour résoudre le problème de l'énergie du vide. Notons en revanche que la supersymétrie, brisée, pourrait apporter une solution au problème de la matière noire.

Les théoriciens ne parviennent pas à résoudre les problèmes soulevés par la constante cosmologique, une situation d'autant plus frustrante que les observations indiquent une valeur non nulle de cette constante. D'autres pistes sont cependant explorées, à la recherche d'autres contenus matériels qui produiraient

une expansion cosmique accélérée. On désigne ainsi sous le terme générique de « quintessence » de tels composants matériels. Par exemple, l'existence d'un champ « scalaire » (c'est-à-dire dont le spin est nul, tel le champ de Higgs associé au boson de Higgs) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique.

## OÙ EST LA QUINTESSENCE ?

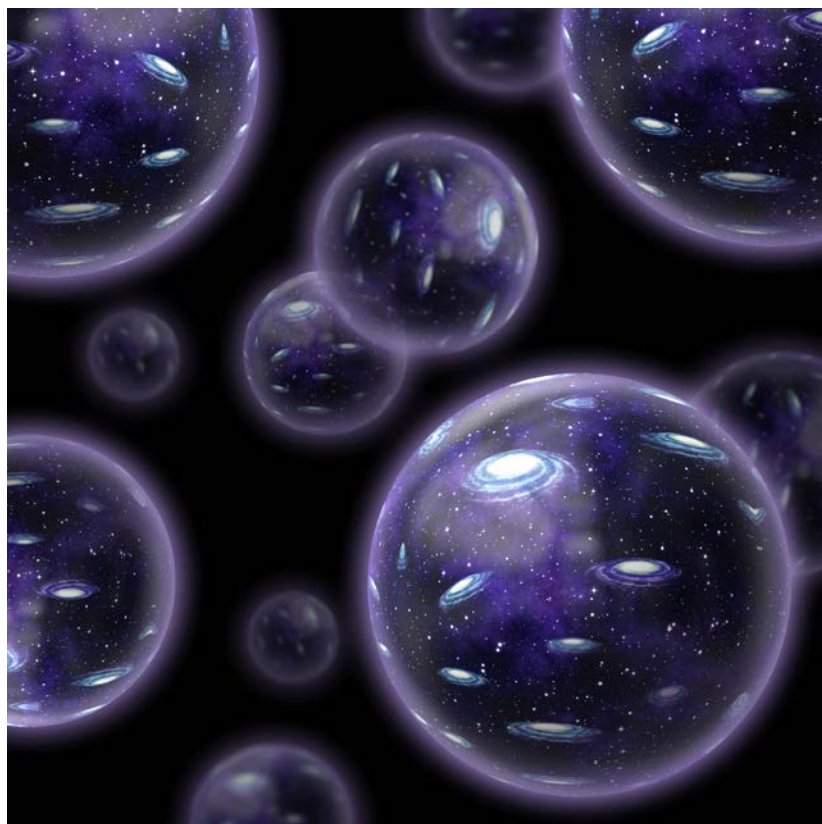
Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre les deux hypothèses.

Un paramètre que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision est le rapport entre la densité de l'énergie sombre et sa pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport adimensionnel). Ce paramètre, nommé paramètre d'état de l'énergie sombre et noté en général  $w$ , est égal à  $-1$  pour une constante cosmologique. Il diffère en général de  $-1$  pour un modèle de quintessence. Lorsque c'est le cas, la densité d'énergie associée n'est plus constante, mais varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes veulent mettre en évidence.

Les modèles de quintessence ne parviennent en général pas à expliquer le premier problème de la constante cosmologique. Mais certains pourraient apporter un éclairage intéressant sur le second problème *via*, par exemple, un couplage entre le champ scalaire et la matière ordinaire ou noire et qui expliquerait le fait que les densités d'énergie de quintessence et de matière sont du même ordre de grandeur aujourd'hui. Grâce à un tel couplage, la densité d'énergie de la quintessence est corrélée lors de l'histoire cosmique avec celle de la matière.

Une autre voie qui a le mérite de résoudre les deux problèmes à la fois est une approche anthropique conçue en particulier par l'Américain Steven Weinberg (Prix Nobel de physique en 1979). Selon lui, la valeur de la constante cosmologique est fixée librement au début de l'histoire de l'Univers. En imaginant tous les univers possibles, seuls ceux où cette valeur est proche ou inférieure à celle observée aujourd'hui permettent le développement de la vie telle que nous la connaissons. En effet, dans un univers où la constante cosmologique serait très supérieure à celle que nous inférons aujourd'hui, l'accélération de l'expansion cosmique aurait commencé trop tôt pour que se forment des structures telles que des étoiles ou des galaxies riches en éléments chimiques complexes. Dans un tel univers, la vie telle que nous l'observons n'aurait pas pu apparaître. Comme nous existons, il est normal d'observer une faible valeur (éventuellement nulle) de la constante cosmologique. ➤

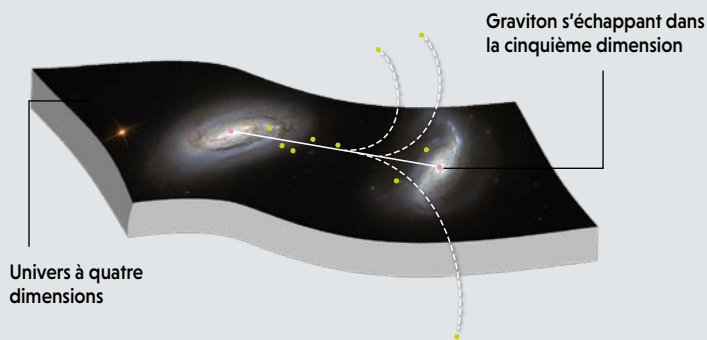
La théorie du multivers suppose que des bulles-univers ont des constantes fondamentales différentes, fixées aléatoirement lors de leur formation. Dans ce cadre, le principe anthropique explique la valeur de l'énergie du vide: la bulle-univers où nous sommes a les bons paramètres pour que la vie se soit développée.





## LE MODÈLE DGP

Les modèles d'univers dotés de dimensions supplémentaires peuvent offrir des solutions au problème de l'expansion accélérée de l'Univers. Celui développé par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati modifie les lois de la gravitation. Ces trois physiciens de l'université de New York ont construit un modèle d'univers, noté DGP (les initiales de leurs noms), qui ajoute une unique dimension d'espace aux quatre dimensions de l'espace-temps usuel. Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactes : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini, mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y propager. Les autres particules ne peuvent échapper à l'espace-temps usuel et, ainsi, la dimension supplémentaire échappe à nos sens mais peut être révélée *via* son effet sur la gravitation. Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que les gravitons s'échappent est faible.



Ainsi, les équations de la relativité générale reproduisent correctement les lois de la gravitation. À plus grande échelle, une certaine quantité de gravitons fuient dans la cinquième dimension (voir la figure). À de telles distances, les équations de la relativité générale ne décrivent donc plus correctement les interactions gravitationnelles.

L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale est valide sur de telles distances, donne l'impression que l'Univers a une vitesse d'expansion qui augmente. Ce résultat a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais le modèle DGP présente plusieurs difficultés théoriques et expérimentales.

> Depuis l'idée de S. Weinberg, la théorie des supercordes et certains modèles d'inflation cosmique nommés «inflation éternelle» (voir *La crise de croissance de l'Univers*, par A. Riazuelo, page 54) ont renforcé cette explication anthropique en fournissant un cadre théorique expliquant comment la valeur de la constante cosmologique pourrait avoir été «tirée au sort» dans les premiers instants de l'Univers. En effet, la théorie des supercordes conduit à penser que les valeurs de certains paramètres qui nous apparaissent comme des constantes de la nature (telle la constante cosmologique, ou la masse de certaines particules) peuvent varier dans l'Univers très primordial et se fixer parmi un très grand nombre de possibilités. Chaque combinaison donne un univers aux propriétés physiques différentes.

Par ailleurs, dans les scénarios d'inflation éternelle, qui peuvent également être incorporés dans certains modèles issus des supercordes, des bulles d'univers où les constantes de la nature prennent des valeurs différentes peuvent apparaître aléatoirement (voir la figure page précédente). Elles sont d'abord microscopiques, puis enflent jusqu'à devenir des univers séparés causalement les uns des autres. Chaque univers possède alors son propre jeu de paramètres et seuls certains sont compatibles avec l'apparition de la vie.

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : comment séparer les paramètres que l'on est autorisé

à faire varier, et pour lesquels on peut éventuellement donner une explication anthropique, des autres paramètres pour lesquels il pourrait exister une autre explication ? Doit-on aussi faire varier la forme des lois physiques ? D'autre part, personne ne sait comment calculer avec rigueur des probabilités d'apparition de la vie en tenant compte de l'ensemble des univers possibles. Enfin, on ne voit pas bien comment on pourrait réfuter une telle explication. Il se pourrait néanmoins que cela soit la bonne réponse.

Les modèles de constante cosmologique et de quintessence supposent que les lois de la gravitation, aux plus grandes échelles, sont bien décrites par la relativité générale. Mais peut-être la gravitation suit-elle d'autres lois aux échelles cosmologiques ?

## NEPTUNE OU MERCURE

Les physiciens ont souvent rencontré des situations où l'existence de constituants «sombres» était conjecturée à partir de leur influence gravitationnelle. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets, par exemple la planète Neptune par Urbain le Verrier au XIX<sup>e</sup> siècle, ou à la modification de la théorie de la gravitation. Ainsi, les anomalies de la trajectoire de Mercure, sur lesquelles s'était penché le Verrier, ne furent expliquées que bien après la mort de l'astronome par une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue : sauver les lois de la gravitation par l'introduction de composants sombres (matière noire

et énergie sombre) ou bien tenter de modifier ces lois pour expliquer les observations.

Par exemple, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a proposé en 1983 un cadre théorique assez séduisant pour éviter l'hypothèse de la matière noire. Les lois de la gravitation sont modifiées quand l'accélération d'un corps est plus faible qu'une valeur critique. Mais le modèle a ses propres difficultés.

## MODIFIER LA GRAVITATION...

Pour ma part, alors que je travaillais à l'université de New York en 2001, j'ai remarqué que le modèle dit DGP, proposé peu de temps auparavant par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati, également à l'université de New York, fournit une alternative intéressante à l'idée d'énergie sombre. Dans ce modèle, qui suppose en particulier l'existence de dimensions d'espace supplémentaires, la gravitation d'Einstein est modifiée à très grande distance et une accélération cosmique peut apparaître sans qu'il y ait besoin d'une constante cosmologique non nulle (voir l'encadré page ci-contre).

Ce modèle est lié à la recherche d'une «gravité massive» où le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de la force gravitationnelle, a une masse non nulle, alors que la relativité générale implique qu'elle est nulle. L'interaction a alors une portée infinie et se propage à la vitesse de la lumière. Dans le cas du modèle DGP, le graviton est la seule particule capable de se propager dans la dimension supplémentaire. De façon générale, des particules qui évoluent dans une dimension supplémentaire sont perçues comme un ensemble de particules massives par un observateur qui n'a pas accès à cette dimension. Les gravitons massifs du modèle DGP conduisent à grande distance à une déviation par rapport à la théorie d'Einstein.

On peut d'ailleurs remarquer qu'Einstein croyait (à tort) que l'introduction de la constante cosmologique résulterait en un potentiel gravitationnel semblable à celui créé par un graviton massif. Il existe donc un lien historique entre la constante cosmologique et la gravité massive. Le modèle DGP était le premier cadre proposant explicitement un lien entre accélération cosmique et modification à grande distance de la gravitation. Cependant, ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant, puisqu'il rencontre des difficultés théoriques et observationnelles. Il a néanmoins attiré l'attention de certains physiciens qui s'en sont inspirés.

L'idée était donc de construire une théorie relativiste de la gravitation où le graviton serait de masse non nulle. L'une des motivations est que cette masse, qui peut jouer un rôle analogue à celui de la constante cosmologique, peut être «protégée» par une symétrie et donc avoir une valeur naturellement petite, ce qui

évite tout écart par rapport à la relativité générale sur de faibles distances.

Construire une théorie relativiste de la gravitation intégrant un seul graviton massif (et non une infinité comme dans le modèle DGP) et dépourvue de problèmes graves est longtemps resté un défi. Les premiers essais sont même antérieurs à DGP et datent de 1939, avec Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Ces physiciens suisses ont introduit une masse pour le graviton de la relativité générale de façon perturbative – c'est-à-dire en ajoutant des termes linéaires de faibles valeurs. Mais en 1970, les physiciens Hendrik van Dam, Martinus Veltman et, indépendamment, Vladimir Zakharov ont montré que le modèle de Fierz et Pauli ne redonnait pas les équations de la relativité générale lorsqu'on faisait tendre la masse du graviton vers zéro. La théorie restait cohérente, mais elle s'accompagnait d'effets mesurables qui n'ont pas été observés. Deux ans plus tard, Arkady Vainshtein a montré que le problème du modèle venait du traitement linéaire. Il a suggéré qu'un traitement non linéaire pouvait résoudre le problème observationnel, mais des travaux ultérieurs ont montré que d'autres difficultés théoriques surgissaient alors.

## ... AVEC UN GRAVITON MASSIF

En 2010, en se fondant sur les travaux liés au modèle DGP, Claudia de Rham alors à l'université de Genève, Gregory Gabadadze et Andrew Tolley, de l'université Case Western Reserve, aux États-Unis, ont construit un modèle à graviton massif qui semble dénué des problèmes de ses prédécesseurs. Ce modèle est toujours à l'étude, en particulier ses conséquences cosmologiques.

Il faut souligner qu'il est très difficile de modifier la relativité générale à grande distance tout en restant en accord avec les différents tests de cette théorie, et il est encore plus difficile de trouver une théorie qui reproduise les différentes propriétés observables de l'énergie sombre et, plus encore, de la matière noire.

Pour l'instant, aucune des approches mentionnées, ainsi que d'autres que nous n'avons pas évoquées (comme celles qui consistent à renoncer en partie au principe cosmologique, ou à tenter d'expliquer l'accélération cosmique par l'effet des hétérogénéités de matière), ne fait l'unanimité, d'autant que le modèle de la constante cosmologique a la vertu de la simplicité et est bien compatible avec les données. Mais les problèmes qu'il pose, on l'a vu, ont engendré bien des travaux qui ont eu aussi le mérite de pousser à mieux comprendre le modèle cosmologique standard.

Les données à venir, notamment celles des grands programmes d'observation tels qu'*Euclid*, devraient permettre d'invalidier un certain nombre d'approches et de mieux comprendre les propriétés mystérieuses de l'énergie sombre et de la gravitation aux très grandes distances. ■

## BIBLIOGRAPHIE

C. DE RHAM ET AL.,  
*Resummation of massive gravity*,  
*Phys. Rev. Lett.*,  
vol. 106, 231101, 2011.

G. BÖRNER,  
*L'énergie sombre  
et ses alternatives*,  
*Dossier Pour la Science*,  
n° 71, avril-juin 2011.


C. DEFFAYET ET AL.,  
*Accelerated universe  
from gravity leaking  
to extra dimensions*,  
*Phys. Rev. D*,  
vol. 65, 044023, 2002.

G. DVALI ET AL.,  
*4D gravity on a brane  
in 5D Minkowski space*,  
*Phys. Lett. B*,  
vol. 485, n° 1-3,  
pp. 208-214, 2000.



# La crise de CROISSANCE de l'Univers

Plusieurs propriétés de l'Univers s'expliquent par l'inflation, une gigantesque expansion juste après le Big Bang. Cette théorie a été sans cesse renforcée par les observations et, malgré un début de controverse, elle reste difficile à remettre en cause...



Quoi de mieux qu'un ballon pour étudier l'inflation de l'Univers! C'est l'objectif de la mission Piper de la Nasa.

## L'ESSENTIEL

- Pour expliquer l'homogénéité de l'Univers, Alan Guth proposa l'idée d'inflation: une formidable expansion peu après le Big Bang.
- Elle serait due à un champ scalaire, l'inflaton, qui se comporte comme un fluide de pression négative.
- Plusieurs observations, du fond diffus et des galaxies, aident à préciser le scénario de l'inflation.
- Le nombre de modèles en lice sera drastiquement réduit par la découverte des ondes gravitationnelles primordiales.

## L'AUTEUR



ALAIN RIAZUELO  
Chargé de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique de Paris et ancien membre du consortium de la mission *Planck*.

# E

**En 1917 Albert Einstein tente de décrire la première solution de ses équations susceptible de décrire l'Univers tout entier.**

Confronté à l'effroyable complexité de son œuvre, il pose alors une hypothèse révolutionnaire: l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire que la matière y est, à grande échelle, répartie de façon uniforme, et ce à toute distance et dans toutes les directions. À une époque où l'existence même d'objets situés en dehors de la Voie lactée fait débat, l'hypothèse est des plus audacieuses. Elle sera validée par les travaux d'Edwin Hubble... dix ans plus tard.

Mais pourquoi l'Univers devrait-il être aussi régulier alors que la gravité est une force qui va à l'encontre d'une telle caractéristique? Un tel paradoxe nécessitait de façon cruciale une justification physique. La réponse viendra en 1980, avec l'idée de l'inflation cosmique, émise par Alan Guth, à la suite de travaux précurseurs des belges Robert Brout et François Englert ainsi que du russe Alexei Starobinsky. L'idée est de dire que l'expansion de l'Univers a connu une phase particulièrement violente, de sorte qu'une région initialement très petite, et ayant donc eu le temps de s'homogénéiser, a subi pour une raison à déterminer une phase d'expansion cataclysmique qui

l'a agrandie bien au-delà de la taille de l'Univers observable actuel. Cette idée s'est peu à peu imposée et s'est vu conforter par diverses observations. Néanmoins, toute la communauté des cosmologistes n'y adhère pas, suscitant un début de controverse...

## LE MIRACLE DE L'UNIVERS

Voyons d'abord pourquoi l'idée d'inflation est solide. Aujourd'hui, dans l'Univers, la matière est répartie moins uniformément que 380000 ans après le Big Bang, au moment de l'émission du fond diffus cosmologique, un rayonnement fossile qui nous offre une photographie remarquablement fidèle de cette époque (*voir L'étrange affaire Univers, par A. Riazuelo, page 16*). Que nous montre-t-elle? Que sur une région sphérique centrée sur nous et qui mesure, du fait de l'expansion de l'Univers, plusieurs dizaines de milliards d'années-lumière de diamètre, la densité de matière y est extraordinairement homogène, ne s'écartant pas de sa valeur moyenne de plus d'une fraction de pourcent.

Or, depuis l'émission du fond diffus, l'expansion n'a fait que multiplier les distances par 1000: deux points diamétralement opposés sur cette sphère étaient, à l'époque, éloignés de plusieurs dizaines de millions d'années-lumière. Mais dans les premières 380000 années après le Big Bang, même la lumière n'a pas eu le temps de parcourir une telle distance. Aussi, ces deux régions, n'ayant, *a priori*, pas eu le temps de communiquer de quelque façon que ce soit, n'ont aucune raison d'être dotées d'une densité quasi identique.

En poursuivant ce raisonnement, l'Univers était d'autant plus homogène qu'il était jeune, et plus encore lors du Big Bang. Par quel miracle? Car même si on ne sait pas prédire l'état de l'Univers lors du Big Bang, un Univers très homogène semble résulter d'un hasard hautement improbable. >

➤ Cette idée d'Univers anormalement homogène a été évoquée pour la première fois par Robert Dicke au début des années 1960 sous le nom de problème de l'horizon, l'horizon se référant, en cosmologie, à la distance maximale qu'une information est susceptible de parcourir (c'est-à-dire en se propageant à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière). De fait, l'observation d'un Univers homogène à grande échelle suggère que les échanges d'informations nécessaires à l'Univers pour acquérir une densité homogène, ont eu lieu sur des distances bien supérieures à celle de l'horizon.

L'idée de Guth résout le problème: l'information n'a pas voyagé à une vitesse supérieure à celle de la lumière, seule l'expansion a été bien plus rapide qu'on le croyait. Les équations de la gravitation nous disent qu'un tel tour de force est possible si l'Univers est majoritairement rempli d'un fluide aux propriétés assez atypiques, puisque sa pression doit être négative et quasiment opposée à sa densité. Rappelons que pour toutes les formes de matière macroscopique connues, la pression est une mesure de l'énergie cinétique de ses constituants élémentaires et est donc une quantité positive. Impossible pour la matière ordinaire d'être dotée de pression négative!

Cependant, les physiciens théoriciens ont depuis longtemps pallié cette difficulté en imaginant une forme de matière à pression négative, c'est un champ scalaire. Le champ de Higgs, responsable de l'existence du boson de Higgs, en est un exemple.

Que se passe-t-il en présence d'un tel champ scalaire? Sa dynamique sur une région où il prend la même valeur partout peut se résumer à celle d'une bille qui roule dans un potentiel à une dimension. Plus la pente où se trouve la bille est raide, plus elle accélère pour rejoindre un

minimum de son potentiel. La bille possède deux formes d'énergie: une énergie cinétique, du fait de la vitesse à laquelle elle se déplace, et une énergie potentielle, d'autant plus importante que la bille est située en hauteur. Quant à la pression du champ scalaire, elle est égale à la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, et peut donc prendre des valeurs négatives.

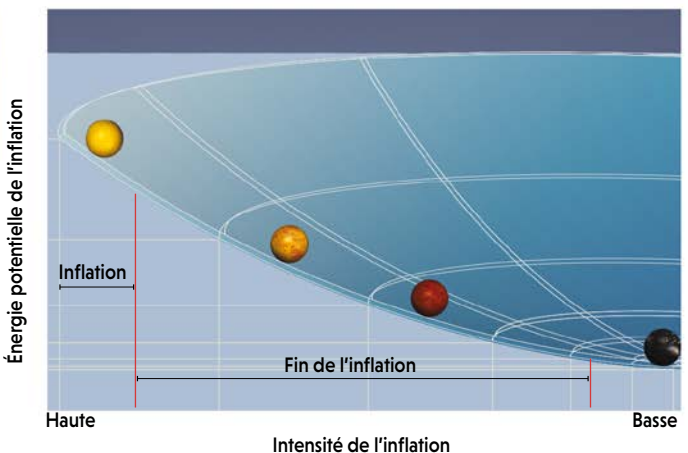
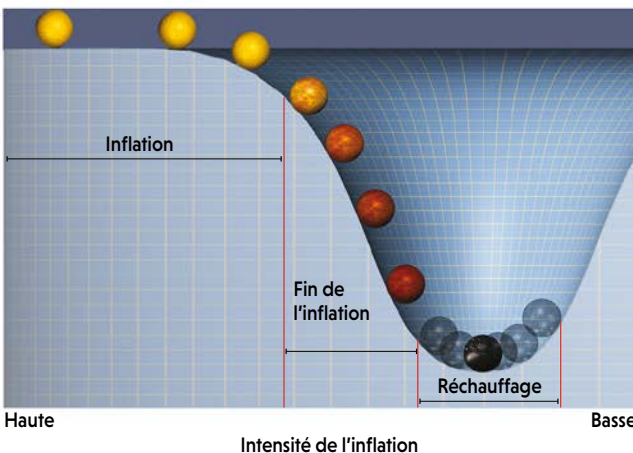
**COMME UNE BOULE DE FLIPPER**

Mieux, lorsque la bille est à faible vitesse dans une région où la pente est faible, son énergie cinétique devient négligeable et va le rester un certain temps, car elle ne peut accélérer beaucoup. Sa pression est alors, pendant longtemps, quasiment opposée à sa densité d'énergie. Ainsi, ce champ scalaire, nommé inflaton, se comporte comme un fluide de pression négative qui entraîne l'inflation, cette expansion quasi exponentielle.

Par exemple, pour un modèle typique, l'inflation débute à des températures de  $10^{29}$  degrés ou plus, et en moins de  $10^{-37}$  seconde, les distances dans l'Univers sont multipliées par deux. Au bout de dix fois cette durée, les distances ont été multipliées par 1000. Après encore dix fois plus longtemps, soit  $10^{-35}$  seconde, les distances ont été multipliées par...  $10^{30}$ . Il suffit qu'une région d'à peine  $10^{-32}$  mètre ait vu ce champ avoir des valeurs constantes en son sein pour qu'elle mesure alors un centimètre, qui, du fait de l'expansion ultérieure après l'inflation va encore grossir d'un facteur  $10^{29}$ , pour atteindre une taille de cent milliards d'années-lumière aujourd'hui, soit la taille de l'Univers observable...

L'inflation dure tant que l'énergie cinétique du champ est faible, mais celui-ci finit toujours par accélérer et rejoindre son minimum de potentiel, auquel cas son énergie potentielle finit par s'annuler: inévitablement, l'inflation s'arrête, mais l'aspect exponentiel de l'expansion de

La dynamique de l'inflaton, le champ scalaire responsable de l'inflation, ressemble à celle d'une bille sur un parcours donné, son potentiel! L'inflation débute quand l'inflaton est éloigné du minimum du potentiel et dure d'autant plus longtemps que le champ est au-dessus de celui-ci et situé dans une région plate (la bille se déplace lentement). L'inflation se termine quand le champ approche en accélérant d'un minimum. Aujourd'hui, les données privilégient les modèles dont le potentiel a une région concave (à gauche) au détriment des potentiels convexes (à droite).





## L'inflation relègue la question de l'état antérieur de l'Univers à celui de chimère, car on ne peut pas y accéder

l'Univers qu'elle produit fait qu'elle n'a pas besoin de durer bien longtemps pour opérer.

Mais si l'inflation dilate démesurément une petite région de l'espace, pourquoi le résultat ne serait-il pas, cette fois, parfaitement homogène? Dans un tel cas, aucun écart de densité ne devrait être visible dans le rayonnement fossile 380 000 ans après le Big Bang... et par suite aucune galaxie ne se serait formée!

Cette fois, l'aide nous vient des lois du monde microscopique, et de façon inattendue. Même parfaitement homogène, une région où se produit l'inflation est soumise aux minuscules fluctuations quantiques du vide. D'ordinaire, on peut les imaginer comme d'éphémères apparitions de paires de particules qui s'évanouissent presque aussitôt dans le vide. Ici, il en va autrement.

Le champ fluctue, c'est-à-dire qu'il prend des valeurs légèrement différentes ici et là du fait des incertitudes quantiques. Cependant, loin de disparaître quasi instantanément, ces fluctuations se trouvent considérablement dilatées par l'inflation et survivent au processus. À la fin de l'inflation, elles ont une amplitude faible, mais ont atteint une taille gigantesque et sont comme gelées. Elles vont ensuite évoluer lentement pour donner naissance à des fluctuations de densité macroscopiques d'où naîtront les galaxies. C'est là le tour de force de l'inflation. Elle permet à l'Univers d'être très homogène à grande échelle et à la fois, de façon indissociable, de se doter de perturbations de densité où se formeront, quelques centaines de millions d'années plus tard, les galaxies.

Quelle est la structure de ces fluctuations de densité? Une des caractéristiques de l'inflation est qu'elle produit des fluctuations à une multitude d'échelles, mais à une amplitude presque identique quelle que soit l'échelle. On parle alors de fluctuations invariantes d'échelle, l'écart des

fluctuations à cet état dépendant des détails du modèle, c'est-à-dire de la forme du potentiel de l'inflaton. Les observations révèlent ainsi que les fluctuations de grande taille sont en moyenne un peu plus marquées que celle de petite taille.

À l'issue de l'inflation, l'Univers est désespérément vide de matière. Tout ce qui existait à l'exception de l'inflaton a vu sa densité décroître d'un facteur fantastiquement grand, de l'ordre de  $10^{90}$  par exemple pour des particules de matière. Dès lors comment peupler l'Univers avec le contenu matériel que nous lui connaissons? L'inflaton, s'il n'est pas formé de matière ordinaire, a une énergie extrêmement élevée, celle-ci ne pouvant se transmuter en une autre forme d'énergie, par exemple des particules, à la fin de cette phase.

### LE PRÉCHAUFFAGE DE L'UNIVERS

Une telle hypothèse est non seulement possible, mais apparaît naturellement quand l'inflation prend fin. En effet, à ce moment, l'inflaton approche de son minimum de potentiel autour duquel il oscille quelque temps. Or si l'inflaton est susceptible d'interagir avec une autre forme de matière, ces oscillations correspondent exactement à ce qu'il faut pour transmuter l'inflaton en ces nouvelles particules. Les calculs indiquent même que les oscillations de l'inflaton au fond de son potentiel sont à l'origine d'une production explosive de particules, nommée le «préchauffage». Ce terme s'explique ainsi: en l'absence de particules, l'Univers, bien que doté d'une grande densité d'énergie sous la forme de l'inflaton, ne peut se voir doté d'une température. Pour associer une température à cette densité d'énergie, l'Univers doit se peupler de particules, ce qui se produit lors du préchauffage.

Ensuite, ces particules nouvellement apparues interagissent et acquièrent une distribution en énergie définissant une température, elle-même dépendant de la densité d'énergie: c'est assez logiquement le «réchauffage», à l'issue duquel l'expansion de l'Univers prend le rythme qu'elle va garder pendant plusieurs milliards d'années, c'est-à-dire en décélérant.

La seule chose que l'on demande à l'inflation est de durer suffisamment longtemps pour dilater les distances d'un facteur  $10^{30}$  environ (le chiffre exact dépend en pratique de la température de l'Univers à la fin de cette phase), ce pour quoi il suffit que l'inflation dure une infime fraction de seconde. Mais rien n'interdit que cette phase dure bien plus longtemps. Il suffit pour cela que le potentiel de l'inflation soit suffisamment plat et que le champ soit au départ assez loin du minimum, ce qui *a priori* n'est pas impossible.

Dans ce cas, la phase d'inflation peut durer bien plus longtemps, et puisque le facteur de >

> dilatation qu'elle produit augmente exponentiellement au cours du temps, celui-ci peut devenir démesurément grand, passant du minimum requis de  $10^{30}$  à  $10^{100}$ , voire...  $10^{1000000}$ . L'inflation introduit donc une nouvelle échelle de distance, très incertaine mais potentiellement inimaginablement plus grande que les quelques dizaines de milliards d'années-lumière qui définissent la région de l'Univers accessible à nos observations, et qui se voient ainsi reléguées à une insignifiance cosmique presque effrayante. Que trouve-t-on au-delà de cette échelle de distance? Nul ne le saura jamais avec certitude, mais probablement un Univers à nouveau hétérogène, tel qu'il l'était à plus petite échelle avant le début de l'inflation, suite à l'évolution qu'avait alors connue l'Univers préinflationnaire.

L'inflation renvoie donc la question de l'état antérieur de l'Univers à celui de chimère, car on ne peut pas y accéder. Tout au plus peut-on affirmer dans ce contexte que celui-ci a permis à l'inflation de démarrer quelque part. En ce sens, l'inflation pourrait représenter la limite ultime du savoir humain, cette phase ayant effacé toute trace de l'état antérieur de l'Univers.

**OBSERVER L'INFLATION ?**

Grâce au fond diffus et aux catalogues de galaxies, on pourrait déterminer les amplitudes actuelles et passées des fluctuations de densité, et ainsi remonter à leur état à la fin de l'inflation. Ce serait donc un moyen de tester cette idée. De façon schématique, l'étude de l'amplitude des fluctuations de densité sur l'ensemble des échelles observables aide à reconstituer une partie du potentiel de l'inflaton et ainsi déterminer quel modèle a été à l'œuvre. Cependant, la tâche est ardue pour deux raisons. D'abord, nous n'avons, en pratique, pas accès à suffisamment d'échelles différentes pour reconstituer une large part du potentiel de l'inflaton (puisque celui-ci se déplace lentement sur son potentiel pendant la phase d'inflation où il produit des fluctuations de densité). Ensuite, l'ensemble des incertitudes dans les mesures et leur analyse empêche une reconstitution fidèle du potentiel dans la petite région où il est possible de le faire, de sorte que ce n'est pas un modèle d'inflation qui est privilégié par les données, mais plutôt un ensemble.

Aujourd'hui, environ 25% des modèles proposés dans la littérature sont conformes aux données; ils ont tous en commun d'être localement concaves (voir la figure, page 56). Une fraction un peu plus importante de ces modèles, uniquement convexes, ne l'est en revanche pas du tout. Les autres modèles sont dans une zone intermédiaire.

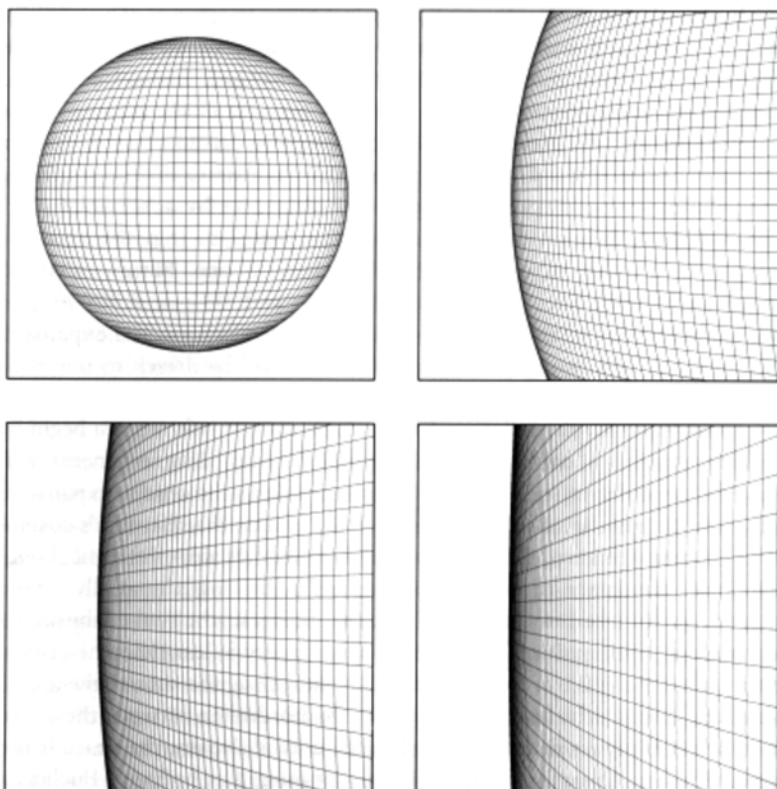
Une autre prédiction importante de l'inflation a pu être vérifiée: les fluctuations doivent

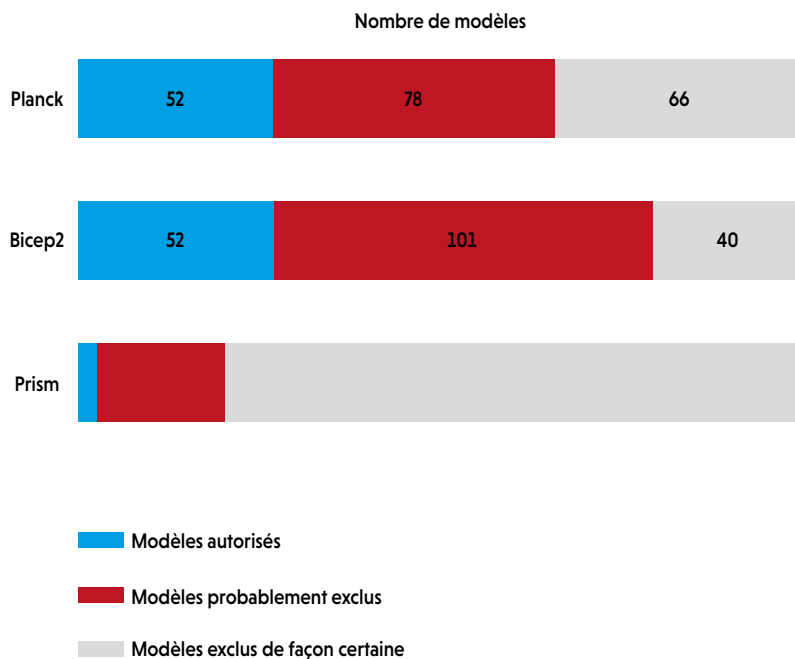
avoir une statistique bien précise, dite statistique gaussienne. Schématiquement, elle stipule que les fluctuations s'écartant fortement de l'amplitude moyenne à une échelle donnée sont particulièrement rares. Ce point a pu être confirmé avec une précision remarquable par les données du satellite *Planck*.

Enfin, les données vérifient à une très haute précision ce qui fut historiquement la première prédiction de l'inflation, à savoir que l'Univers est « plat », c'est-à-dire que les lois de la géométrie euclidienne (la somme des trois angles d'un triangle est égale à 180 degrés, par exemple) y sont valables à toutes les échelles, car l'éventuelle courbure initiale de l'Univers a elle aussi été considérablement dilatée par l'expansion.

Toutefois, malgré ce faisceau d'indices plaçant pour l'inflation, tous les cosmologistes ne sont pas convaincus. Ainsi, récemment, quelques physiciens, dont un des pionniers de la théorie de l'inflation, Paul Steinhardt, ont publié une lettre ouverte critiquant le concept de l'inflation (voir *L'inflation va-t-elle faire pschitt*, par A. Ijjas, page 60). Selon eux, elle ne correspondrait pas à une théorie scientifique, car quels que soient les résultats apportés par le fond diffus cosmologique, il existera toujours un modèle d'inflation susceptible de les expliquer. En d'autres termes, l'inflation ne serait pas un concept falsifiable.

L'inflation a annulé l'éventuelle courbure de l'Univers jeune en le dilatant considérablement. Ainsi l'Univers est-il « plat », c'est-à-dire que la géométrie euclidienne y reste valable, même à grande échelle.





Parmi tous les modèles d'inflation envisagés, un tiers sont exclus par les données du satellite *Planck* (en haut), et seul un quart ont une chance d'être réellement compatibles avec les données. L'expérience Bicep2 obtient un résultat comparable, quoiqu'un peu moins bon (au centre). Les missions en préparation, tel Prism, réduiront drastiquement le nombre de modèles autorisés (en bas).

matériel dont les propriétés permettent à ces théories de se réaliser.

Peut-on mieux tester l'inflation? Bien sûr, avec de meilleures données! Pour ce faire, il reste à vérifier la dernière prédiction de l'inflation: la présence d'ondes gravitationnelles primordiales. De même que les fluctuations quantiques de l'inflaton donnent naissance à des fluctuations classiques de densité, les fluctuations de l'espace-temps lui-même subiront le même sort que les fluctuations de l'inflaton et donneront naissance à des ondes gravitationnelles de très grande taille et très basse fréquence. Impossible donc de les détecter avec les interféromètres du type Ligo ou Virgo, les appareils qui se sont illustrés dans l'observation d'ondes gravitationnelles d'un autre genre, celles nées de la collision de trous noirs.

L'argumentation est fragile. En effet, s'il est possible qu'un modèle d'inflation compliquée donne lieu à un Univers à la structuration étrange, ce n'est pas ce que l'on observe. De même, de nombreux modèles d'inflation où plusieurs champs interviennent donnent lieu à des prédictions plus variées et donc plus ajustables à n'importe quelle observation. Cependant, les statistiques des fluctuations ne sont alors plus gaussiennes, ce qui n'est plus conforme aux observations.

Ainsi, le paysage que nous révèle l'Univers est compatible avec un scénario relativement simple d'inflation. Et du reste, le tout premier modèle d'inflation proposé, celui d'Alexei Starobinsky, compte parmi ceux qui rendent au mieux compte des données. Et bien que certains aient été élaborés avant l'avènement de l'ère observationnelle, aucun modèle «bizarre» ou *ad hoc* n'a besoin d'être invoqué pour expliquer les observations réelles qui ont toutes pour l'instant confirmé les prédictions les plus canoniques de l'inflation.

En fin de compte, nous n'avons, pour l'heure, besoin que d'un modèle remarquablement simple pour expliquer le réel, ce qui affaiblit considérablement le propos des auteurs se plaignant en substance que toute bizarrerie dans les données pourrait de toute façon être expliquée par un modèle d'inflation *ad hoc*. De même leur argumentation selon laquelle le démarrage de l'inflation ne peut se faire que si des conditions très particulières sont réunies se heurte au fait que rien n'assure que les conditions permettant à d'autres scénarios de l'inflation de se produire sont, elles, plus faciles à réunir (il existe en fait plusieurs raisons de penser le contraire), ni qu'il existe un contenu

## D'AMBITIEUX PROJETS

Toutefois, ces ondes gravitationnelles ont affecté la propagation des photons du rayonnement fossile et laissé une empreinte dans celui-ci, notamment en changeant sa polarisation. La polarisation du rayonnement est mesurable, mais elle est très faible et fortement dissimulée par la polarisation de rayonnements d'avant-plan qui se superposent au rayonnement fossile, notamment le rayonnement thermique des régions froides de notre galaxie.

C'est cette polarisation que l'expérience Bicep2 a cru avoir détectée en 2014 avant que cette annonce ne soit démentie, la polarisation observée étant celle de notre galaxie. L'inflation ne prédit malheureusement pas le niveau d'amplitude de ces ondes gravitationnelles primordiales, qui pourrait être à peine inférieur à ce que l'on peut détecter... ou 1 million de fois trop faible pour l'être avec les moyens actuels.

Les cosmologistes envisagent depuis quelques années des successeurs au satellite *Planck*. Les candidats sont nombreux: les projets Prism et Core+, de l'Agence spatiale européenne, LiteBird, de l'Agence spatiale japonaise, Epic de la Nasa. Tous ont pour ambition d'améliorer la sensibilité à la polarisation jusqu'à un facteur 1000.

De tels projets, en ouvrant la porte à la détection des ondes gravitationnelles primordiales, réduiraient le nombre de modèles compatibles avec les données. Incidemment, on confirmerait de la plus belle manière Albert Einstein, qui avait prédit l'existence d'ondes gravitationnelles en 1916. Une illustration de l'effroyable efficacité de son œuvre! ■

## BIBLIOGRAPHIE

JEROME MARTIN ET AL.,  
How well can future CMB  
missions constrain cosmic  
inflation?, *JCAP*,  
vol. 1410, 038, 2014.

JEROME MARTIN ET AL.,  
Encyclopaedia Inflationaris,  
*Phys. Dark Univ.*, vol. 5-6,  
pp. 75-235, 2014.



L'ESSENTIEL

- Les dernières mesures sur le fond diffus cosmologique (la plus ancienne lumière de l'Univers), sèment le doute sur l'idée d'inflation.
- L'inflation aurait dû se traduire par des motifs de variation de température différents de ceux que l'on observe.
- Elle aurait aussi dû produire des ondes gravitationnelles que l'on n'a pas encore détectées.
- Les données doivent pousser les cosmologistes à réviser leur scénario favori et à prendre en compte de nouvelles idées quant aux débuts de l'Univers.

LES AUTEURS



ANNA IJAS  
postdoctorante  
au centre de science  
théorique  
de Princeton.



PAUL STEINHARDT  
professeur  
à l'université  
de Princeton.



ABRAHAM LOEB  
à la tête  
du département  
d'astronomie de  
l'université Harvard.

# L'INFLATION va-t-elle faire pschitt ?

Les dernières mesures de *Planck* ainsi que des problèmes théoriques mettent à mal l'idée d'inflation, pourtant défendue par nombre de cosmologistes. Le temps des nouvelles idées est venu !

**L**

Le 21 mars 2013, l'Agence spatiale européenne annonçait lors d'une conférence de presse les derniers résultats obtenus par *Planck*. Le satellite avait cartographié avec une précision inégalée le fond diffus cosmologique, un rayonnement, aujourd'hui sous la forme de micro-ondes, émis quelque 380 000 ans après le Big Bang, c'est-à-dire il y a plus de 13 milliards

d'années. Selon les orateurs, la carte confirmait une théorie que les cosmologistes défendaient depuis 35 ans: le «Bang» originel de l'Univers avait été suivi d'une brève et intense période d'expansion hyperaccélérée: l'inflation. Ce phénomène aurait «lissé» l'Univers au point qu'aujourd'hui, des milliards d'années plus tard, il apparaît, d'une part, uniforme où que l'on regarde et, d'autre part, «plat», au sens géométrique. Tout allait donc pour le mieux dans le meilleur des Univers.

Le principal message à retenir était que les résultats de *Planck* coïncidaient parfaitement avec les prédictions des plus simples modèles d'inflation et confortaient donc la théorie. Les manuels de cosmologie pouvaient désormais être gravés dans le marbre. Point final, vraiment? >

L'inflation va-t-elle faire pschitt?



> Réunis par le hasard des affectations et des choix de carrière, nous avons tous les trois discuté de ce que signifie vraiment cette annonce. Notons que l'un de nous (Paul Steinhardt) est l'un des architectes de la théorie de l'inflation. Nous avons bien sûr apprécié la précision des observations de *Planck*, mais nous sommes en désaccord avec leur interprétation. En premier lieu, nous pensons que les données de *Planck* ne plaident pas en faveur des plus simples des modèles d'inflation. Ensuite, elles soulignent davantage encore les problèmes fondamentaux de la théorie. Dans les années qui ont suivi, les données plus fines recueillies par *Planck* et d'autres instruments n'ont fait qu'exacerber nos désaccords. C'est une motivation suffisante pour regarder de plus près les théories concurrentes sur l'origine et l'évolution de l'Univers.

### SUIVEZ L'ORACLE

Pour mettre en évidence les problèmes que soulève l'inflation, adhérons sans se poser de questions à ce que clament ses partisans: elle a bien eu lieu. Imaginons maintenant qu'un oracle nous affirme qu'elle s'est déroulée peu après le Big Bang. En acceptant sa parole en tant que fait, qu'apprendrait-on sur l'évolution de l'Univers? Si l'inflation offrait vraiment une explication simple, nous aimerions que la prophétie de l'oracle nous en dise beaucoup plus sur ce qu'il faut attendre des données de *Planck*.

Une des choses qu'elle pourrait nous enseigner est que, peu après le Big Bang, une petite région de l'espace contenait une forme exotique d'énergie qui en a permis l'expansion accélérée (l'inflation). Exotique, car les formes connues d'énergie, qu'elles soient sous la forme de matière ou de rayonnements, s'opposent et freinent l'expansion de l'Univers par des effets gravitationnels. Or l'inflation requiert que l'Univers ait été empli à un moment, densément, d'une énergie opposée à la gravitation qui aurait favorisé l'expansion et l'aurait accélérée.

Pendant, cet ingrédient indispensable – l'énergie inflationnaire – est purement hypothétique. Nous n'avons aucun indice de son existence. Plus encore, depuis 35 ans, des centaines de candidats ont été proposés pour remplir ce rôle, avec chacun son taux d'inflation et d'expansion. En d'autres termes, l'inflation n'est pas une théorie rigoureuse, mais un cadre théorique très flexible qui autorise beaucoup de libertés!

Que peut ajouter l'oracle qui soit vrai pour tous les modèles, indépendamment du type d'énergie inflationnaire? D'abord, nous pouvons être sûrs, sur la base de ce que nous savons en physique quantique, que la température et la densité de matière après l'inflation devaient varier d'un endroit à un autre.

Des fluctuations quantiques aléatoires dans la concentration d'énergie inflationnaire à des échelles subatomiques auraient été

étirées durant l'inflation en des régions distinctes gigantesques. La théorie stipule que l'inflation s'est arrêtée quand l'énergie inflationnaire s'est transformée en matière ordinaire et en rayonnements. Là où la densité d'énergie inflationnaire était légèrement supérieure, l'inflation a duré un peu plus longtemps. Les fluctuations d'origine quantique dans l'énergie inflationnaire devraient se traduire par des zones différentes, un peu plus chaudes ou un peu plus froides, dans le fond

**L'inflation  
est un cadre  
théorique  
très flexible  
qui autorise  
beaucoup  
de libertés!**

diffus cosmologique qui garde la trace de cette époque. Durant les 13,7 milliards d'années qui ont suivi, sous l'influence de la gravité, ces variations infimes se retrouveraient dans la trame que forment au final les galaxies et les structures à grande échelle.

C'est un bon point de départ, quoi qu'un peu vague. Pouvons-nous prévoir le nombre et l'agencement des galaxies à travers l'Univers? Le degré de courbure et de déformation de l'espace? Les quantités de diverses matières et d'autres formes d'énergie contenues dans l'Univers actuel? La réponse est non. L'idée d'inflation est si souple, que tout est possible! L'inflation nous dit-elle pourquoi le Big Bang s'est produit ou comment le premier «paquet» d'espace est apparu avant d'éventuellement devenir l'Univers que nous connaissons? La réponse est encore non.

Même en sachant vraie l'inflation, nous ne serions pas plus en mesure de prédire les points chauds et froids observés par *Planck*. Pourtant, ils obéissent à une certaine logique. En effet, la répartition de ces zones est quasi identique quel que soit le zoom: cette propriété est l'invariance d'échelle. Les plus récentes données de *Planck* révèlent que l'écart par rapport à une parfaite invariance d'échelle est minime. De plus, les variations de température à travers tous les points n'excèdent pas... 0,01%.



Les partisans de l'inflation prétendent souvent qu'elle peut conduire à un tel profil du fond diffus. Certes, mais à bien d'autres aussi! Et tous ne sont pas invariants d'échelle ni même avec une gamme de température si restreinte. En d'autres termes, la carte dressée par *Planck* n'est pas nécessairement une confirmation de l'inflation.

## LES ONDES GRAVITATIONNELLES MANQUANTES

Avec une inflation certaine, une caractéristique serait à coup sûr détectée dans la carte du fond diffus cosmologique, car elle est commune à toutes les formes d'énergie inflationnaire les plus simples, y compris celles présentées dans les manuels. Laquelle? En même temps qu'elles ont créé des variations aléatoires dans la densité d'énergie inflationnaire, les fluctuations quantiques ont également dû produire des déformations dans l'espace-temps qui se sont propagées sous la forme d'ondes de distorsion à travers l'Univers une fois l'inflation achevée. En un mot: l'inflation a généré des ondes gravitationnelles.

Elles constituent une autre source de points chauds et froids dans le fond diffus cosmologique, quoique avec un autre profil de polarisation. Plus précisément, les ondes gravitationnelles obligent la lumière à privilégier une orientation de son champ électrique, celle-ci dépendant de la température de la zone d'émission.

Mais c'est un fait, aucune onde gravitationnelle d'origine inflationnaire n'a été trouvée. Les cosmologistes les traquent depuis les premières mesures du satellite *Cobe* (*Cosmic Background Explorer*) en 1992, en vain. Précisons que ces ondes gravitationnelles n'ont rien à voir avec celles créées par la collision de deux trous noirs dans l'Univers moderne, et détectées en 2015 par le *Ligo* (*Laser Interferometer Gravitational wave Observatory*).

Les résultats de *Planck* – le très faible écart par rapport à une invariance d'échelle dans la répartition des zones chaudes et froides ainsi que l'absence d'ondes gravitationnelles – sont surprenants. Pour la première fois depuis qu'a été émise l'idée d'inflation, les plus simples modèles sont invalidés par les observations. Bien sûr, les théoriciens ont rapidement volé au secours de l'inflation en élaborant de nouveaux modèles plus complexes d'énergie inflationnaire, au prix de nouveaux problèmes à résoudre.

Pour apprécier pleinement les conséquences des mesures de *Planck*, regardons sans complaisance les modèles que les tenants de l'inflation défendent bec et ongles.

L'énergie inflationnaire est supposée émerger d'un champ, l'inflaton, analogue à un champ électrique, qui imprègne l'espace et prend une valeur en chaque point. Seulement hypothétique, l'inflaton peut être librement imaginé par les spécialistes comme gravitationnellement répulsif pour expliquer l'accélération de

l'expansion. La valeur que prend l'inflaton en un point donné détermine la densité d'énergie inflationnaire en ce même point selon une relation que l'on peut représenter sous la forme d'une courbe évoquant des montagnes enneigées (*voir l'encadré page suivante*).

Chaque modèle d'énergie inflationnaire parmi les centaines échafaudées propose une forme particulière à ces montagnes. Ce relief détermine les propriétés de l'Univers après l'inflation, par exemple s'il est plat, invariant d'échelle quant aux variations de températures...

Depuis la publication des résultats de *Planck*, les cosmologistes sont eux-mêmes dans une situation délicate. Filons la métaphore des montagnes: imaginez que vous vivez dans une ville isolée, au cœur d'une vallée cernée de sommets. Les seules personnes connues sont les habitants de cette ville, jusqu'au jour où débarque un étranger. Comme tout le monde, vous voulez savoir comment il est arrivé. Vous tendez alors l'oreille, à l'écoute des rumeurs qui courent la ville (c'est l'équivalent moderne de l'oracle). Les plus insistantes, auxquelles vous adhérez, prétendent qu'il est arrivé à skis.

## UN SÉJOUR AU SKI

Seuls deux trajets praticables mènent à votre vallée. Selon les guides, le premier, facilement accessible, bien équipé en remontepentes, propose des pistes faciles et de bonnes conditions d'enneigement. Le second, en revanche, est complètement différent, et n'est mentionné par aucun guide. Pas étonnant! Les avalanches y sont fréquentes. Aucune remontée mécanique. De plus, le trajet est composé d'une crête étroite et plate puis d'un mur abrupt. Le seul moyen concevable d'emprunter ce chemin serait d'abord de sauter d'un hélicoptère, puis d'atterrir en un point bien précis avec une vitesse bien précise. La moindre erreur serait fatale, et vous éloignerait de la vallée. Le plus raisonnable est de conclure que l'étranger est arrivé par le premier chemin.

Il est impensable que quelqu'un suive le second, car les chances de parvenir à votre ville sont infimes. Pourtant, vous remarquez que le visiteur n'a aucun forfait attaché à son blouson. Vous êtes alors obligé d'en déduire que le skieur est venu, contre toute attente, par le second trajet, le plus périlleux. Ou alors, la rumeur a tort...

De même, quand un oracle affirme que l'Univers est passé par une phase d'inflation, on s'attend à ce que la courbe de densité d'énergie inflationnaire corresponde au premier trajet à skis. Elle a alors une forme simple, elle requiert le moins de paramètres et est la plus robuste. Et de fait, jusqu'à présent, les manuels sur l'inflation ont presque tous présenté de telles courbes correspondant aux modèles les plus simples.

En particulier, la densité d'énergie augmente régulièrement en même temps que la >

> force du champ de sorte que l'on peut en déduire une valeur initiale de l'inflaton pour laquelle la densité d'énergie inflationnaire est égale à la densité de Planck ( $10^{120}$  fois plus grande que celle d'aujourd'hui), l'ensemble de la densité d'énergie disponible quand l'Univers émergea du Big Bang.

Avec de telles conditions initiales avantageuses, où la seule forme d'énergie est inflationnaire, l'expansion accélérée aurait commencé immédiatement. Pendant l'inflation, la force de l'inflaton évolue de façon à ce que la densité d'énergie diminue lentement et doucement, selon la courbe, jusqu'au fond de la vallée, là où notre Univers est tapi. Cette évolution, qui correspond à la descente à skis de l'inflaton selon le premier trajet, est classiquement enseignée dans les manuels.

Cependant, les observations racontent une autre histoire. Nous avons vu qu'une simple courbe inflationnaire entraîne, d'une part, l'apparition de zones chaudes et froides selon une répartition qui n'est pas invariante d'échelle et, d'autre part, des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être déjà détectées. Si nous persistons dans l'idée d'inflation, les résultats de *Planck* nous obligent à supposer que l'inflation a suivi la deuxième trajectoire, la plus escarpée et risquée.

Plutôt que de suivre une forme simple et régulière, la courbe d'énergie augmenterait rapidement, formant un mur, à partir du fond de la vallée, puis atteindrait un plateau (la crête) à une valeur de densité d'énergie des milliards de milliards ( $10^{18}$ ) de fois inférieure à la densité de Planck immédiatement disponible après le Big Bang. Dans ce cas, la densité d'énergie inflationnaire aurait été insuffisante pour dilater instantanément l'Univers tel que le suppose l'idée d'inflation.

Puisque l'Univers ne se dilate pas, l'inflaton est libre de commencer avec n'importe quelle valeur puis d'évoluer à une vitesse vertigineuse, comme un skieur sautant d'un hélicoptère. Pourtant, l'inflation ne peut commencer que lorsque l'inflaton atteint éventuellement une valeur correspondant à un point sur le plateau et si l'inflation évolue doucement. De même qu'il est dangereux pour le skieur lâché en altitude d'atterrir sur la crête avec la bonne vitesse pour descendre lentement, il est quasi impossible pour l'inflaton de diminuer jusqu'à la bonne vitesse pour enclencher l'inflation.

Pire encore, l'Univers ne se dilate pas pendant la période après le Big Bang où l'inflaton freine, n'importe quelle fluctuation dans la distribution de l'Univers s'accroîtra nécessairement. Or en grossissant, elle empêche l'inflation de débiter, quelle que soit la façon dont évolue l'inflaton.

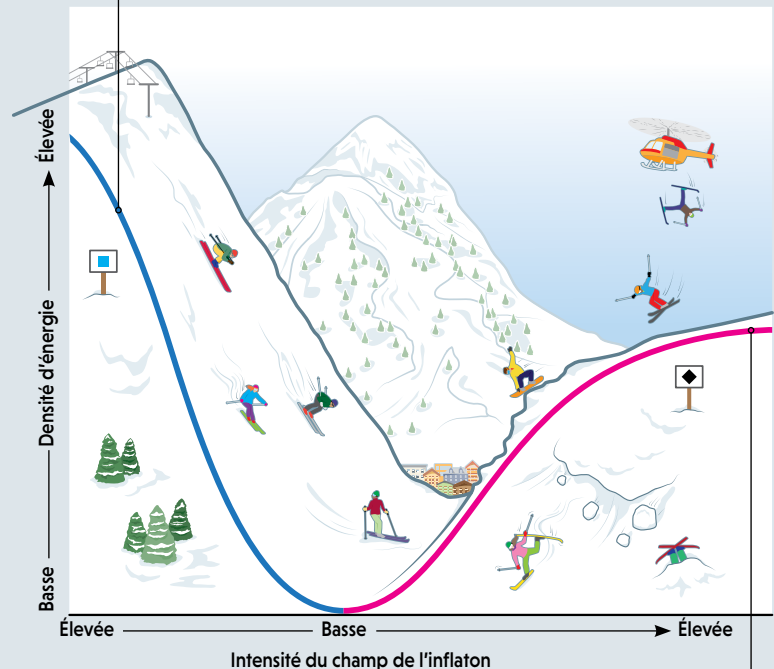
En fin de compte, en acceptant l'oracle et en adhérant à l'idée d'inflation, vous êtes tenus

## L'INFLATION EN PENTE DOUCE

**S**i l'inflation a bien eu lieu, elle a été déclenchée par une hypothétique « énergie inflationnaire », créée par un champ nommé inflaton qui aurait baigné l'espace. Différentes versions de l'inflation proposent diverses relations entre l'intensité de l'inflaton et la densité de l'énergie inflationnaire. Deux d'entre elles sont représentés ici. L'une (en bleu, à

gauche) est conforme aux modèles classiques présentés dans les manuels. L'autre (en rose à droite) requiert des conditions initiales si particulières qu'elles la rendent improbable. Cette analogie donne une idée de pourquoi la seconde classe de modèles – un type d'inflation qui n'a pas été écarté par les données récentes – est difficile à soutenir.

Cette pente régulière, qui traduit une abrupte augmentation de la densité d'énergie, correspond aux modèles classiques d'inflation. C'est une montagne facilement skiable. Ces modèles dépeignent une image plausible de comment l'inflation a pu s'initier, car ils commencent avec une énergie inflationnaire située au-delà d'un seuil donné (un point de départ marqué par l'arrivée d'une remontée mécanique) et évoluent de façon régulière et prédictible (comme sur une piste bien damée et balisée), mais ils sont en conflit avec les dernières données.



Ces versions de la théorie, dites modèles de plateau, requièrent de très improbables conditions pour initier l'inflation : le champ de l'inflaton a dû prendre une valeur donnée au bon moment pour enclencher l'inflation. De tels modèles évoquent une piste dangereuse, menacée par des avalanches, où un skieur devrait être largué d'un hélicoptère en un point très précis.

de déduire des résultats de *Planck* que la densité d'énergie a suivi le deuxième trajet, en dépit des difficultés. Ou bien alors faut-il remettre en question la crédibilité de l'oracle... Cela revient à ne pas accepter l'idée que l'inflation a bien eu lieu, surtout quand elle n'offre pas une explication simple de ce à quoi ressemble l'Univers.

## UN UNIVERS DÉRAISONNABLE

Les cosmologistes devraient évaluer la théorie selon la méthode scientifique standard, c'est-à-dire en estimant la probabilité que l'inflation ait eu lieu compte tenu des observations. Dans ce cas, il est indubitable que les données disponibles ne confirment pas les modèles les plus simples et en favorisent de plus complexes et conçus *ad hoc*. Ajoutons que les dernières observations de *Planck* ne sont pas le premier écueil sur lequel bute la théorie de l'inflation. Ils ont plutôt accentué le problème.

Par exemple, nous devrions examiner s'il est raisonnable pour l'Univers d'avoir eu les conditions initiales requises pour n'importe quel type d'énergie inflationnaire. Deux critères improbables doivent être satisfaits. D'abord, juste après le Big Bang, les fluctuations quantiques de l'espace-temps ont dû se neutraliser dans une zone, et l'espace est bien décrit par les équations classiques de la relativité générale. Ensuite, l'espace doit être suffisamment plat et avoir une distribution suffisamment régulière d'énergie afin que l'énergie inflationnaire en vienne à dominer l'ensemble.

Plusieurs travaux théoriques ont estimé la probabilité de trouver un espace avec ces caractéristiques juste après le Big Bang: elles sont inférieures à celle de trouver une montagne enneigée bien équipée en remonte-pentes et bien entretenue... au milieu du Sahara.

Plus important, s'il fut facile de voir émerger du Big Bang une région, plate et homogène, où l'inflation a démarré, alors cette inflation n'aurait pas été nécessaire. En effet, la motivation essentielle de l'idée d'inflation est d'expliquer pourquoi l'Univers est plat et homogène. Si l'inflation a besoin des mêmes propriétés, cette fois dans un tout petit espace, on ne progresse guère...

Nous n'en sommes qu'au début de nos problèmes... Non seulement l'inflation requiert des conditions initiales difficiles à obtenir, mais il est aussi impossible d'arrêter l'inflation une fois qu'elle est enclenchée. Cet emballement tient aux fluctuations quantiques de l'espace-temps. Elles se traduisent par des variations locales dans la valeur de l'inflaton, et donc des endroits où l'inflation stoppe avant d'autres.

On suppose que les fluctuations quantiques sont minimales, mais dès 1983, des théoriciens, dont l'un de nous (Paul Steinhardt), ont montré que des bonds importants dans le champ de l'inflation, même rares, peuvent bouleverser le déroulement de l'inflation. De tels sauts peuvent

porter la valeur de l'inflaton bien au-delà de la valeur moyenne, prolongeant l'inflation dans certaines régions. Même peu nombreuses, de telles régions où l'inflation perdure se sont considérablement dilatées au point de dominer l'espace. En un instant, une zone où l'inflation s'arrête est cernée d'énormes parties de l'Univers encore en train de gonfler. Et le processus se répète.

Dans l'essentiel de la région dilatée, la valeur de l'inflaton change jusqu'à ce que la densité d'énergie diminue et l'inflation s'arrête, mais de rares grandes variations quantiques alimenteront à nouveau l'inflation et créeront des volumes toujours plus croissants. Et ainsi de suite, jusqu'à l'infini.

De la sorte, l'inflation est éternelle, générant un nombre infini de régions où l'inflation s'arrête, chacune créant un univers. En effet, ce n'est que dans ces zones où l'inflation s'est arrêtée que le taux d'expansion a suffisamment ralenti pour permettre la formation de galaxies, d'étoiles, de planètes et, *in fine*, de la vie. Il en découle que les propriétés cosmologiques varient d'une de ces régions à l'autre en raison des effets aléatoires des fluctuations quantiques. Le plus souvent, les univers ainsi créés ne seront ni plats ni homogènes ni invariants d'échelle quant à la distribution de points chauds et froids dans le fond diffus. Les univers couvrent un nombre infini de possibilités, celui ressemblant au nôtre ayant la même probabilité d'apparaître que les autres. Le résultat est un multivers. Chaque partie ayant toutes les propriétés concevables, cette idée de multivers n'explique pas pourquoi notre Univers est tel qu'il est: c'est purement accidentel.

Cette image est peut-être encore trop idéale. Des cosmologistes s'interrogent encore sur la possibilité qu'une région évolue en notre Univers observable. Au lieu de cela, l'inflation éternelle pourrait conduire à un monde purement quantique fait uniquement de fluctuations aléatoires, même lorsque l'inflation s'est arrêtée.

## BIENVENUE DANS LE MULTIFOUILLIS

Plutôt que «multivers», nous préférons le terme de «multifouillis», mieux adapté selon nous pour décrire le devenir incertain d'une inflation éternelle, une mosaïque d'univers aux propriétés distinctes ou bien un fatras quantique. De notre point de vue, peu importe laquelle des deux descriptions est correcte. De toute façon, le multifouillis ne prédit pas les propriétés de notre Univers comme étant les plus probables. Or une bonne théorie scientifique est censée expliquer pourquoi ce que nous observons est arrivé plutôt qu'autre chose. Le multifouillis échoue à ce test fondamental.

Compte tenu de tous ces problèmes, l'idée que l'inflation n'a pas eu lieu mérite d'être sérieusement considérée. Deux possibilités s'offrent >



> alors à nous. Soit l'Univers a eu un commencement (le Big Bang), soit il n'en a pas eu, et l'on doit imaginer un Big Bounce (un Grand Rebond), une transition entre une phase cosmologique antérieure et l'Univers actuel.

Bien que la plupart des cosmologistes penchent pour la première hypothèse, il n'y a aucune preuve qui permette de choisir entre un Bang et un Rebond il y a 13,7 milliards d'années. Mieux, un Rebond ne requiert aucune période d'inflation pour aboutir à l'Univers que nous connaissons. Les théories du rebond constituent donc un sérieux changement de paradigme par rapport à l'idée d'inflation.

## UN REBOND SALUTAIRE

Un Rebond peut conduire au même résultat qu'un Big Bang suivi d'une période d'inflation, car, avant le Rebond, une longue période de contraction lente peut aplanir et uniformiser l'Univers. Il peut sembler contre-intuitif qu'une lente contraction ait le même effet qu'une expansion rapide, mais un simple argument peut nous en convaincre. Rappelons que sans inflation, un Univers en expansion lente deviendrait courbe et hétérogène à cause des effets de la gravité sur l'espace et la matière.

Imaginez un film retraçant le processus à l'envers: un immense univers courbe et hétérogène se contracte progressivement et devient plat et uniforme. La gravité fonctionne alors comme un agent uniformisant dans un univers se contractant lentement.

Comme dans le cas de l'inflation, la physique quantique perturbe également dans les théories du rebond l'histoire monotone d'un doux lissage. Les fluctuations quantiques font varier le taux de contraction d'un endroit à l'autre de sorte que des régions rebondissent et commencent à s'agrandir et refroidir avant d'autres. Dans certains modèles, le taux de contraction choisi conduit à des variations de températures qui s'accordent avec les motifs observés par *Planck*. En d'autres termes, une contraction avant le Rebond peut avoir les mêmes effets que ceux pour lesquels on a inventé l'inflation.

En outre, les théories du rebond ont un avantage indéniable sur celles de l'inflation: elles ne prédisent aucun multifouillis! Quand la phase de contraction débute, l'Univers est déjà étendu et classique au sens où il est décrit par la théorie de la relativité; puis il rebondit avant d'atteindre une taille où les effets quantiques deviennent importants. En conséquence, il n'y a aucune étape, tel un Big Bang, entièrement dominée par la physique quantique, et il n'y a pas besoin de recourir à une transition quantique-vers-classique. Et puisque durant le lissage il n'y a pas d'inflation entraînant la rareté de certaines régions (les grandes fluctuations quantiques s'agrandissant rapidement), l'uniformisation par contraction

ne produit pas plusieurs univers. Des travaux récents ont produit les premières propositions détaillées pour décrire comment l'Univers a pu passer d'une phase de contraction à une expansion, ouvrant la porte à la construction de cosmologies complètes du rebond.

## UNE SCIENCE NON EMPIRIQUE ?

Face aux problèmes liés à l'inflation et aux arguments solides des cosmologies du rebond, on aurait pu imaginer qu'un débat s'amorce entre scientifiques sur la façon de départager les deux hypothèses grâce à des observations. Mais il y a un *hic*, la théorie de l'inflation, telle que nous la comprenons, ne peut pas être évaluée de façon scientifique. Nous avons vu que les résultats de l'inflation sont très dépendants des conditions initiales. En outre, elle peut conduire à une inflation éternelle et à un multifouillis. En fin de compte, l'inflation, si flexible, ne peut pas être infirmée, ni confirmée, expérimentalement.

Certains admettent bien que l'inflation n'est pas testable, mais ils refusent de l'écartier. À la place, ils proposent que la science abandonne l'un de ses piliers: la vérification expérimentale, ou falsifiabilité au sens de Popper. Une hypothèse n'est scientifique que si elle peut être réfutée, théoriquement, par l'expérience. Cette proposition a déclenché un torrent de débats sur une éventuelle redéfinition de la science, débarrassée de ses aspects empiriques.

Selon une erreur fréquente, des expériences peuvent rendre caduques des théories. En fait, une théorie défaillante devient de plus en plus «immunisée» contre les expériences grâce à toutes les tentatives faites pour la rafistoler, coûte que coûte. Cette théorie se complexifie de plus en plus pour rester en accord avec les résultats d'expériences jusqu'à un moment, une sorte de plateau, où son pouvoir explicatif diminue, elle devient alors indéfendable.

Le pouvoir explicatif d'une théorie se mesure au nombre d'hypothèses qu'elle exclut. Davantage d'immunisation, de remèdes, de rafistolage signifie moins d'exclusion et moins de pouvoir explicatif. La théorie du multifouillis n'exclut rien et n'a donc aucun pouvoir explicatif.

Ériger une théorie vide en standard infailible ne relève plus de la science. L'histoire nous apprend que ce n'est jamais une bonne idée. Aujourd'hui, nous avons la chance de pouvoir nous attaquer à des questions importantes et fondamentales qui se sont imposées à nous par l'expérimentation et l'observation. Le fait que nos premières hypothèses vacillent est une occasion historique en faveur d'une percée théorique majeure. Plutôt que de refermer le livre sur les premiers instants de l'Univers, nous devrions plutôt reconnaître que la cosmologie reste largement ouverte. ■

## BIBLIOGRAPHIE

ANNA IJJAS ET AL.  
Inflationary paradigm  
in trouble after Planck 2013,  
*Physics Letters B*, vol. 723,  
n° 4-5, pp. 261-266, 2013.

# La mémoire, une construction en partage

Livre  
conseillé par  
POUR LA  
**SCIENCE**



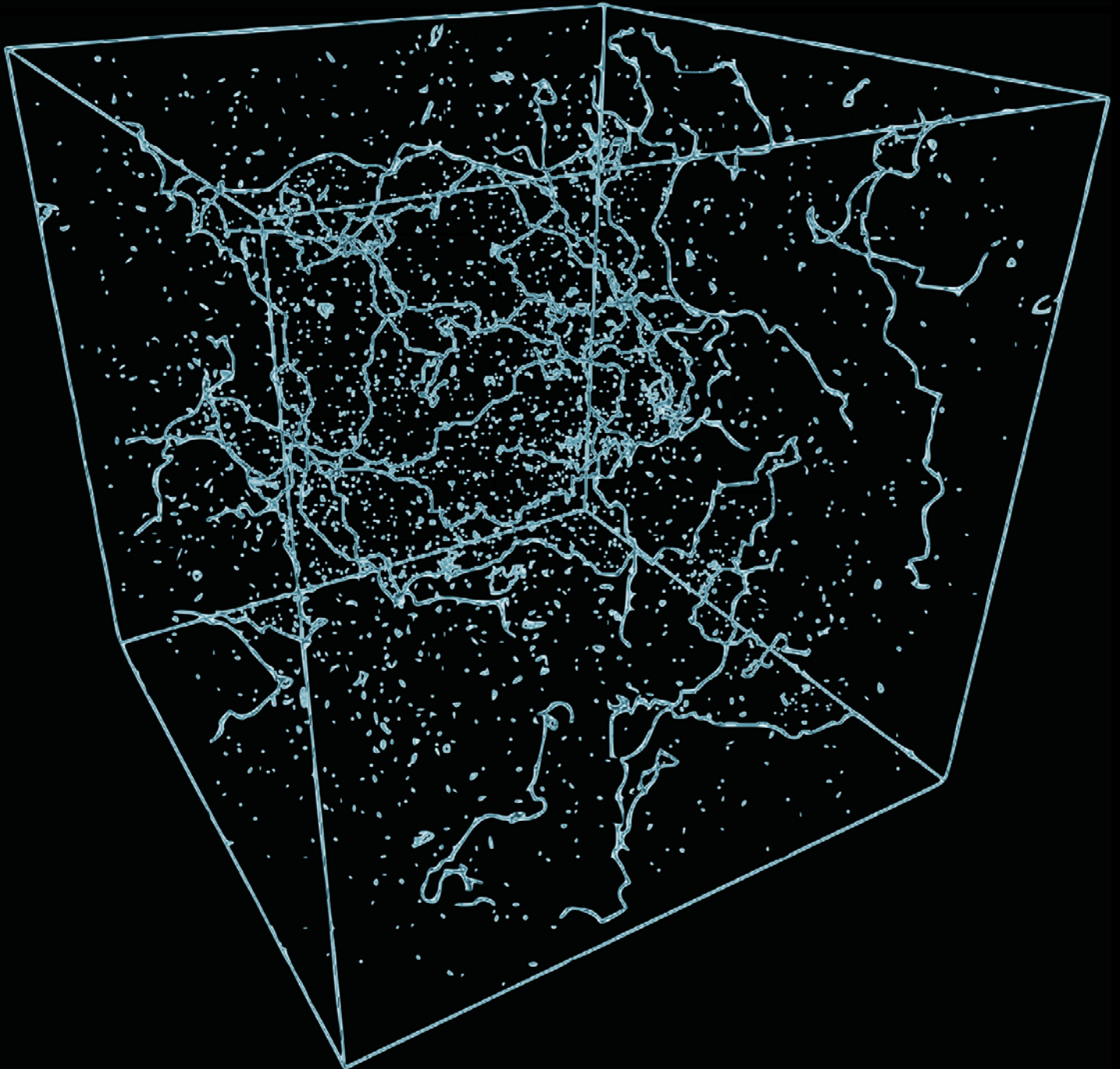
176 pages, 17 €

Aujourd'hui, dans notre monde hyperconnecté où des « événements-monde » bouleversent les devenirs individuels, le clivage entre mémoire individuelle et mémoire collective est dépassé.

Une réflexion pluridisciplinaire qui met en lumière la complexité de nos mémoires – individuelle, collective et partagée...

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site  
[www.editions-lepommier.fr](http://www.editions-lepommier.fr)





Les cordes cosmiques seraient les vestiges des débuts de l'Univers, quand les forces fondamentales des particules étaient unifiées. Cette simulation montre un volume de la taille de l'Univers observable, qui contient des cordes cosmiques infinies le traversant de part en part ainsi que des boucles de tailles diverses.



## L'ESSENTIEL

● Au début de l'Univers, les interactions fondamentales du modèle standard (électromagnétique, nucléaires faible et forte) étaient peut-être unifiées.

● C'est le postulat des théories de grande unification, qui s'intéressent à la physique à très haute énergie, telle celle qui régnait au début de l'Univers.

● Quand l'Univers s'est refroidi, la symétrie associée à cette interaction unifiée se serait brisée, créant des défauts topologiques: les cordes cosmiques.

● On cherche aujourd'hui à mettre en évidence ces fossiles des premiers instants de l'Univers, notamment par leurs possibles effets gravitationnels.

## L'AUTEUR



ERWAN ALLYS est en postdoctorat à l'Institut d'astrophysique de Paris.

# À la recherche DES CORDES COSMIQUES

**Les théories de grande unification supposent qu'aux tout premiers instants de l'Univers, les interactions fondamentales étaient unifiées. Cette symétrie primordiale a-t-elle laissé des traces détectables aujourd'hui ?**

# G

**Gravitation quantique à boucles, théorie des cordes, inflation, multivers... beaucoup de travaux sur l'Univers primordial mettent en scène de nouvelles théories physiques, rarement soutenues par l'expérimentation en laboratoire. Et si on faisait l'inverse? En d'autres termes, pourrait-on extrapoler des théories physiques déjà solidement établies**

pour en étudier les conséquences cosmologiques? C'est possible, avec le modèle standard de la physique des particules.

Cet édifice théorique décrit les particules élémentaires (électron, quark, photon, neutrino...) et leurs interactions fondamentales autres que gravitationnelle. Ces dernières sont au nombre de trois – électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte – qui, selon plusieurs modèles, fusionnent à de très hautes énergies en une seule. Cette interaction unifiée est au cœur des théories dites de grande unification, ou GUT (pour *Grand Unified Theory*) et avait vraisemblablement cours au tout début de l'Univers. En effet, les conditions qui régnaient à cette époque étaient telles que ces forces fondamentales n'en faisaient peut-être qu'une. Comment le vérifier? En traquant les cordes cosmiques, de possibles résidus fossiles de ces interactions en vigueur juste après le Big Bang. Le maître mot qui nous conduira sur la route de ces cordes est «symétrie».

> Identifiée initialement grâce à l'observation d'une certaine similitude entre les propriétés de différentes particules, la notion de symétrie a joué un rôle croissant en physique des particules. Elle est aujourd'hui à la base de la description moderne des interactions fondamentales.

Les symétries les plus simples à décrire sont les globales. Pour prendre un exemple historique, les premières études de l'interaction nucléaire forte ont révélé que le proton et le neutron semblaient jouer un même rôle vis-à-vis d'elle. Postuler une symétrie globale entre ces deux particules reviendrait alors à signifier que tous les protons peuvent être changés en neutrons, et réciproquement, sans que les processus physiques ne soient modifiés. Cette symétrie est simple à formuler, mais nécessite de pouvoir distinguer exactement les particules en question, ce qui n'est généralement pas le cas en physique des particules, même pour le proton et le neutron.

Au milieu du xx<sup>e</sup> siècle, pour remédier à ce problème, le concept de symétrie locale a été développé. Il s'est avéré particulièrement fructueux pour décrire les interactions fondamentales. Prenons l'exemple de l'électron et du neutrino électronique, reliés par une des transformations de symétrie associées à l'interaction faible. Un électron peut se transformer en neutrino électronique, sous réserve d'émission d'une particule nommée boson W. La transformation de symétrie est bien locale, car elle a lieu en un point spécifique de l'espace. La nécessité d'émettre un boson dit de jauge pendant la transformation, qui peut porter des nombres quantiques, permet également la transformation d'une particule en une autre effectivement différente.

Le modèle standard de la physique des particules décrit justement les interactions électromagnétique et nucléaires forte et faible par l'échange entre particules de bosons de jauge, émis lorsque celles-ci effectuent des transformations de symétrie locale. Ainsi, le processus d'interaction est directement relié aux transformations de symétries des particules, et la donnée de ces transformations de symétrie décrit complètement les interactions.

## LES SYMÉTRIES BRISÉES

Les symétries des systèmes physiques ont la particularité de pouvoir se briser spontanément à basse température. Pour mieux comprendre, quittons temporairement la physique des particules pour rejoindre celle des milieux aimantés. Dans les milieux ferromagnétiques, tels le fer, chaque atome est une sorte de petit aimant microscopique dont le moment magnétique peut pointer dans toutes les directions. Ces moments magnétiques sont soumis principalement à deux interactions: l'agitation thermique a tendance à les orienter dans toutes les directions de façon indépendante; l'interaction magnétique entre moments tend, à l'inverse, à les aligner.

À haute température, l'agitation thermique l'emporte sur la force magnétique. Dans un matériau ferromagnétique, aucune direction des moments magnétiques n'est alors privilégiée. En conséquence, on peut étudier le matériau sous divers angles sans apercevoir de modification microscopique. Le système est donc doté d'une symétrie, car il est invariant sous les rotations.

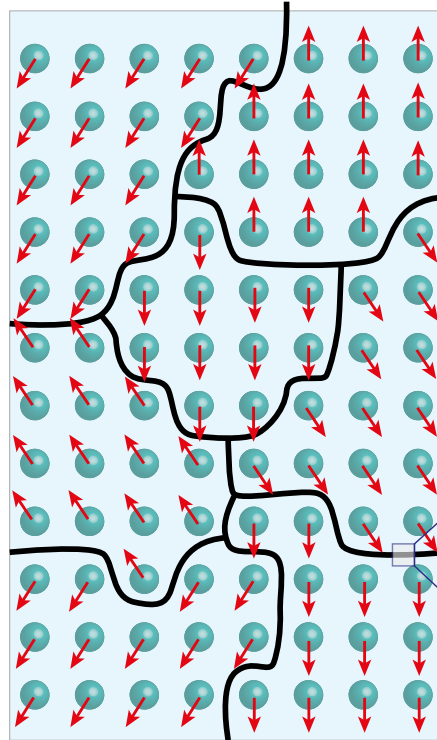
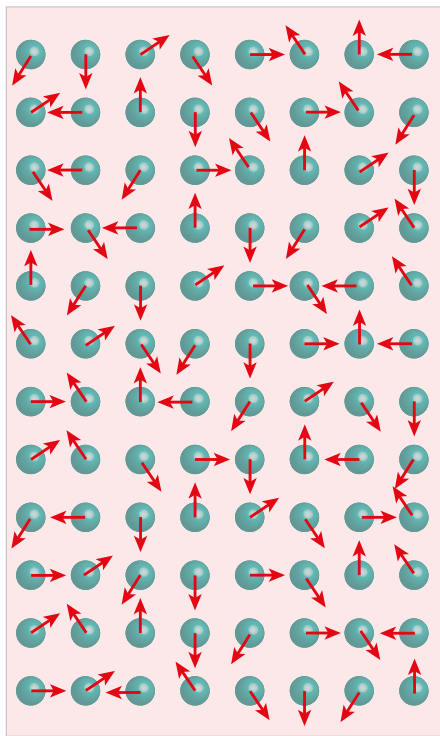
Lorsque la température diminue, l'agitation thermique cède le pas à l'interaction magnétique. Les moments magnétiques vont progressivement s'aligner localement, formant des domaines où tous les moments sont alignés dans la même direction. Ces domaines, nommés domaines magnétiques ou domaines de Weiss, grossissent et remplissent au final tout le volume (*voir la figure page ci-contre*). Quand des domaines de Weiss entrent en contact lors de leur croissance, des murs se forment à l'interface où l'orientation des moments magnétiques d'un domaine passe graduellement à celle de l'autre. Cette fois, la description du ferromagnétique change selon l'angle d'observation, car il est divisé en domaines où une direction est privilégiée. La symétrie a été brisée.

Ce phénomène est une transition de phase accompagnée d'une brisure spontanée de symétrie. De tels événements s'observent dans

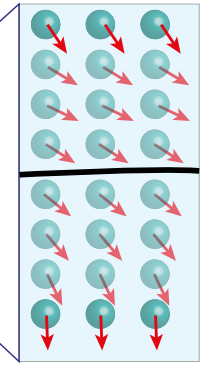
**L'idée  
d'une symétrie  
unificatrice  
à haute énergie  
émerge assez  
naturellement  
de la structure  
du modèle  
standard**

un grand nombre de domaines de la physique, comme la physique des cristaux liquides, des milieux superfluides, des supraconducteurs et... en physique des particules.

La particularité de ces transitions de phase est de mener parfois à la formation de configurations non triviales stables, des défauts topologiques. Dans le matériau ferromagnétique, ces



Dans la phase de haute température d'un matériau ferromagnétique (à gauche), aucune direction n'est privilégiée par les moments magnétiques, et toutes les directions sont donc équivalentes. Cette symétrie sous rotation est brisée à basse température, où se forment des domaines magnétiques dans lesquels une direction d'aimantation est privilégiée (au centre). Dans les murs séparant ces domaines (à droite), la direction des moments magnétiques change graduellement.



défauts topologiques sont les murs séparant les domaines. Le coût énergétique nécessaire pour faire disparaître ces murs étant très élevé (il faut changer complètement l'orientation des moments magnétiques dans un domaine de Weiss donné), ces murs sont très stables.

Les murs de domaines sont une classe très générale de défauts topologiques à deux dimensions, apparaissant lorsque la brisure de symétrie accompagnant la transition de phase revient à choisir dans des domaines distincts des directions de brisure de symétrie parmi un nombre fini de possibilités. Dans un espace à trois dimensions, les deux autres types de défauts topologiques possibles sont des défauts ponctuels (des monopôles) ainsi que des lignes de vortex. Les lignes de vortex sont aussi nommées cordes cosmiques dans un cadre cosmologique. Notons que ces cordes n'ont rien à voir avec les cordes fondamentales de la théorie des cordes. Regardons de plus près la formation et les propriétés de ces cordes cosmiques.

### L'UNION EST DANS LA SYMÉTRIE

Les transitions de phase accompagnées des brisures spontanées de symétries jouent un rôle important en physique des particules, où certaines symétries locales peuvent être brisées à basse température, et donc dans des collisions de basse énergie. La symétrie liée à l'interaction nucléaire faible est par exemple brisée à des énergies inférieures à 250 gigaélectronvolts, ou GeV (l'équivalent de  $10^{15}$  kelvins), des conditions vérifiées habituellement sur Terre.

Rappelons qu'au LHC, les protons sont précipités les uns sur les autres avec des énergies de 14000 GeV; c'est plus de 50 fois supérieur!

C'est parce que l'interaction nucléaire faible est liée à une symétrie brisée aux échelles d'énergie usuelles sur Terre que son intensité est particulièrement faible en comparaison de celle des interactions nucléaire forte et électromagnétique. C'est pourquoi elle ne peut être observée que dans des processus où elle seule joue un rôle, par exemple les désintégrations radioactives.

De là, on peut s'interroger. Existe-t-il des interactions liées à des symétries brisées à très haute énergie, et qui ne sont pas mesurées car trop faibles aux échelles qui nous sont accessibles? Cette question a conduit au développement des théories de grande unification dans lesquelles les interactions du modèle standard (nucléaires faible et forte ainsi qu'électromagnétique) sont unifiées en une seule interaction à haute énergie, au-dessus de  $10^{16}$  GeV. Cette interaction est décrite par une symétrie dite de grande unification, qui contient toutes les symétries du modèle standard, et est spontanément brisée en ces dernières, permettant de les retrouver aux énergies usuelles vérifiées sur Terre.

L'idée d'une symétrie unificatrice à haute énergie peut sembler arbitraire à première vue, mais elle émerge en fait assez naturellement de la structure du modèle standard. Un premier argument important est que seuls les concepts d'interactions liées à des symétries, dont certaines sont brisées spontanément, sont nécessaires. Or, ces concepts sont déjà utilisés aux >



> échelles d'énergie auxquelles nous avons accès, où ils sont vérifiés à une très haute précision. Le second est que les théories de grande unification peuvent expliquer par construction un certain nombre de propriétés du modèle standard, comme la quantification de la charge électrique ou le fait que les particules du modèle standard apparaissent par générations identiques mais de masses croissantes. Enfin, le fait que les intensités respectives des différentes interactions du modèle standard semblent converger à haute énergie rend particulièrement pertinent le concept de grande unification.

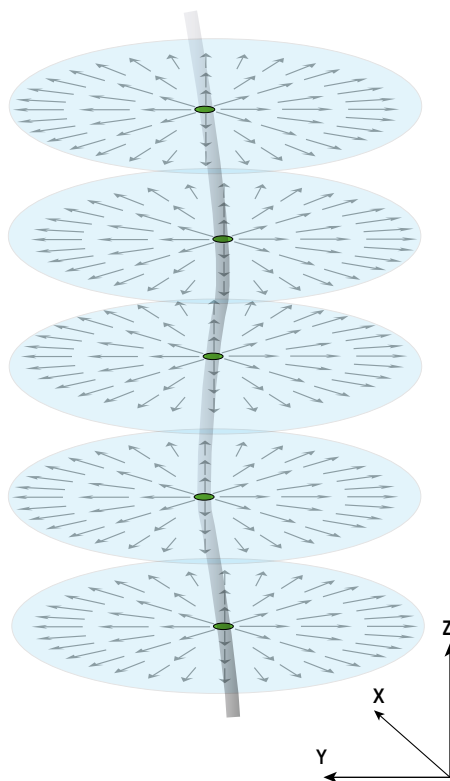
Tester les théories de grande unification nécessite alors d'étudier des phénomènes à un régime où les symétries associées ne sont pas encore brisées, à des énergies dépassant  $10^{16}$  GeV. Étant donné que le LHC n'est prévu que pour atteindre des énergies de  $1,4 \times 10^4$  GeV, une telle étude semble difficilement réalisable sur Terre, et on peut légitimement se questionner sur la possibilité de tester un jour ces théories.

### CORDES COSMIQUES ET COSMOLOGIE

C'est sans compter sur la cosmologie, qui fournit un cadre unique pour avoir accès à des phénomènes de très haute énergie. En effet, à en croire les modèles cosmologiques en vigueur, l'Univers était au moment du Big Bang dans un état particulièrement dense et chaud, atteignant la température de  $10^{32}$  kelvins, ce qui correspond à des énergies de  $10^{18}$  GeV. C'est plus qu'il n'en faut pour l'unification des interactions.

Bien que l'observation directe de cette période de l'Univers primordial soit impossible, les théories de grande unification ont peut-être laissé des traces encore détectables aujourd'hui. Après le Big Bang, l'Univers commence son expansion et devient de moins en moins dense et chaud. De la phase initiale où les symétries de grande unification seraient réalisées, une brisure spontanée de ces symétries aurait alors lieu lorsque l'énergie caractéristique de l'Univers devient inférieure à  $10^{16}$  GeV, soit de l'ordre de  $10^{-39}$  à  $10^{-37}$  seconde après le Big Bang. Si des défauts topologiques stables se sont formés à ce moment, et notamment des cordes cosmiques, peut-être sont-ils encore détectables.

L'hypothèse des cordes cosmiques dans l'Univers primordial a été évoquée pour la première fois par le physicien britannique Tom Kibble en 1976. Depuis, on a montré que tous les schémas de brisure de symétries des théories de grande unification compatibles avec les connaissances actuelles de physique des particules et de cosmologie impliquent *a priori* la formation de cordes cosmiques stables et donc possiblement observables aujourd'hui. Les cordes cosmiques seraient donc une conséquence cosmologique inévitable des théories de grande unification, si celles-ci sont réalisées à haute énergie.



Une corde cosmique correspond, schématiquement, à l'ensemble des points de plans empilés pour lesquels on ne peut pas choisir de direction pour une brisure de symétrie. Sur tous les autres points des plans, cette direction est indiquée par une flèche.

Pour comprendre la formation des cordes cosmiques, raisonnons sur un plan, par exemple une table. En chaque point, on peut indiquer une direction de brisure de symétrie par des flèches, chacune devant être plus ou moins orientées avec ses voisines. Par exemple, elles peuvent être toutes parallèles, ou bien décrire un cercle (voir la figure ci-dessus). En continuant d'ajouter des flèches de proche en proche à l'intérieur de ce cercle, on aboutit à une singularité, un point où on est incapable de poser une flèche plus ou moins alignée avec toutes ses voisines. En ce point, la physique reste dans une phase de haute température, où aucune direction de brisure de symétrie ne peut être choisie.

Poursuivons en déposant une plaque de verre sur la table ! On peut à nouveau y placer des flèches comme autant de directions de brisure de symétrie. À nouveau, elles doivent être à peu près orientées dans la même direction que celles de leurs voisines sur la plaque, mais aussi les voisines de la table juste en dessous. On obtient un nouveau point où on ne peut pas définir une direction de brisure de symétrie, ce point étant très proche du précédent.

Et on continue, ainsi de suite, à empiler les plaques de verre et en procédant de la même

### BIBLIOGRAPHIE

- Y.-W. YU ET AL., Implications of fast radio bursts for superconducting cosmic strings, *JCAP*, vol. 1411 (11), 040, 2014.
- R. JEANNEROT ET AL., How generic is cosmic string formation in SUSY GUTs, *Phys. Rev. D*, vol. 68, 103514, 2003.
- F. BERNARDEAU ET J.-P. UZAN, Cosmic lens phenomenology: model of Poisson energy distribution, *Phys. Rev. D*, vol. 63, 023005, 2000.
- I. CHUANG ET AL., Cosmology in the laboratory: defect dynamics in liquid crystals, *Science*, vol. 251, pp. 1336-1342, 1991.
- T. KIBBLE, Topology of cosmic domains and strings, *J. Phys. A*, vol. 9, pp. 1387-1398, 1976.

## Les cordes cosmiques seraient une conséquence inévitable des théories de grande unification

façon : des défauts topologiques linéaires (et non plus ponctuels) apparaissent alors, ce sont les cordes cosmiques sur lesquelles aucune direction de brisure n'est choisie.

Cet exemple schématise la formation de cordes cosmiques lors du passage d'un volume donné d'une phase à haute température (aucune direction de brisure de symétrie n'est choisie) à une phase de basse température impliquant une brisure spontanée de symétrie correspondant au choix d'une direction sur un plan. Par construction, ces cordes cosmiques ne peuvent pas avoir d'extrémités: elles forment des boucles ou sont infinies.

En étudiant les propriétés de la transition de phase conduisant à l'apparition des cordes cosmiques, on peut obtenir sa longueur de corrélation, c'est-à-dire la distance à partir de

laquelle deux directions de brisure de symétrie seront prises de façon indépendante. Cette longueur de corrélation renseigne alors sur la fréquence avec laquelle se formeront des configurations impliquant des cordes, et donc la densité de cordes cosmiques après la transition de phase. Les cordes cosmiques ainsi formées constituent un réseau cosmologique, qui évolue dans le temps, les cordes se déplaçant à une vitesse proche de la lumière et pouvant collisionner en se croisant, tandis que l'expansion de l'Univers se poursuit en parallèle.

### EN ATTENDANT QU'IL TOMBE DES CORDES

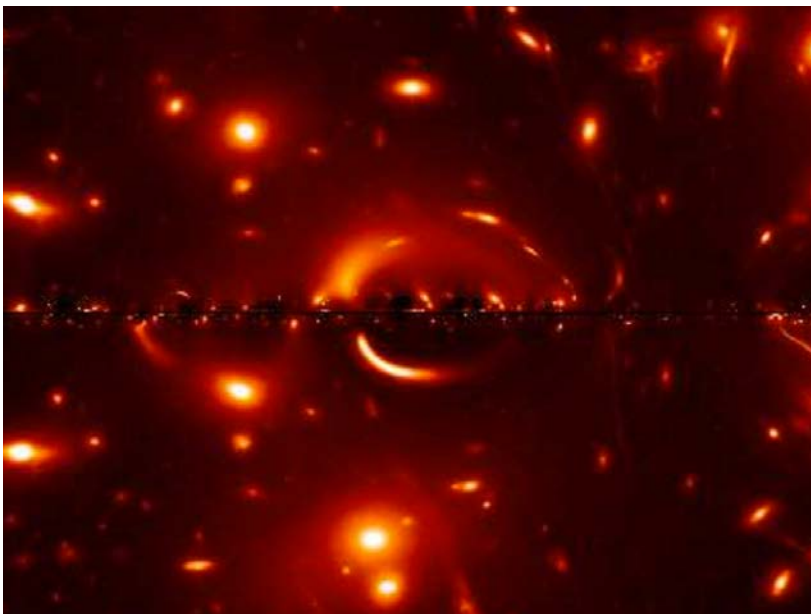
Des simulations numériques de l'évolution d'un tel réseau de cordes cosmiques montrent son évolution vers une configuration invariante d'échelle, et donc indépendante de ses conditions initiales (*voir figure page 68*).

Étant des reliques de phénomènes à très haute énergie, les cordes cosmiques ont des propriétés régies par ces échelles d'énergie élevées, à savoir un rayon caractéristique de  $10^{-30}$  mètres et une «densité» de l'ordre de  $10^{21}$  kilogrammes par mètre.

Leurs effets gravitationnels sont en conséquence importants, tant au niveau de la déviation des rayons lumineux (*voir la figure ci-dessous*) dans leur champ de gravitation que de l'émission d'ondes gravitationnelles. L'influence d'un réseau de cordes cosmologiques a ainsi été recherchée pour les perturbations qu'il causerait sur la propagation du fond diffus cosmologique, observé avec précision par le satellite *Planck* depuis 2009: aucune détection claire n'a été annoncée. La contribution du réseau de cordes au fond diffus d'ondes gravitationnelles pourra également être étudiée d'ici quelques années, grâce au développement de l'astronomie des ondes gravitationnelles.

Des tentatives de détections de signaux provenant d'une corde cosmique individuelle ont également eu lieu ces dernières années, que cela soit par l'observation de courts signaux gravitationnels intenses, ou bien l'identification de cordes comme sources de rayons cosmiques de très haute énergie. À l'heure actuelle, aucune d'entre elles n'a abouti à une identification avérée de cordes cosmiques. Depuis peu cependant, les cordes cosmiques sont devenues une explication probable de certains jets radios, qui étaient inexplicables jusqu'alors. Il est bien sûr nécessaire d'attendre qu'un consensus émerge de la communauté scientifique, mais il est certain qu'une détection univoque de cordes cosmiques serait une avancée majeure dans l'étude des théories de physique fondamentale à très haute énergie. ■

Cette simulation à partir d'une image du télescope spatial *Hubble* montre les possibles effets gravitationnels d'une corde cosmique. Ce serait un moyen de détecter ces vestiges de la grande unification.





Le Big Bang ne serait plus le début  
de l'Univers, mais juste  
un changement de régime.





# LE BIG BANG, ET AVANT ?

Le Big Bang pose problème, car il impose la réconciliation des deux grands édifices intellectuels de la physique, aujourd'hui incompatibles : la théorie de la relativité générale et la mécanique quantique. Pour surmonter cet obstacle, les physiciens élaborent de multiples théories : la théorie des cordes, la gravitation quantique à boucles, l'effondrement d'un trou noir à quatre dimensions, l'intrication quantique de qubits d'information... Étonnamment, toutes ces tentatives ont en commun d'offrir un passé au Big Bang. Celui-ci n'est plus alors une origine ultime, mais une étape, un passage entre deux états cosmologiques différents.

**LES AUTEURS**



**NIAYESH AFSHORDI**  
cosmologiste  
et astrophysicien  
à l'université de Waterloo  
et à l'institut Péricimètre  
de physique théorique,  
dans l'Ontario,  
au Canada.



**ROBERT MANN**  
professeur de physique  
et d'astronomie  
à l'université  
de Waterloo et affilié  
à l'institut Péricimètre.



**RAZIEH POURHASAN,**  
de l'université d'Islande,  
à Reykjavik,  
chercheuse associée  
à l'institut Péricimètre.

Un trou noir dans un univers  
à quatre dimensions est-il  
à l'origine du Big Bang ?



## L'ESSENTIEL

- La nature du Big Bang, c'est-à-dire l'origine de l'Univers à partir d'un état de densité infinie reste un mystère.
- Les idées d'inflation et de singularité nue ne sont plus nécessaires. De même, la géométrie et l'uniformité de l'Univers sont naturelles.
- Un modèle récent fait du Big Bang et de l'Univers la conséquence de l'effondrement d'un astre dans un univers à quatre dimensions d'espace.
- Des témoignages de la véracité de ce scénario sont à chercher dans les détails du rayonnement du fond diffus cosmologique.

# L'UNIVERS né d'un trou noir

**Selon un scénario récent, l'effondrement d'un trou noir dans un univers à quatre dimensions aurait précédé le Big Bang et donné naissance à notre Univers. Mais d'où vient l'univers dont le nôtre serait issu ?**

# D

Dans le livre VII de *La République*, Platon développe l'allégorie de la caverne. Il imagine la perception du monde par des individus enchaînés depuis toujours face à un mur au fond d'une sombre caverne. Derrière eux, une flamme projette l'ombre de différents objets sur le mur. Ces ombres bidimensionnelles sont les seules choses que les

prisonniers aient jamais vues – elles sont leur seule réalité. Leurs chaînes les ont empêchés de voir le monde réel, qui a une dimension de plus que le monde qu'ils connaissent, une dimension riche de complexité dont la connaissance leur permettrait de comprendre ce qu'ils voient. Et si les cosmologistes étaient les prisonniers de Platon? Vivons-nous dans une gigantesque caverne cosmique, créée aux tout premiers instants de l'Univers?

Dans le scénario classique, l'Univers émerge d'un Big Bang issu d'un état infiniment dense. Ce scénario explique de nombreuses observations et offre une vision cohérente du monde que nous voyons. Mais ce modèle a ses limites qu'il est crucial de comprendre et de chercher à dépasser.

Nous nous sommes intéressés à la question du commencement du Big Bang, qui recèle une partie de ces difficultés, et nous avons élaboré un scénario alternatif. Dans ce dernier, l'Univers remonterait à une époque >



> antérieure au Big Bang, où il existait une dimension spatiale supplémentaire. Ce proto-univers pourrait avoir laissé des traces visibles que de prochaines observations astronomiques révéleront peut-être.

L'Univers nous paraît occuper trois dimensions d'espace et une de temps, une géométrie que nous qualifierons d'« univers tridimensionnel ». Dans notre scénario, cet univers tridimensionnel ne serait que l'ombre d'un monde à quatre dimensions spatiales. Plus précisément, l'Univers serait né par l'effondrement d'une étoile en fin de vie quelque part dans ce proto-univers. L'implosion aurait créé un trou noir quadridimensionnel, dont l'enveloppe tridimensionnelle serait notre Univers. Ce modèle semble extravagant; il est pourtant solidement ancré dans les mathématiques qui décrivent l'espace et le temps.

Ces dernières décennies, les physiciens ont développé une théorie, dite du principe holographique, qui présente une analogie avec l'holographie classique – qui permet d'enregistrer les informations d'un volume sur une surface à deux dimensions. Le principe holographique a conduit à l'élaboration de techniques mathématiques grâce auxquelles les physiciens traduisent une situation complexe en une autre plus simple à décrire. Ce genre de transformation mathématique s'accompagne d'un changement du nombre de dimensions d'espace entre les deux descriptions. Par exemple, les chercheurs peuvent résoudre des équations de la dynamique des fluides en deux dimensions, et utiliser ces solutions pour comprendre ce qui se passe dans un système beaucoup plus complexe, tel qu'un trou noir tridimensionnel. Mathématiquement, les deux descriptions sont interchangeables; le fluide est un analogue parfait du trou noir.

## HOLOGRAPHIE ET TROUS NOIRS

Les succès du principe holographique sont tels que de nombreux physiciens y voient plus qu'une simple transformation mathématique. Peut-être les règles du cosmos sont-elles écrites dans un autre jeu de dimensions et traduites dans les trois que nous percevons. Peut-être, comme les prisonniers de Platon, croyons-nous à tort que l'espace est tridimensionnel alors qu'en réalité, il existe une quatrième dimension dont la prise en compte permettrait de mieux comprendre l'Univers.

Le second intérêt de cet univers quadridimensionnel est que son étude détaillée pourrait nous aider à répondre à des questions cruciales sur l'origine et la nature du cosmos. Prenons par exemple le Big Bang. Il aurait été immédiatement suivi par l'« inflation », une période d'expansion rapide de l'espace au cours de laquelle le volume de l'Univers primordial a été multiplié d'un facteur  $10^{78}$ , voire beaucoup

plus (voir *La crise de croissance de l'Univers*, par A. Riazuolo, page 54). Mais cet événement n'apporte aucune information sur l'origine du Big Bang et pose lui-même des questions. En revanche, notre scénario d'univers quadridimensionnel nous dit comment le Big Bang a commencé et se dispense de l'inflation.

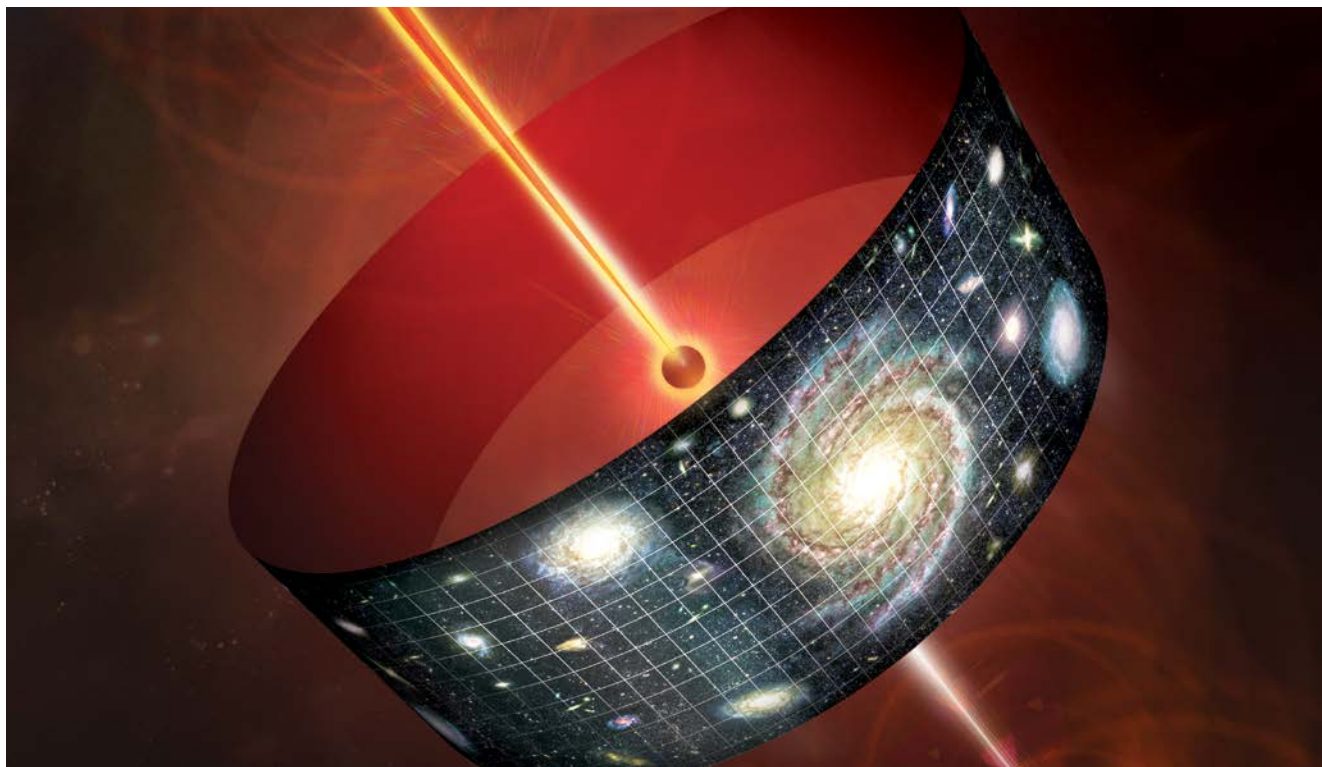
Les cosmologistes décrivent l'histoire de l'Univers – en partant d'aujourd'hui et en remontant jusqu'à une fraction de seconde après le Big Bang – à partir de quelques équations (dont celles de la relativité générale) et cinq paramètres indépendants. Ces paramètres incluent les densités de la matière ordinaire, de la matière noire et de l'énergie sombre, ainsi que l'amplitude et la forme des fluctuations quantiques dans l'Univers primordial. Ce modèle cosmologique décrit avec succès de nombreuses observations qui correspondent à des milliers de points de mesure, couvrant des échelles allant de un million à dix milliards d'années-lumière, jusqu'à la limite de l'Univers observable.

Cependant, ces succès observationnels ne doivent pas cacher nos lacunes : l'histoire de l'Univers est criblée de trous gênants. Nous sommes confrontés à des questions fondamentales sur la nature du cosmos, des problèmes auxquels jusqu'à maintenant nous n'avons pas été capables de répondre.

Par exemple, si l'on considère le contenu de l'Univers, les observations cosmologiques ont montré que la matière ordinaire ne représente que l'équivalent de 5% de la densité totale d'énergie de l'Univers. La matière noire, une forme inconnue de matière dont on déduit l'existence à partir de ses effets gravitationnels, représente 25%. Et les 70% restants de l'Univers sont constitués d'énergie sombre, de nature non identifiée et qui serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Diverses hypothèses ont été proposées quant à la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, ainsi qu'à leurs proportions respectives. Mais aucune n'explique pourquoi leurs caractéristiques doivent être si finement ajustées pour être en accord avec les observations.

Le contenu de l'Univers n'est pas la seule source de questions. Depuis des décennies, les cosmologistes étudient le rayonnement du fond diffus cosmologique, rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans et qui garde l'empreinte des fluctuations de densité de l'Univers primordial (voir *L'étrange affaire Univers*, par A. Riazuolo, page 16). Les observations du fond diffus par le satellite *Planck* de l'Agence spatiale européenne montrent que la température correspondant à ce rayonnement est uniforme dans tout le ciel; les variations sont de faible amplitude, de l'ordre de une partie pour 60 000. En



La singularité issue de l'effondrement d'une étoile massive dans un univers à quatre dimensions d'espace (au centre) est entourée d'un horizon des événements à trois dimensions d'espace. Sur cet horizon un espace également tridimensionnel se serait formé : c'est notre Univers.

considérant les distances qui séparent les différentes régions et la vitesse d'expansion de l'Univers, certaines de ces régions n'ont été à aucun moment en contact ; comment alors expliquer cette uniformité ?

L'étude du fond diffus cosmologique montre aussi que l'Univers a une courbure spatiale plate à grande échelle : la géométrie est euclidienne. Pourquoi l'Univers est-il dans cette configuration particulière ? Pourquoi sa géométrie n'est-elle pas sphérique ou hyperbolique ?

### INFLATION ÉNIGMATIQUE

Des réponses seraient éventuellement possibles avec une meilleure compréhension du Big Bang. En particulier, on imagine mal comment l'Univers des premiers instants après le Big Bang a pu donner lieu à celui que nous observons aujourd'hui – un cosmos à la température presque uniforme et dont l'espace est euclidien.

L'inflation est une approche efficace pour expliquer la structure à grande échelle de l'Univers, car elle aurait eu tendance à « aplatir » l'Univers, lissant toutes les régions incurvées de l'espace-temps. Grâce à cette expansion rapide, certaines régions de l'Univers, qui semblaient trop éloignées pour avoir été en contact, ont pu l'être, ce qui explique l'homogénéité de température du fond diffus cosmologique. Et, telle une loupe cosmique, l'inflation a amplifié les minuscules

fluctuations quantiques de densité jusqu'à des tailles cosmiques. Ces fluctuations sont devenues les germes à partir desquels des structures telles que les galaxies et les étoiles ont émergé.

L'inflation est donc un paradigme très fructueux. Mais comment se serait déclenché le phénomène, qui nécessitait beaucoup d'énergie. Selon le modèle standard, l'Univers primordial aurait pu contenir cette énergie sous la forme d'inflatons, des particules hypothétiques. Mais ces inflatons ne résolvent pas pour autant nos problèmes ; ils les repoussent juste d'un cran.

Il nous manque aussi une description satisfaisante de l'histoire de notre cosmos avant l'inflation, cette première  $10^{-36}$  seconde après le Big Bang (voir l'avant-propos, par E. Klein, page 10). Ici, les phénomènes quantiques deviennent si importants que les équations de la relativité générale ne sont plus appropriées. Une théorie quantique de la gravitation est requise, et elle manque encore.

Le plus grand défi de la cosmologie est de comprendre le Big Bang lui-même, l'émergence subite et violente de l'espace, du temps et de toute la matière à partir d'un état infiniment dense nommé singularité. Une telle singularité rend caduques toutes les lois de la physique. Nous n'avons pas les outils pour décrire ce qui s'y passe et nous n'avons aucune raison de penser qu'une singularité engendrerait un univers ordonné comme celui que nous

> voyons. On s’attendrait plutôt à l’émergence d’un univers extrêmement chaotique, dont le fond diffus cosmologique serait marqué par d’énormes fluctuations de température d’un point à un autre.

L’inflation serait-elle suffisante pour lisser les fluctuations? De surcroît, si ces fluctuations sont trop grandes, l’inflation pourrait-elle s’amorcer? Les problèmes d’une singularité ne peuvent pas être résolus par la seule inflation.

Les singularités sont étranges, mais elles ne nous sont pas tout à fait inconnues. En effet, il s’en forme également au centre des trous noirs, ces vestiges d’étoiles géantes effondrées (voir la figure ci-dessous). Toutes les étoiles sont des fournaies nucléaires où fusionnent les éléments légers, principalement de l’hydrogène. Ce processus de fusion nucléaire alimente une étoile pendant la majeure partie de son existence et s’oppose à l’effondrement gravitationnel. Cependant, quand l’astre a épuisé tout son combustible nucléaire, la gravité prend le dessus: c’est la fin de sa vie. Une étoile au moins dix fois plus massive que le Soleil s’effondre sur elle-même avant d’exploser en supernova. Si l’étoile est encore plus grosse, plus de 15 masses solaires, la supernova laisse derrière elle un cœur dense dont rien n’arrête l’effondrement. Il se contracte jusqu’à un point de taille nulle: une singularité qui forme un trou noir.

La singularité du trou noir est cachée par une surface bidimensionnelle nommée horizon des événements. Ce dernier marque une limite de non-retour: toute matière qui franchit cette frontière ne peut plus revenir en arrière et s’échapper du trou noir, car il lui faudrait une vitesse supérieure à celle de la lumière. La matière et même la lumière sont alors inexorablement attirées vers la singularité. L’intérieur de l’horizon des événements est coupé du reste de l’Univers.

**L’HORIZON DU BIG BANG**

Comme avec la singularité du Big Bang, les lois de la physique ne s’appliquent plus à la singularité du trou noir. Mais à l’inverse du Big Bang, un trou noir est entouré d’un horizon des événements. Cette surface empêche toute information concernant la singularité de fuir et protège les observateurs extérieurs des effets catastrophiquement imprévisibles de la singularité (on parle de censure cosmique).

Enveloppée par un horizon des événements, la singularité ne perturbe pas les lois de la physique qui décrivent et prédisent tout ce que l’on observe à l’extérieur de ces « enveloppes ». Vu de loin, un trou noir est une structure très simple, lisse et uniforme, définie par sa masse, son moment cinétique et sa charge électrique. De façon imagée, les

physiciens disent que «le trou noir n’a pas de cheveux»: il n’a aucun signe distinctif en dehors des trois grandeurs citées.

En revanche, la singularité du Big Bang (telle qu’on la comprend) n’est pas masquée par un horizon des événements. C’est ce constat qui nous a mis sur la piste de notre modèle. Nous avons cherché un moyen de nous abriter de la singularité du Big Bang et de son imprévisibilité catastrophique, peut-être avec quelque chose qui s’apparente à un horizon des événements.

Dans notre scénario, l’enveloppe qui entoure la singularité du Big Bang se distingue d’un horizon des événements par une caractéristique essentielle. Puisque nous percevons que notre Univers a trois dimensions spatiales et que celui-ci émerge du Big Bang, l’enveloppe de la singularité au cœur du Big Bang doit également avoir trois dimensions spatiales, et non deux comme l’horizon des événements d’un trou noir.

**EFFONDREMENT EXTRADIMENSIONNEL**

Cependant, pour que l’horizon des événements soit tridimensionnel, l’objet qui s’effondre en trou noir doit nécessairement avoir une dimension d’espace supplémentaire. Ce scénario implique donc que l’objet en question existe dans un univers doté de quatre dimensions d’espace.

**DU CATACLYSME AU TROU NOIR**

Quand une étoile massive en fin de vie explose, elle engendre un trou noir et forme un nuage de gaz et de poussière (en rouge à gauche). Dans un univers à plus de trois dimensions, un tel processus pourrait avoir donné naissance à notre Univers et son espace tridimensionnel.



Nasa/JPL-Caltech



L'idée de modèles à dimensions supplémentaires, où le nombre de dimensions d'espace excède les trois qui nous sont évidentes, est presque aussi ancienne que la relativité générale elle-même. Elle a été initialement proposée par le physicien allemand Theodor Kaluza en 1919, et étendue par le Suédois Oskar Klein dans les années 1920. Leur idée initiale était d'unifier dans un même formalisme l'électromagnétisme et la relativité générale.

### L'INCROYABLE BULK

Cette piste a finalement été abandonnée et l'idée de dimensions supplémentaires n'a retrouvé un réel élan que dans les années 1980, avec le développement de la théorie des cordes. Plus récemment, les scientifiques l'ont utilisée pour construire une cosmologie des univers dits branaires (voir *L'Univers resuscité*, par G. Veneziano, page 84).

**L'idée essentielle d'un univers branaire est que notre Univers tridimensionnel est un sous-univers inscrit dans le *bulk*, un univers à quatre dimensions spatiales, voire davantage**

L'idée essentielle d'un univers branaire est que notre Univers tridimensionnel est un sous-univers qui s'inscrit dans un univers plus vaste, ayant quatre dimensions spatiales ou plus. L'Univers tridimensionnel est ce qu'on nomme une brane, et l'univers de dimensionnalité supérieure est l'espace complet, ou *bulk* en anglais. Toutes les formes connues de matière et d'énergie sont emprisonnées dans notre brane à trois dimensions. L'exception est la gravité, qui se propage dans l'ensemble du *bulk*.

Dans notre scénario, le *bulk* est notre univers à quatre dimensions. Il est rempli

d'objets tels que des étoiles, des galaxies quadridimensionnelles, etc. Une de ces étoiles en fin de vie pourrait alors s'être effondrée pour former un trou noir, selon le même mécanisme qui est à l'œuvre dans notre Univers à trois dimensions.

À quoi ressemblerait un trou noir quadridimensionnel? Il serait lui aussi doté d'un horizon des événements, une surface de non-retour ne laissant s'échapper aucune matière ou lumière. Mais au lieu d'être une surface bidimensionnelle comme pour les trous noirs ordinaires, cet horizon des événements serait une région tridimensionnelle.

Plus intéressant, en modélisant l'effondrement d'une étoile quadridimensionnelle à l'aide du principe holographique, nous avons remarqué que, dans des circonstances très diverses, la matière éjectée lors de l'effondrement stellaire peut former une brane à trois dimensions spatiales sur cet horizon des événements tridimensionnel. Et cette brane est en expansion lente. Notre Univers serait cette brane à trois dimensions spatiales, et correspondrait à un hologramme d'un astre quadridimensionnel s'effondrant en trou noir. La singularité du Big Bang cosmique nous est alors cachée, enfermée pour toujours derrière un horizon des événements tridimensionnel.

Notre modèle a un certain nombre d'arguments en sa faveur, à commencer par le fait qu'il élimine la singularité nue qui a donné naissance à l'Univers. Mais qu'en est-il des autres problèmes cosmologiques, tels que la géométrie presque plate et la grande uniformité du cosmos? Notre scénario n'a plus besoin de l'inflation: l'univers quadridimensionnel étant plus ancien que ne l'impose le modèle du Big Bang pour notre Univers, tous les points de l'univers ont pu être en contact et auraient eu le temps d'atteindre l'équilibre. Si l'univers complet est homogène, alors notre Univers à trois dimensions spatiales a pu hériter de cette homogénéité. Par ailleurs, plus la masse de l'étoile quadridimensionnelle est importante, plus la brane qu'elle engendre a une géométrie plate, d'où l'on peut conclure que notre Univers est plat parce qu'il émerge de l'effondrement d'une étoile très massive.

Ainsi, notre modèle de Big Bang holographique non seulement résout les principales énigmes de la cosmologie standard (l'uniformité et la géométrie presque plate) sans recourir à l'inflation, mais il supprime aussi les effets délétères de la singularité initiale.

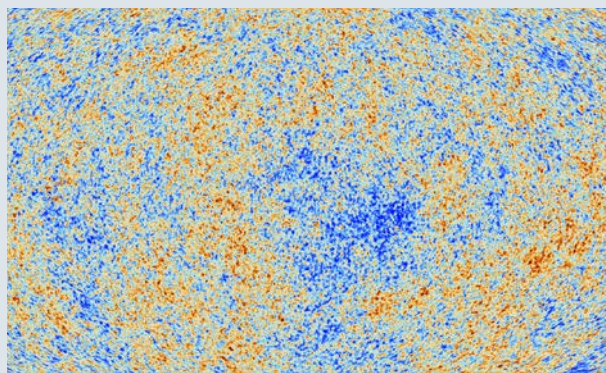
La question essentielle qui subsiste est: peut-on savoir si ce scénario est correct? Une des possibilités est d'étudier les détails du rayonnement du fond diffus cosmologique. À l'extérieur de notre brane, l'espace complet contient de la matière, qui serait attirée dans le voisinage du trou noir du fait de l'attraction >

## LES MODÈLES COSMIQUES ORIGINAUX ENRICHISSENT NOTRE VISION DE L'UNIVERS

L'Univers pourrait avoir plus de trois dimensions d'espace. L'idée remonte aux années 1920, mais la pléthore de modèles cosmologiques à dimensions supplémentaires n'ont été imaginés que plus récemment. Le scénario envisagé par les auteurs de l'article s'inscrit dans cette lignée, tout en présentant son lot d'idées originales. L'un des points forts est sa façon de traiter la singularité primordiale. Comme les lois physiques sont incapables de rendre compte du comportement d'une singularité, il est souhaitable d'éviter que celle-ci influe sur la structure actuelle de l'Univers. Dans la cosmologie standard, cet écueil est contourné par une phase d'inflation, qui n'a besoin que d'une petite portion d'espace assez régulière pour opérer et qui va grossir considérablement pour donner naissance à la vaste région qui englobe notre Univers observable. Il est en général admis que ces conditions favorables à l'émergence d'une phase d'inflation ne préjugent pas de façon critique de la physique de la singularité, mais on peut tout de même considérer cette singularité comme problématique. Ici, on suppose que la singularité du Big Bang résulte d'un effondrement gravitationnel dans un espace-temps à cinq dimensions (quatre spatiales et une de temps). Cela ne résout pas notre incapacité à décrire une singularité, mais, au moins, cette singularité-là ne peut-elle influencer sur le devenir de l'Univers. Qu'en est-il du point de vue observationnel ? Techniquement, les fluctuations de densité issues du modèle des auteurs sont invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude typique ne dépend pas de leur longueur d'onde. Or les données du satellite *Planck* indiquent que les fluctuations présentes dans l'Univers sont presque, mais pas tout à fait, invariantes d'échelle. Si l'écart à l'invariance d'échelle est effectivement faible (les 4 % mentionnés par les auteurs), il est réel, ce qui semble irrémédiablement exclure le modèle. Pour s'en sortir, les auteurs invoquent une éventuelle instabilité gravitationnelle dans l'espace-temps à cinq dimensions qui pourrait augmenter l'amplitude des fluctuations de grande longueur d'onde, conformément aux contraintes observationnelles. Mais cet ajout pourrait produire des fluctuations non gaussiennes, c'est-à-dire

que trop de fluctuations ont une amplitude qui dépasse la valeur typique qu'elles devraient avoir. Or là aussi, les données de *Planck* ne voient pas la trace d'un caractère non gaussien. D'une façon générale, l'impact de ces approches théoriques est complexe à évaluer. Celles-ci traitent certains des problèmes du modèle standard de la cosmologie, mais de nouvelles difficultés émergent par ailleurs. Comment savoir s'il s'agit d'une amélioration ? Deux aspects sont à prendre en compte : les données expérimentales et l'impact auprès de la communauté des chercheurs. Il semble que la piste présentée n'ait pas encore eu d'échos. Mais de tels travaux ne sont pas pour autant stériles. L'imagination des théoriciens permet de défier le modèle standard, de l'enrichir, d'ouvrir des pistes à explorer, quitte à montrer que le scénario standard est, en fin de compte, plus satisfaisant que les idées concurrentes.

Alain Riazuelo  
Institut d'astrophysique de Paris



Le rayonnement du fond diffus cosmologique pose des contraintes importantes sur le modèle standard du Big Bang et sur les autres pistes.

> gravitationnelle. Nous pouvons montrer que ce supplément de matière crée des fluctuations sur la brane qui vont à leur tour déformer le fond diffus dans des proportions faibles, mais mesurables. Nos calculs dans le cadre de ce scénario diffèrent d'environ 4 % par rapport aux dernières données du satellite *Planck*. Mais cette variation peut aussi être la conséquence d'effets secondaires que nous n'avons pas encore correctement modélisés.

### UN SCÉNARIO À TESTER

De plus, si le trou noir quadridimensionnel est en rotation (comme beaucoup de trous noirs de notre univers), alors notre brane pourrait ne pas être identique dans toutes les directions. La structure à grande échelle de notre Univers présenterait de petites différences selon les directions d'observation. Les astronomes pourraient aussi détecter cette anomalie en étudiant les

variations subtiles dans le fond diffus cosmologique.

Bien sûr, en même temps qu'il résout la question de l'origine de notre Univers, notre scénario soulève de nouvelles questions. En premier lieu : d'où est issu l'univers qui a donné naissance au nôtre ?

Pour résoudre cette énigme, Platon nous aide une fois de plus. Quand ses prisonniers émergent de leur caverne, la lumière du Soleil les éblouit et ils ne comprennent pas ce qui les entoure. Ils mettent longtemps à s'habituer à la luminosité. Au début, les prisonniers sont juste capables de distinguer les ombres et les reflets. Mais bientôt ils voient aussi la Lune et les étoiles. Enfin, ils arrivent à voir le Soleil et ce que sont le jour, la nuit et les saisons. Ils comprennent aussi la nature des ombres qu'ils voyaient, mais sans savoir d'où vient la puissance du Soleil, tout comme nous ne comprenons pas l'univers complet quadridimensionnel. Mais au moins ils savent où chercher les réponses. ■

### BIBLIOGRAPHIE

N. AFSHORDI ET AL.,  
From Planck Data to Planck Era:  
Observational Tests of  
Holographic Cosmology, *Phys.  
Rev. Lett.*, vol. 118(4), art. 041301,  
2017.

R. POURHASAN ET AL.,  
Out of the white hole:  
A holographic origin for the Big  
Bang, *Journal of Cosmology  
and Astroparticle Physics*,  
vol. 2014, art. 04(2014)005, 2014.

# ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

NOUVELLE FORMULE



FORMULE

**PASSION**

-27%



FORMULE

**DÉCOUVERTE**

-25%

FORMULE  
**INTÉGRALE**  
-41%



99€



79€



59€

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

FORMULE **INTÉGRALE**  
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries  
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

11A99E

**99€**  
Au lieu de 168,45€\*

FORMULE **PASSION**  
12 n° de *Pour la Science*  
+ 4 Hors-Séries

P1A79E

**79€**  
Au lieu de 108,45€\*

FORMULE **DÉCOUVERTE**  
12 n° de *Pour la Science*

D1A59E

**59€**  
Au lieu de 78,45€\*

### J'INDIQUE MES COORDONNÉES

M.  Mme

Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_

Téléphone \_\_\_\_\_

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science*  OUI  NON  
et de ses partenaires  OUI  NON

• Je choisis mon mode de règlement :

Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

Par carte bancaire

N° \_\_\_\_\_

Date d'expiration : \_\_\_\_\_ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : \_\_\_\_\_

Signature obligatoire

PAS097C

\* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr). Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.



L'ESSENTIEL

● Philosophes, théologiens et scientifiques s'interrogent sur la finitude de l'Univers. A-t-il une origine ou non ?

● La théorie de la relativité générale d'Einstein suppose un début – un Big Bang –, mais ne peut le décrire, car elle ne tient pas compte des effets quantiques incontournables.

● La théorie des cordes résout cette difficulté et propose une théorie quantique de la gravitation en introduisant un quantum de longueur.

● L'idée d'un Big Bang originel devient caduque et cède la place à celle d'un cycle de mort et de renaissance de l'Univers. Il n'a ni début ni fin !

L'AUTEUR



GABRIELE VENEZIANO, ancien physicien théoricien au Cern à Genève, professeur émérite au Collège de France, à Paris.

# L'univers RESSUSCITÉ

**L'application de la théorie des cordes à la cosmologie suggère que le Big Bang n'est pas le début de l'Univers, mais une transition entre deux états cosmiques distincts.**

# D

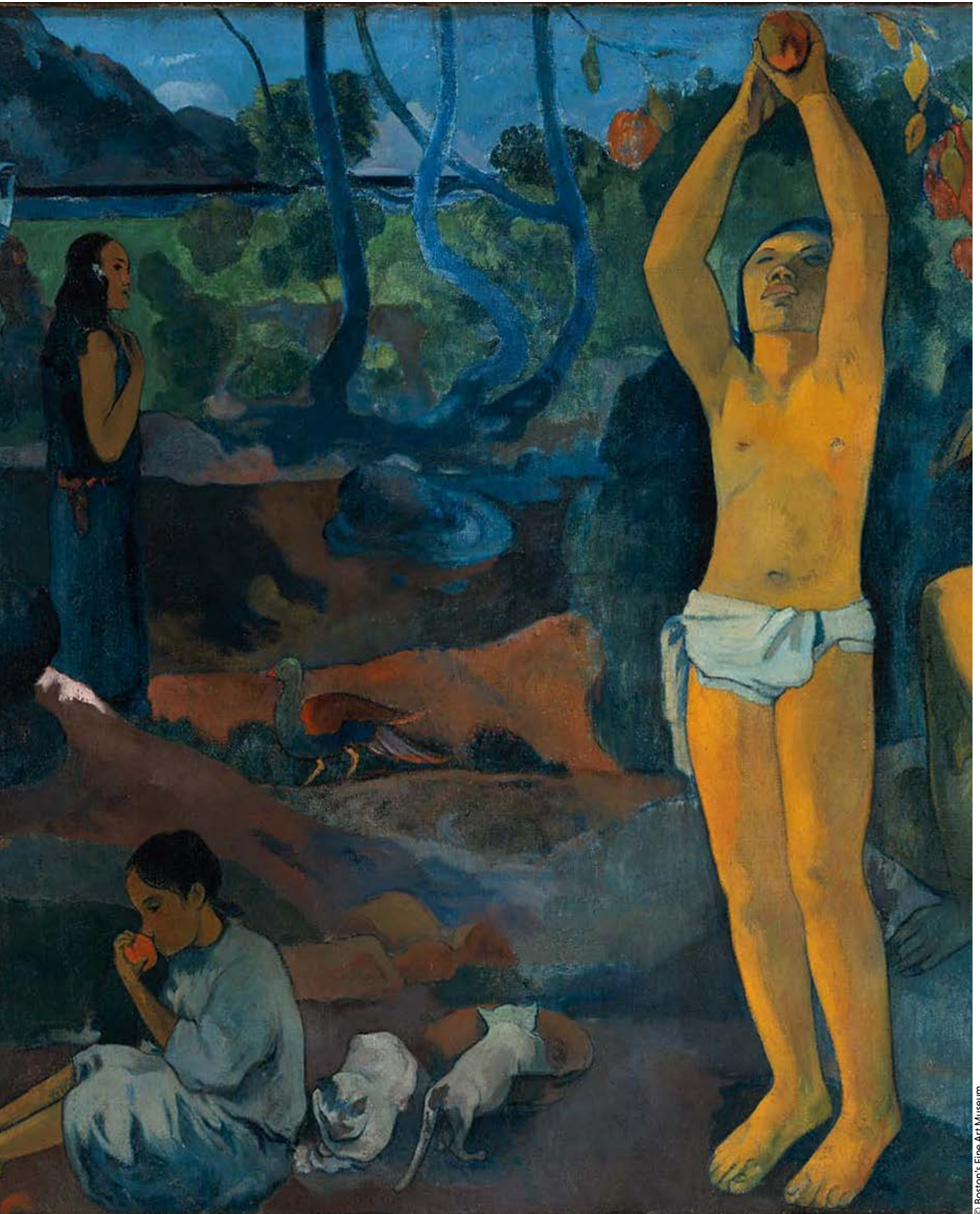
Dans *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?*, ce qu'il estime être son «testament pictural», Paul Gauguin pose les questions existentielles qui agitent chacun d'entre nous, y compris les cosmologistes. Ils sont plus particulièrement intéressés par la première, et avaient même trouvé une réponse, le Big Bang marquait le début de l'Univers. Et

pourtant... Est-il vraiment le commencement de tout, ou bien l'Univers existait-il avant? Il y a quelques années, une telle question aurait eu des allures de sacrilège. Une telle interrogation n'avait tout simplement pas de sens: autant chercher un point au nord du pôle Nord! Les temps ont changé et l'on peut désormais réfléchir à ce qu'a pu être une époque antérieure au Big Bang sans devenir un paria. Comment expliquer un tel changement? Par un changement de théorie.

Selon la théorie de la relativité générale, un Univers en expansion doit avoir commencé par un Big Bang, ce qui implique la finitude du temps, apparu simultanément avec l'espace et l'énergie (et la matière donc). Lors de sa naissance, l'Univers était concentré en une région si minuscule >



*D'où venons-nous? Qui sommes-nous? Où allons-nous?* de Paul Gauguin (détail). Selon la théorie des cordes, la première question est dépourvue de sens...



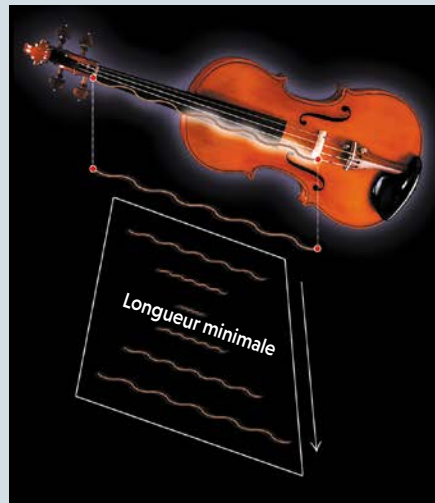
© Boston's Fine Art Museum



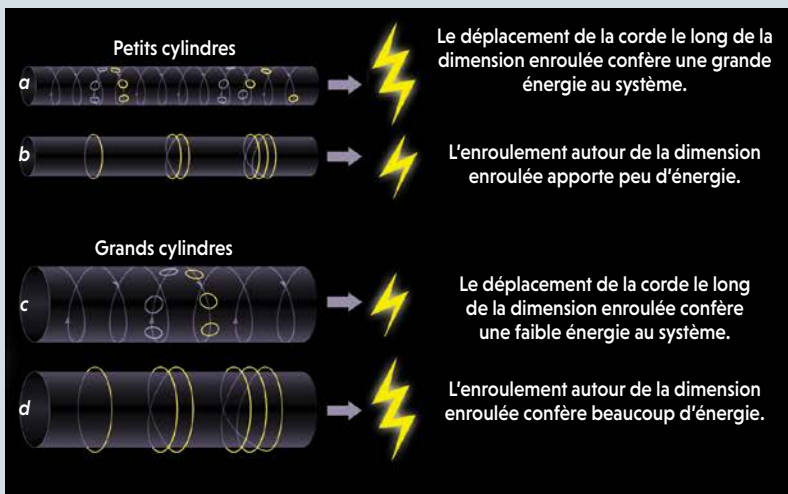
## THÉORIE DES CORDES ET DUALITÉ

La théorie des cordes pourrait décrire ce qui s'est passé au moment du Big Bang. Elle considère des objets semblables à des cordes de violon infiniment fines. En déplaçant les doigts, les violonistes raccourcissent les cordes et augmentent la fréquence de leurs vibrations. Des effets quantiques les empêcheraient d'aller au-dessous d'une longueur minimale de l'ordre de  $10^{-34}$  mètre.

Les tentatives faites pour réduire une corde à une longueur infinitésimale se soldent par une expansion.



En raison des différents types de mouvements que peut effectuer une corde, un espace dont les dimensions supplémentaires sont grandes (par rapport à  $10^{-34}$  mètre) est indiscernable d'un autre où ces dimensions sont petites. Considérons un espace bidimensionnel cylindrique. En plus de vibrer et de se déplacer en bloc, une corde peut s'enrouler comme un élastique autour d'un cylindre. Les relations d'interdétermination quantiques empêchent une corde d'avoir à la fois une position précise et une vitesse nulle : une particule confinée dans un espace restreint se déplace frénétiquement. Si la circonférence du cylindre est petite, les mouvements de la corde autour du cylindre sont agités : l'énergie liée aux déplacements est élevée (a). En revanche, une corde enroulée est peu tendue : l'enroulement n'apporte que peu d'énergie (b). Si le rayon du cylindre augmente, l'agitation de la corde est moindre et chaque déplacement apporte une faible quantité d'énergie (c), tandis que l'enroulement de la corde entraîne une tension élevée et donc une grande énergie (d). Pour deux cylindres de rayons inverses ( $R$  et  $1/R$ ), l'énergie totale – la seule quantité observable – reste la même. Cette propriété empêche l'espace de s'effondrer en un point et d'atteindre un état de densité infinie.



que les lois de la physique quantique devaient s'y appliquer. Or la relativité générale, qui n'est pas une théorie quantique, cesse d'être valide à l'échelle du Big Bang. La théorie des cordes, qui se développe depuis une trentaine d'années, est susceptible de prendre le relais en offrant une description quantique de la gravitation. Elle a récemment permis de concevoir deux modèles cosmologiques qui envisagent un Univers antérieur au Big Bang. Qui plus est, ces scénarios, où le temps n'a ni commencement, ni fin, pourraient avoir laissé des traces observables...

Cette fenêtre ouverte sur ce qui pourrait s'être passé avant l'origine de l'Univers n'est que le dernier des revirements intellectuels qui se succèdent depuis des millénaires. Dans toutes les cultures, les philosophes et les théologiens, ainsi que les artistes, se sont confrontés à la question du commencement des temps et de l'origine du monde. Notre «généalogie» passe par les premières formes de vie, la formation des étoiles, la synthèse des premiers éléments et remonte jusqu'à l'énergie qui baignait l'espace primordial. Continue-t-il ainsi éternellement ou prend-t-il racine quelque part?

Les philosophes grecs ont longuement débattu de l'origine du temps. Aristote défendait l'absence de commencement : si l'Univers ne peut naître *ex nihilo*, il doit avoir toujours existé. Le temps devrait s'étendre éternellement dans le passé comme dans le futur. À l'inverse, Saint Augustin affirmait que Dieu existe en dehors de l'espace et du temps et qu'il est capable de les créer comme il a forgé les autres aspects du monde. Le temps lui-même faisant partie de la création, il n'y avait tout simplement pas d'avant.

### UNE ÉTRANGE HOMOGENÉITÉ

La théorie de la relativité générale a conduit les cosmologistes modernes à une conclusion semblable. Dans ce cadre, l'espace et le temps ne sont pas rigides et absolus, mais dynamiques et déformés par l'influence de la matière. À de grandes échelles de distance, l'espace se courbe, s'étend ou se contracte au cours du temps, emportant avec lui la matière. Au cours des années 1920, à la suite d'Edwin Hubble, les astronomes ont confirmé que notre Univers est en expansion: les galaxies s'éloignent les unes des autres. Une des conséquences de cette expansion est que le temps ne peut s'étendre indéfiniment vers le passé. En projetant le film de l'histoire cosmique à l'envers, les galaxies se rapprochent les unes des autres jusqu'à se rejoindre en un point infinitésimal, nommé singularité. Toutes les galaxies, ou plutôt leurs précurseurs, se retrouvent dans un volume nul. La densité, la température, mais aussi la courbure de l'espace-temps, deviennent infinies. La singularité est le cataclysme ultime au-delà duquel nous ne pouvons plus poursuivre de généalogie cosmique.

Ce déroulement soulève de nombreuses



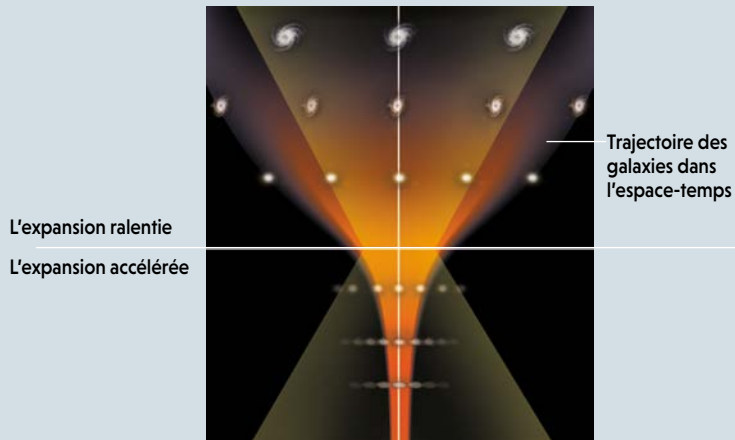
questions. En particulier, il semble peu compatible avec le fait que l'Univers apparaisse homogène, à grande échelle, dans toutes les directions. Pour que le cosmos ait le même aspect en tout point, il faut qu'une forme d'interaction se soit établie entre les régions éloignées de l'espace afin que leurs propriétés se soient homogénéisées. Or cela contredit les données de l'expansion cosmologique. La lumière a été libérée il y a 13,7 milliards d'années (c'est le fond diffus cosmologique observé aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes). Dans toutes les directions, on trouve des galaxies distantes de plus de 13 milliards d'années-lumière. Il existe ainsi des galaxies, dans des directions opposées, qui sont séparées par plus de 25 milliards d'années-lumière. Par conséquent, ces régions n'ont jamais été en contact: elles n'ont pas eu le temps d'échanger de la lumière, ni *a fortiori* de la matière. Leur densité, leur température et autres propriétés n'ont pas pu être homogénéisées.

Pourtant, les propriétés de la Voie lactée sont à peu près les mêmes que celles de ces galaxies lointaines. Cette homogénéité pourrait être une coïncidence. Cependant, il est difficile d'admettre que les dizaines de milliers de parties indépendantes dans l'image du fond diffus cosmologique, statistiquement identiques, avaient dès le début des propriétés identiques. Il existe deux explications plus naturelles: soit l'Univers était dans ses premiers instants beaucoup plus petit que ne le suppose la cosmologie classique, soit il est beaucoup plus vieux. Dans les deux cas, deux parties distantes du ciel avant l'émission du rayonnement cosmologique ont pu interagir.

## LE RECOURS À L'INFLATION

La première hypothèse est celle que les astrophysiciens préfèrent. L'Univers aurait connu une période d'expansion vertigineuse, l'inflation, au tout début de son histoire. Auparavant, toutes les régions de l'Univers étaient si proches que leurs propriétés se sont homogénéisées. Puis, au cours de la phase d'inflation, l'expansion s'est emballée et l'Univers s'est dilaté plus vite que la lumière. Les différentes parties du cosmos ont été isolées les unes des autres. Après une infime fraction de seconde, l'inflation a pris fin et l'expansion a retrouvé un cours tranquille. Le contact entre les galaxies s'est progressivement rétabli alors que la lumière rattrapait son retard, créé par l'inflation. Pour expliquer cette expansion frénétique, les physiciens ont introduit un nouveau champ de force, l'inflaton, qui a produit une force gravitationnelle répulsive très élevée dans les premiers instants suivant le Big Bang. Contrairement à la gravitation, l'inflaton accélère l'expansion. Une fraction de seconde après le Big Bang, il s'est épuisé, la force répulsive a disparu et la gravitation a repris le dessus. Cette théorie, proposée en 1981 par le physicien Alan Guth, explique un grand nombre d'observations. >

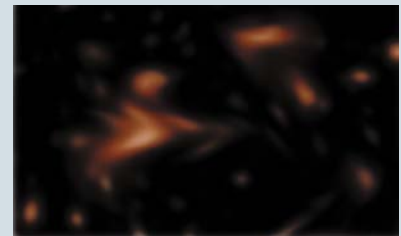
## LE SCÉNARIO PRÉ-BIG BANG



Selon le scénario du pré-Big Bang, né de l'application de la théorie des cordes à la cosmologie, le Big Bang n'est pas à l'origine ultime de l'Univers, mais une transition entre deux états. Auparavant, l'expansion accélérât, après elle a décéléré (du moins au début).



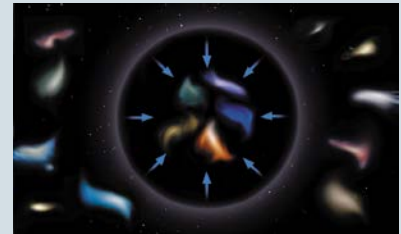
L'Univers existe depuis toujours. Dans un lointain passé, il était presque vide. Les forces, telle la gravitation, sont intrinsèquement faibles.



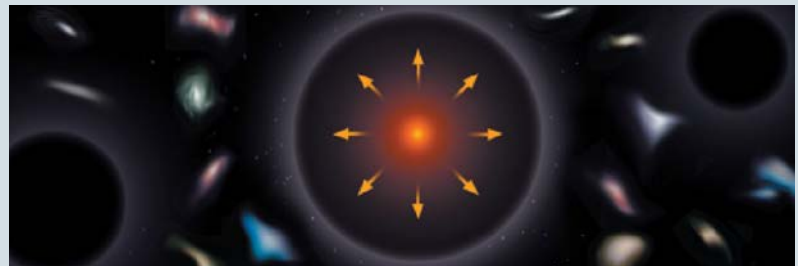
Les forces se sont progressivement intensifiées, et la matière a commencé à s'agréger. Certaines régions sont devenues si denses qu'elles se sont effondrées en trou noir.



L'espace à l'intérieur du trou noir a subi une expansion accélérée. La matière qu'il contenait a été isolée de la matière extérieure.



Dans le trou noir, la matière s'est effondrée vers le centre et la densité a augmenté jusqu'à la limite imposée par la théorie des cordes.



Quand la matière a atteint la densité maximale autorisée, les effets quantiques ont forcé l'espace-temps à rebondir en un Big Bang. À l'extérieur, les autres trous noirs ont donné naissance à des univers distincts, dont le nôtre.

➤ Néanmoins, certaines difficultés théoriques subsistent, à commencer par la nature de l'inflaton et ce qui a pu lui fournir une telle énergie initiale.

Selon ce paradigme, l'Univers s'est refroidi à une température quasi-nulle pendant la phase d'inflation, puis s'est «réchauffé» ensuite. Dans les faits, ce réchauffage joue le rôle de l'ancien Big Bang dans la cosmologie inflationniste : il n'est ni singulier ni associé au début des temps. Un problème important, laissé de côté par la cosmologie inflationniste, est de savoir si le temps, et l'inflation elle-même, ont eu une origine particulière.

La seconde façon de résoudre le problème est moins classique: elle suppose l'Univers beaucoup plus vieux que prévu. Si le temps n'a pas commencé avec le Big Bang, et si une longue ère a précédé le début de la période d'expansion actuelle, l'Univers a eu amplement le temps de s'homogénéiser. Un tel scénario élimine en outre la difficulté posée par la singularité qui surgit lorsqu'on veut étendre la relativité générale au-delà de son domaine d'application. En effet, à l'approche du Big Bang, le confinement de la matière est tel que les effets quantiques doivent être dominants, et la relativité n'en tient aucun compte. Pour découvrir ce qui s'est réellement passé, les physiciens doivent remplacer la relativité générale par une théorie quantique de la gravitation. Les théoriciens s'y sont employés depuis l'époque d'Einstein, sans grands progrès jusqu'au milieu des années 1980.

Aujourd'hui, deux approches semblent prometteuses. La première, la gravitation quantique à boucles, conserve l'essentiel de la relativité – la

nature dynamique de l'espace-temps et l'invariance par rapport au système de coordonnées utilisé – et met ces principes en œuvre dans le cadre de la physique quantique. L'espace-temps est alors formé de petits morceaux insécables. La gravitation quantique à boucles a connu d'importants progrès, mais elle n'est peut-être pas assez radicale pour résoudre tous les problèmes posés par la quantification de la gravitation.

## LES CORDES REBONDISSENT

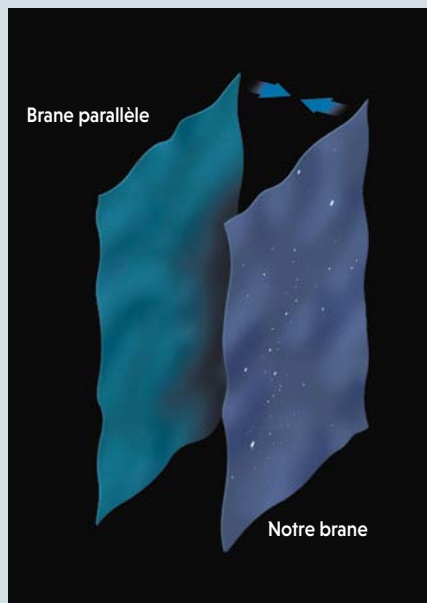
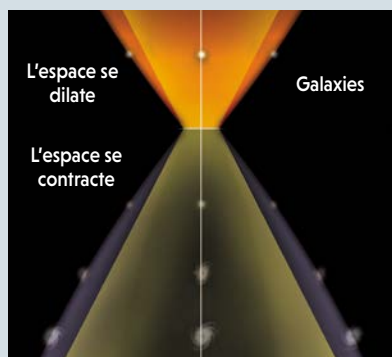
La seconde approche, sur laquelle sont fondés les scénarios présentés ici, est la théorie des cordes. Sa première ébauche est apparue en 1968 dans un modèle que j'ai proposé pour décrire les interactions des constituants du noyau atomique. Elle a ressuscité dans les années 1980 pour devenir une candidate à l'unification de la relativité générale et de la théorie quantique.

Son idée de base est que les composants fondamentaux de la matière ne sont pas ponctuels, mais unidimensionnels, à l'instar de cordes sans épaisseur (voir l'encadré, page 86). Ces cordes vibrent comme celles d'un violon, et le vaste bestiaire des particules, dotées chacune de propriétés caractéristiques, reflète les différents modes de vibration. Les lois quantiques permettent à ces cordes vibrantes dénuées de masse de décrire les particules et leurs interactions, et elles font émerger de nouvelles propriétés ayant de profondes implications pour la cosmologie.

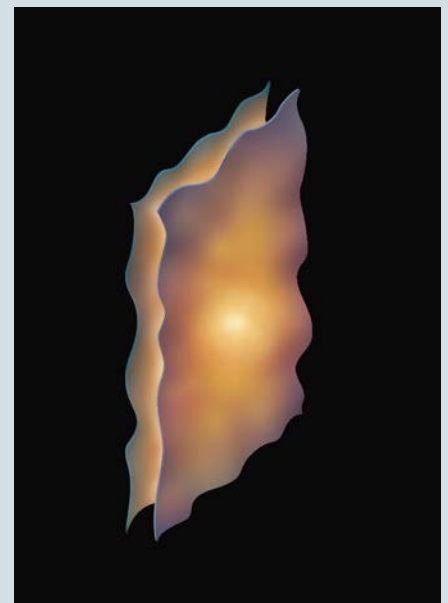
D'abord, des effets quantiques imposent aux cordes une taille minimale de l'ordre de  $10^{-34}$  mètre. Ce quantum irréductible de longueur,

## LE SCÉNARIO EKPYROTIQUE

Si notre Univers est une membrane multidimensionnelle, plus simplement une « brane », flottant dans un espace de dimension supérieure, le Big Bang aurait résulté de la collision de deux branes parallèles. Des collisions se produiraient périodiquement.



Deux branes presque vides s'attirent. Dans chacune d'elles, l'espace se contracte. Nous sommes avant le Big Bang.



Les branes entrent en collision. L'énergie du choc est convertie en matière et en rayonnement. C'est le Big Bang.

noté  $l_s$  est une nouvelle constante de la nature, aux côtés de la vitesse de la lumière et de la constante de Planck. Dans la théorie des cordes, elle joue un rôle crucial en imposant une borne finie à des quantités qui, sans cela, deviendraient nulles ou infinies.

Ensuite, l'énergie de certains modes de vibration des cordes correspond aux masses des particules. Par ailleurs, ces vibrations confèrent aux cordes un moment cinétique intrinsèque, ou spin. Les cordes peuvent acquérir plusieurs unités de spin tout en restant de masse nulle: elles sont à même de représenter les bosons, particules messagères des forces fondamentales (tel le photon pour l'électromagnétisme). Historiquement, les physiciens ont perçu l'intérêt de la théorie des cordes pour la quantification de la gravité en découvrant des modes de vibration de spin égal à deux, identifiés à la particule supposée véhiculer l'interaction gravitationnelle, le graviton.

Les équations de la théorie des cordes ne sont cohérentes que si l'espace a neuf dimensions au lieu des trois usuelles, et si les six dimensions spatiales supplémentaires sont enroulées sur de très petites distances.

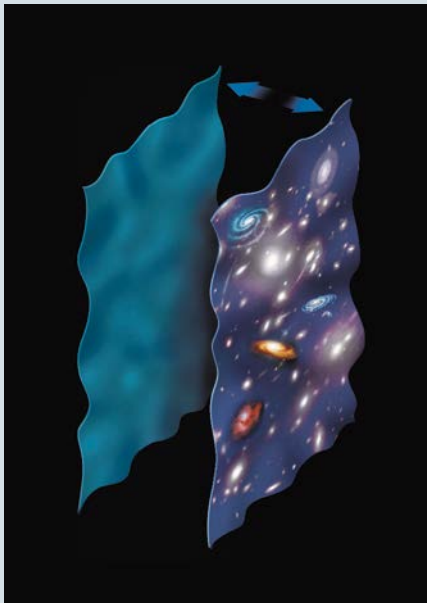
De plus, les constantes qui décrivent l'intensité des forces fondamentales, telle la constante de gravitation ou la charge électrique, ne sont plus fixées arbitrairement, mais apparaissent dans la théorie des cordes sous forme de champs dont les valeurs évoluent au cours du temps. L'un de ces champs, le dilaton, joue un rôle particulier: il détermine l'évolution des autres champs, c'est-à-dire l'intensité de toutes les interactions. Au

cours de différentes époques cosmologiques, les « constantes » de la physique ont ainsi pu connaître de minuscules variations. Les astrophysiciens cherchent aujourd'hui à les mesurer en observant l'Univers lointain.

## DE L'IMPORTANCE DU CYLINDRE

Enfin, les cordes ont révélé l'existence de nouvelles symétries de la nature, les dualités, qui transforment radicalement notre compréhension intuitive du comportement des objets à des échelles extrêmement petites. L'une de ces symétries, la T-dualité, relie les petites et les grandes dimensions supplémentaires. Cette symétrie est liée à la plus grande variété de mouvements possibles pour les cordes, par rapport à des particules ponctuelles. Considérons une corde fermée (une boucle) se déplaçant dans un espace à deux dimensions dont l'une est repliée en un petit cercle. Cet espace équivaut à la surface d'un cylindre. En plus de vibrer, la corde peut se déplacer à la surface, mais aussi s'enrouler une ou plusieurs fois autour du cylindre, tel un élastique retenant une affiche enroulée.

Vibration, déplacement et enroulement contribuent à l'énergie totale de la corde. L'énergie des deux derniers modes dépend de la taille du cylindre. L'énergie d'enroulement est proportionnelle au rayon du cylindre: plus il est grand, plus la corde doit être étirée pour s'enrouler, de sorte qu'elle emmagasine davantage d'énergie. En revanche, le long de la dimension enroulée, le déplacement d'une corde se traduit par une énergie inversement proportionnelle au >



Les branes rebondissent. En leur sein, l'espace subit une expansion décélérée. La matière s'agrège en structures telles que des amas de galaxies.



Dans le modèle cylindrique, les branes s'éloignent en ralentissant, en raison de leur attraction mutuelle. Par ailleurs, la matière se dilue.

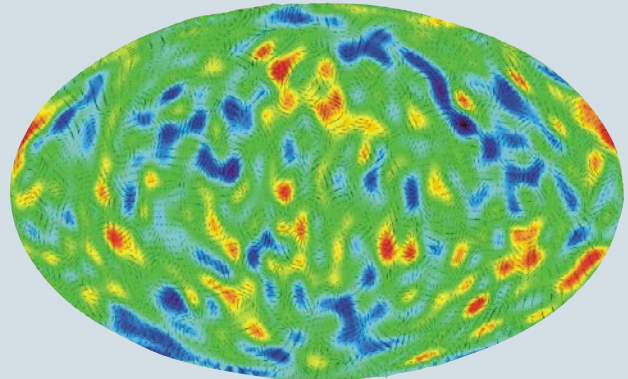
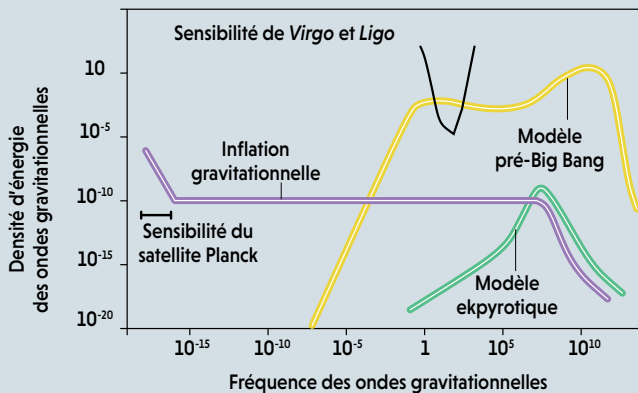


Les branes cessent de s'éloigner et se rapprochent à nouveau. Chaque brane subit alors une accélération de son expansion.



## LE FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

L'observation de l'Univers antérieur au Big Bang paraît impossible. Cependant, il subsiste de cette époque une forme de rayonnement, les ondes gravitationnelles, dont on pourrait détecter les effets sur la polarisation du fond diffus cosmologique. Les scénarios pré-Big Bang et ekpyrotique présentent plus d'ondes gravitationnelles de hautes fréquences que le modèle de l'inflation. Hélas, les observations actuelles ne peuvent départager ces modèles. Un espoir repose néanmoins sur les interféromètres *Advanced Virgo*, en Italie, et *Ligo*, aux États-Unis. Ils ont déjà détecté des ondes gravitationnelles, mais « seulement » émises par des trous noirs.



Simulation de la polarisation du fond diffus cosmologique

> rayon: plus le cylindre est gros, plus la corde peut s'y déplacer «tranquillement». Car les relations d'indétermination de la mécanique quantique empêchent une particule localisée avec précision d'être au repos. Une particule confinée est ainsi animée d'une grande vitesse, tandis qu'une particule dont la position est peu contrainte se déplace plus «tranquillement».

Sur un cylindre plus étroit, l'enroulement de la corde nécessite une énergie inférieure, tandis que le déplacement est plus agité et confère plus d'énergie au système. Si l'on échange un cylindre d'un rayon donné  $R$  avec un cylindre de rayon inverse  $1/R$  (l'unité étant la longueur minimale des cordes), les séries d'états d'énergie produits par les deux modes sont échangées, mais l'ensemble des états reste identique. Pour un observateur extérieur, les grandes dimensions enroulées sont alors physiquement équivalentes aux petites, de rayon inverse.

La T-dualité se comprend mieux dans le cadre d'espaces dotés d'une dimension circulaire de taille finie, mais elle s'applique aussi aux trois dimensions infinies de l'espace ordinaire. Ce n'est pas la taille de l'espace pris dans son ensemble qui importe, mais son facteur d'échelle, le rapport entre l'écartement des objets qu'il contenait à une date donnée et leur éloignement actuel. Selon la T-dualité, un univers où le facteur d'échelle est petit est équivalent à un univers où le facteur d'échelle est grand. Une telle symétrie, qui n'existe pas dans la relativité générale, provient du cadre unificateur de la théorie des cordes.

Pendant des années, les théoriciens des

cordes ont pensé que la T-dualité ne s'appliquait qu'aux cordes fermées. En 1995, Joseph Polchinski, de l'université de Santa Barbara, a montré qu'elle reste valable pour les cordes ouvertes, moyennant des conditions, dites de Dirichlet, sur leurs extrémités: en plus d'inverser les rayons des dimensions enroulées, on doit fixer les extrémités des cordes dans un certain nombre de dimensions. Ainsi, les extrémités d'une corde peuvent flotter librement dans trois des dix dimensions spatiales tandis que leur mouvement dans les sept autres est bloqué. Ces trois dimensions libres forment un sous-espace nommé membrane, ou D-brane. En 1996, Petr Hořava, alors à l'université Rutgers, et Edward Witten, de l'institut d'études avancées de Princeton, ont imaginé que notre Univers réside sur une telle D-brane à dimension trois. La mobilité partielle des électrons et des autres particules expliquerait pourquoi nous ne pouvons percevoir les dix dimensions de l'espace.

### HARO SUR L'INFINI

Toutes les propriétés des cordes suggèrent la même chose: les cordes détestent l'infini. Comme elles ne peuvent être réduites à un point, elles éliminent les paradoxes provoqués par un tel effondrement. Leur taille non nulle et les symétries nouvelles qui leur sont associées imposent des bornes supérieures aux quantités physiques qui croissent indéfiniment dans les théories classiques, et des bornes inférieures aux quantités qui diminuent. Lorsqu'on projette le film de l'histoire cosmique à l'envers, l'espace-temps se contracte

et le rayon de courbure de toutes les dimensions rétrécit. Selon les théoriciens, la T-dualité empêche le rayon de courbure de décroître jusqu'à zéro et de provoquer la singularité du Big Bang standard. Parvenue à la longueur minimale possible, cette contraction devient physiquement équivalente à une expansion de l'espace, dont le rayon de courbure recommence à croître. La T-dualité fait «rebondir» l'effondrement, qui devient une nouvelle expansion.

## L'UNIVERS RENVERSÉ

La singularité disparue, rien n'empêche d'imaginer que l'Univers existait avant le Big Bang. En combinant les symétries introduites par la théorie des cordes avec la symétrie par renversement du temps, selon laquelle les équations de la physique fonctionnent indifféremment lorsqu'on les applique vers le futur ou vers le passé, les chercheurs ont imaginé de nouvelles cosmologies, où le Big Bang n'est pas le commencement du temps, mais seulement une transition violente entre deux états de l'Univers : avant, l'expansion accélère, après, elle ralentit. L'intérêt de cette conception est qu'elle intègre automatiquement les idées du modèle inflationniste, c'est-à-dire l'existence d'une période d'inflation accélérée capable de justifier l'homogénéité de l'Univers. Dans la théorie standard, l'accélération est causée après le Big Bang par l'inflaton. Dans la cosmologie des cordes, l'accélération se produit avant le Big Bang et résulte des symétries de la théorie.

Les conditions régnant aux abords du Big Bang sont si extrêmes que nul ne sait résoudre les équations qui les décrivent. Néanmoins, les théoriciens des cordes se sont risqués à décrire certains aspects de l'Univers précédant le Big Bang. Deux modèles sont aujourd'hui à l'étude. Le premier, connu sous le nom de scénario pré-Big Bang, postule que l'Univers antérieur au Big Bang est une image miroir de l'Univers postérieur à cet événement (*voir l'encadré page 87*).

L'Univers s'étend éternellement dans le futur comme dans le passé. Il y a infiniment longtemps, il était presque vide et ne contenait qu'un gaz raréfié de rayonnements et de matière. Les forces de la nature, contrôlées par le dilaton, étaient si faibles que les particules de ce gaz interagissaient à peine. Avec le temps, les forces ont gagné en intensité et la matière a commencé à s'agréger. Certaines régions en ont accumulé aux dépens de leurs voisines.

La densité y est devenue telle que des trous noirs se sont formés. La matière piégée à l'intérieur a été isolée et l'Univers s'est scindé en morceaux déconnectés. Au sein de chaque trou noir, la densité de matière était toujours plus élevée. Lorsque la densité, la température et la courbure ont atteint les valeurs maximales permises par la théorie des cordes, ces quantités ont «rebondi» et commencé à décroître. Le Big

Bang n'est autre que le moment où s'est produit ce renversement. L'intérieur de l'un de ces trous noirs est devenu notre Univers.

Ce scénario pré-Big Bang, que j'ai proposé avec des collègues en 1991, a été la première tentative d'application de la théorie des cordes à la cosmologie. Il a suscité diverses critiques, dont il nous reste à déterminer si elles ont mis le doigt sur une faille importante. Andrei Linde, de l'université Stanford, a ainsi fait valoir que le trou noir dont est issu l'Univers a dû avoir une taille inhabituellement grande. Toutefois, on peut répondre que les équations prédisent des trous noirs de toutes les tailles : notre Univers s'est simplement formé dans un univers suffisamment grand.

Une objection plus grave est venue de Thibault Damour, de l'IHÉS, à Bures-sur-Yvette, et de Marc Henneaux, de l'université libre de Bruxelles : le comportement chaotique de la matière et de l'espace-temps au moment du bang s'oppose à la régularité observée de l'univers primitif. Cependant, un état chaotique peut produire un gaz dense de minuscules « trous de ficelle », des cordes si petites et si massives qu'elles étaient sur le point de devenir des trous noirs.

L'autre principal modèle décrivant l'Univers avant le Big Bang est le scénario ekpyrotique (du mot grec signifiant «conflagration»). Développé depuis le début des années 2000 par Neil Turok, de l'université de Cambridge, et Paul Steinhardt, de l'université de Princeton, ce scénario est fondé sur l'idée que notre Univers serait une D-brane qui flotte à proximité d'une autre dans un espace

**La science offre  
au moins deux  
théories plausibles  
selon lesquelles  
l'Univers existait  
avant le Big Bang**

de dimension supérieure.

L'espace séparant les branes se comporterait comme un ressort qui les conduit à entrer en collision tandis qu'elles se contractent. L'énergie du choc est convertie en matière et en rayonnement : c'est le Big Bang (*voir l'encadré page 88*). >

> Dans l'une des variantes de ce scénario, les collisions se produisent de façon cyclique. Deux branes se rencontrent, rebondissent et s'écartent avant de retomber l'une sur l'autre et ainsi de suite. Entre ces collisions, les branes se dilatent continuellement, à l'exception d'une phase de contraction juste avant le choc. L'expansion ralentit lorsque les branes s'écartent et accélère lorsqu'elles se rapprochent à nouveau. La phase actuelle d'accélération de l'expansion cosmique, découverte ces dernières années lors de l'observation de supernovæ lointaines, annonce peut-être une prochaine collision.

Les scénarios pré-Big Bang et ekpyrotique partagent des traits communs. Tous deux commencent avec un Univers immense, froid et presque vide, et tous deux peinent à expliquer la transition entre les phases pré et post-Big Bang. Mathématiquement, leur principale différence réside dans le comportement du dilaton. Dans le scénario pré-Big Bang, il a initialement une valeur très basse, de sorte que les forces fondamentales sont faibles, et il gagne progressivement en intensité. Dans le scénario ekpyrotique, c'est le contraire: la collision se produit lorsque l'intensité des forces est minimale.

Cette faiblesse des forces a suscité l'espoir de réussir à analyser le rebond avec des techniques classiques. Malheureusement, dans les variantes actuelles, quand les branes se rapprochent jusqu'à s'entrechoquer, la dimension qui les sépare «s'effondre», de sorte que la singularité ne peut être évitée. Autre obstacle, il faut finement ajuster les conditions initiales pour que l'on puisse résoudre les problèmes cosmologiques classiques. Par exemple, avant le choc, les branes doivent être quasiment parallèles, sans quoi elles ne donnent pas lieu à un Big Bang assez homogène.

En laissant de côté la difficile tâche d'étayer ces deux scénarios d'un point de vue mathématique, les physiciens cherchent des conséquences observables. À première vue, les deux modèles évoquent davantage des spéculations métaphysiques que des théories physiques. Toutefois, des détails de l'époque antérieure au Big Bang pourraient avoir des conséquences observables, tout comme ceux de l'époque d'inflation. Les minuscules fluctuations observées dans la température et la polarisation du rayonnement du fond diffus cosmologique fournissent des tests empiriques.

On interprète les fluctuations de température comme la marque d'ondes acoustiques qui se sont propagées dans le plasma primordial durant les 380000 ans précédant l'émission du rayonnement de fond cosmologique. La régularité de ces fluctuations prouve que les ondes acoustiques ont été engendrées au même moment. Les modèles inflationnistes, pré-Big Bang et ekpyrotique satisfont tous les trois cette contrainte et passent ce premier test. Les ondes acoustiques y sont engendrées au même moment par des fluctuations quantiques amplifiées lors de la phase

d'expansion accélérée.

Par ailleurs, chaque modèle prédit une répartition angulaire spécifique des fluctuations. Les observations montrent que l'amplitude des fluctuations de grande taille angulaire est constante, tandis qu'aux petites échelles, on observe des pics. Le modèle inflationniste reproduit parfaitement cette distribution. Durant l'inflation, la courbure de l'espace-temps change lentement. Des fluctuations de tailles différentes sont ainsi engendrées dans des conditions similaires et le spectre de fluctuation initial est invariant par rapport à l'échelle angulaire. Les pics aux petites échelles résultent de l'altération des fluctuations initiales, dans la suite de l'histoire de l'Univers. Dans la cosmologie des cordes, la courbure de l'espace-temps évolue très vite, ce qui accroît l'amplitude des fluctuations à petite échelle. Cependant, d'autres processus compensent ce phénomène: dans le scénario ekpyrotique, la contraction des branes produit un spectre de fluctuation invariant d'échelle; dans le modèle pré-Big Bang, intervient un champ quantique nommé curvaton. Aussi, pour le moment, les trois modèles correspondent aux observations.

La polarisation du fond diffus cosmologique fournit un autre test. Contrairement aux autres modèles, le scénario d'inflation prévoit que les ondes gravitationnelles ont contribué aux fluctuations de température. Certaines de ces ondes gravitationnelles dites primordiales auraient laissé une signature dans la polarisation du rayonnement de fond cosmologique.

## LA QUÊTE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

La détection des ondes gravitationnelles primordiales, telle qu'annoncée par l'équipe Bicep2, aurait clairement infirmé les scénarios se substituant à celui de l'inflation. Malheureusement, ces résultats n'ont pas été validés.

L'analyse du fond cosmologique n'est pas la seule façon de tester ces théories. Le scénario pré-Big Bang prédit l'émission d'ondes gravitationnelles, dont certaines seraient accessibles aux détecteurs d'ondes gravitationnelles tels que *Virgo* (voir l'encadré page 90). Par ailleurs, puisque les scénarios ekpyrotique et pré-Big Bang impliquent des variations du dilaton, qui est couplé au champ électromagnétique, ils prédisent l'existence de fluctuations du champ magnétique à grande échelle. On pourrait découvrir des vestiges de ces fluctuations dans les champs magnétiques galactiques.

Quand a donc commencé le temps? La science ne répond pas encore, mais elle dispose d'au moins deux théories potentiellement testables qui affirment de façon plausible que l'Univers – et par conséquent le temps – existait avant le Big Bang. Si l'un de ces scénarios est vrai, alors le cosmos a toujours existé. Des trois questions de Gauguin ne reste alors que celle-ci :

## BIBLIOGRAPHIE

M. GASPERINI,  
On the initial regime  
of pre-big bang cosmology,  
*arxiv.org/abs/1707.05763*, 2017.

M. GASPERINI,  
Observable gravitational waves  
in pre-big bang cosmology:  
An update, *Journal of Cosmology  
and Astroparticle Physics*, vol. 12,  
art. 010, 2016.

M. GASPERINI,  
*Gravity, Strings and Particles :  
A Journey into the Unknown*,  
Springer, 2014.

M. GASPERINI  
ET G. VENEZIANO,  
The Pre-Big Bang Scenario  
in String Cosmology, *Physics  
Reports*, vol. 373, p. 1-212, 2003.

J. KHOURY ET AL.,  
The ekpyrotic Universe :  
Colliding Branes and the Origin  
of the Hot Big Bang, *Physical  
Review D*, vol. 64, n° 12, 2001.





## L'ESSENTIEL

- L'espace-temps pourrait être constitué de minuscules éléments d'information liés par intrication quantique.
- Des spécialistes explorent cette hypothèse dans le cadre du projet *It from Qubit*, qui réunit informaticiens, physiciens, astrophysiciens...

● L'objectif est d'élaborer une théorie quantique de la gravitation, compatible avec la physique quantique et la relativité générale.

● On sera alors équipés pour mieux comprendre les premiers instants de l'Univers.

## L'AUTEURE



CLARA MOSKOWITZ est rédactrice pour la revue *Scientific American* où elle couvre l'astrophysique, la cosmologie et la physique.

# L'essence quantique de L'ESPACE-TEMPS

**La gravité et l'espace-temps ne seraient que le produit final, en trois dimensions, de la manifestation la plus étonnante de la physique – l'intrication quantique – dans un espace n'ayant que deux dimensions.**

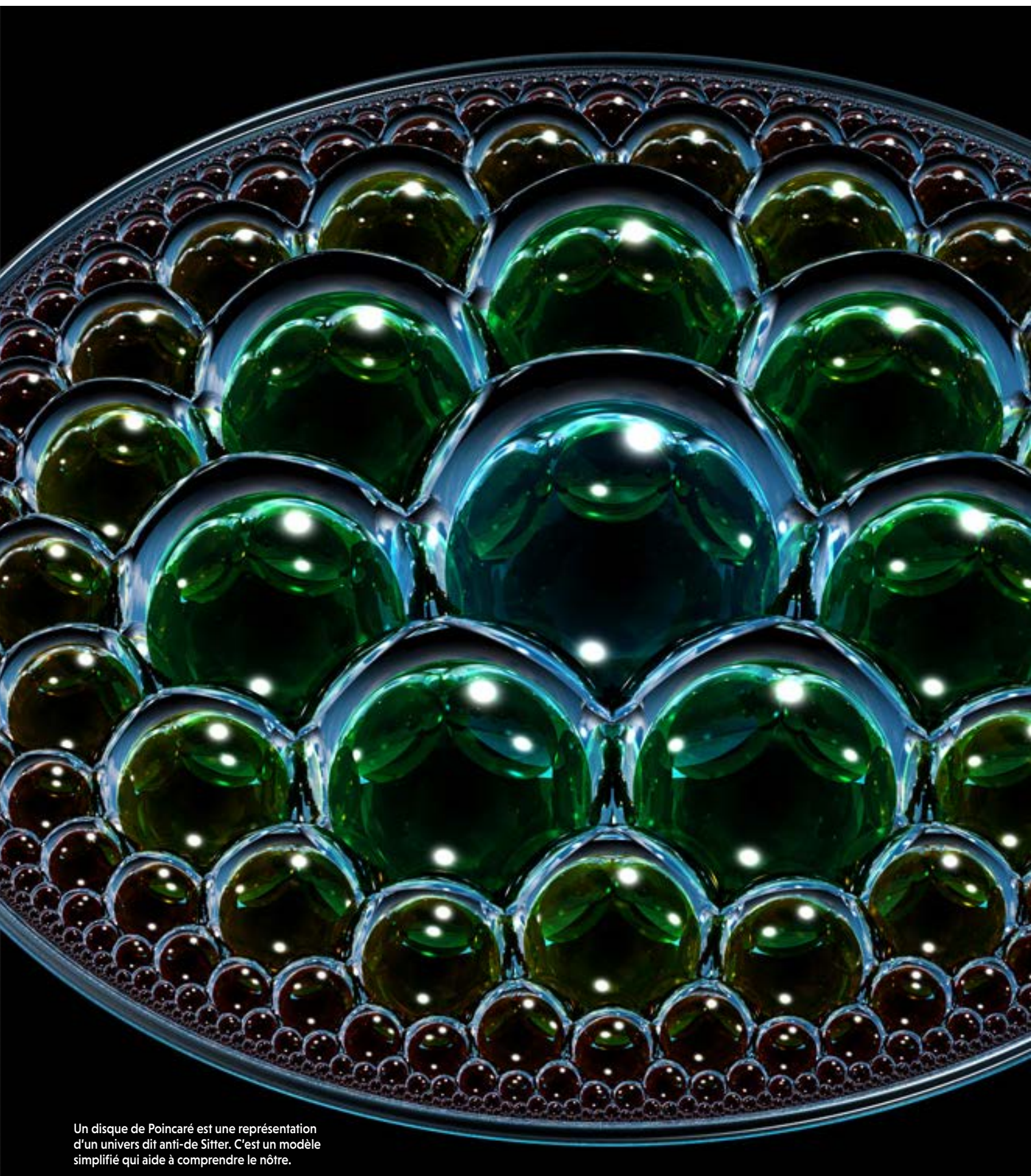
# D

Début 2009, Mark Van Raamsdonk, est bien décidé à profiter pleinement son année sabbatique. Voyages? Jardinage? Musique ? Non. Le physicien de l'université de Colombie-Britannique, à Vancouver, au Canada, s'attaque simplement à l'un des plus insondables mystères de la physique, les liens entre la physique quantique et la gravitation. Rien de moins !

L'année suivante, il soumet un article sur le fruit de ses réflexions au *Journal of High Energy Physics*. La réponse ne se fait pas attendre. Le *referee* à qui le texte a été confié écrit dans son rapport que l'auteur est... cinglé ! Mark Van Raamsdonk n'aura pas plus de succès avec une autre publication *General Relativity and Gravitation*, malgré un avis plus nuancé: l'article devait être complètement réécrit.

Nullement découragé, le physicien propose une version courte de son texte à un prestigieux concours d'essais organisé par la Gravity Research Foundation. L'article gagne le premier prix qui inclut notamment une publication dans... *General Relativity and Gravitation*. Ce fut bien le cas en juin 2010. Pourquoi tant >





Un disque de Poincaré est une représentation d'un univers dit anti-de Sitter. C'est un modèle simplifié qui aide à comprendre le nôtre.



➤ de scepticisme de la part de la communauté des physiciens ? Parce que les propositions de Mark Van Raamsdonk pour résoudre un problème sur lequel planchent les plus grands physiciens depuis un siècle sont iconoclastes : elles sont fondées sur l'intrication, le plus déroutant des phénomènes quantiques.

L'idée a néanmoins fait son chemin et de nombreux adeptes. Parmi eux, la centaine de physiciens réunis autour du projet *It from Qubit* initié en 2015 par la fondation Simons pour l'avancement de la recherche en sciences élémentaires et mathématiques. Parmi les hypothèses que ces spécialistes venus d'horizons différents explorent, l'un stipule que l'espace (ou plutôt l'espace-temps dans le contexte de la théorie de la relativité générale) serait constitué de minuscules bouts d'information. Selon cette approche, ces petits éléments, en interagissant, créent l'espace-temps et font émerger ses propriétés, telles que la courbure, dont découle la gravité.

Cette idée, si elle est correcte, expliquerait l'origine de l'espace-temps et mettrait les physiciens sur la piste de la théorie quantique de la gravitation qui se fait tant attendre. Le nom du projet *It from Qubit* résume l'hypothèse : le *it* est l'espace-temps et le *qubit* la plus petite quantité d'information (la version quantique du bit informatique).

Parcourons les idées phares et les sous-basements théoriques de ces idées qui, selon Brian Greene, théoricien des cordes à l'université Columbia, pourrait bien déboucher sur la prochaine révolution de notre compréhension de l'espace et du temps. En passant, nous croiserons l'intrication de Mark Van Raamsdonk.

## UN UNIVERS D'INFORMATION

L'idée que l'Univers serait construit à partir d'informations a été popularisée dans les années 1990 par le physicien américain John Wheeler et son expression « *It from Bit* ». Pour lui, toute la physique serait décrite au niveau le plus fondamental à partir d'information. Un quart de siècle plus tard, avec les progrès en physique quantique, le *bit* est devenu *qubit* et l'idée s'est modernisée.

L'idée selon laquelle l'espace-temps n'est pas fondamental, mais émerge de bits d'information et est « constitué » de quelque chose, marque une rupture par rapport au tableau dépeint par la relativité générale. De quoi exactement ces bits sont-ils faits et quel type d'information contiennent-ils ? Les chercheurs l'ignorent. Mais curieusement, cela ne semble pas les déranger. « Ce qui compte, ce sont les relations [entre les bits plus que les bits eux-mêmes] et la façon dont ils s'organisent », explique Brian Swingle, postdoctorant à l'université Stanford.

La clé de cette organisation pourrait justement être l'intrication quantique : une

étonnante corrélation qui peut exister entre deux particules, et grâce à laquelle des mesures réalisées sur l'une des particules ont un effet instantané sur l'autre, même quand une grande distance les sépare. Selon Vijay Balasubramanian, physicien à l'université de Pennsylvanie, l'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents d'espace-temps, quelle qu'en soit la nature.

Le raisonnement qui sous-tend cette idée est bâti sur une série de découvertes réalisées par des physiciens, notamment Shinsei Ryu, maintenant à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, et Tadashi Takayanagi, maintenant à l'université de Kyoto, au Japon. En 2006, ils ont mis en évidence une connexion entre l'intrication quantique et la géométrie de l'espace-temps.

En 2013, en s'appuyant sur ces travaux, Juan Maldacena, de l'Institut d'études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, à l'université Stanford, ont montré que si deux trous noirs étaient intriqués, ils créeraient un trou de ver, un raccourci dans l'espace-temps prédit par la relativité générale (voir *Le rêve ultime des physiciens*, par J. Maldacena, page 100). Cette idée a été surnommée ER=EPR, d'après les

**L'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents, quelle qu'en soit la nature**

noms des physiciens qui ont suggéré ces phénomènes : Albert Einstein et Nathan Rosen pour les trous de ver, Einstein, Rosen et Boris Podolsky pour l'intrication quantique.

Cette découverte, et d'autres comparables, suggère que, curieusement, l'intrication



Les membres du projet *It from Qubit* se sont réunis à l'université Stanford en mars 2017.

quantique (dont on pensait qu'elle ne faisait intervenir aucun lien physique) peut façonner l'espace-temps.

Afin de comprendre comment l'intrication pourrait donner lieu à l'espace-temps, les physiciens doivent d'abord mieux cerner le phénomène d'intrication. Il nous paraît « fantomatique », pour reprendre les mots d'Einstein, parce qu'il implique une connexion instantanée entre particules même très éloignées. Une situation qui semble défier la relativité restreinte, car elle stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière. L'intrication quantique a cependant été confirmée par de nombreuses expériences, sans pour autant violer les principes de la relativité restreinte.

Depuis peu, les physiciens considèrent diverses formes d'intrication. Dans la plus simple, plusieurs particules de même nature réparties dans l'espace sont reliées par une unique caractéristique (spin, polarisation...). Mais ce type d'intrication ne suffit pas pour reconstruire l'espace-temps. D'autres formes seraient plus pertinentes. Par exemple, on peut imaginer des intrications entre particules de natures différentes. Les chercheurs explorent aussi l'intrication d'un grand nombre de particules.

Une fois que les différents aspects de l'intrication seront mieux compris et maîtrisés, les chercheurs comprendront peut-être comment l'espace-temps émerge de ce phénomène. L'émergence est quelque chose que l'on retrouve par exemple en thermodynamique ou

en météorologie, où les mouvements microscopiques des molécules de l'air donnent naissance à la pression et à d'autres grandeurs macroscopiques.

À terme, l'objectif de tous ces travaux est d'enfin parvenir à une théorie qui décrit la gravité d'un point de vue quantique. Mais les physiciens qui se sont donné cette ambition se heurtent à un mur depuis un siècle. Les membres du projet *It from Qubit*, ainsi que Mark Van Raamsdonk misent sur l'idée du « principe holographique » pour réussir où leurs prédécesseurs ont échoué.

## HOLOGRAMMES COSMIQUES

Ce principe suggère que certaines théories physiques sont équivalentes à d'autres, plus simples, qui s'appliquent dans un univers de dimensionnalité inférieure. On retrouve cette idée avec les hologrammes. Dans cette logique, puisqu'il est si difficile de trouver une théorie satisfaisante de la gravité quantique, les physiciens tentent de trouver une théorie équivalente, plus maniable, valable dans un univers de dimensionnalité inférieure à la nôtre.

L'une des incarnations les plus réussies du principe holographique est la « correspondance AdS/CFT », sigles faisant référence à l'équivalence entre un modèle cosmologique dit univers anti-de Sitter (AdS) et un cas particulier de théorie quantique des champs, dite théorie conforme des champs (CFT pour *conformal field theory*), définie à la frontière de l'univers anti-de Sitter et dénuée de gravité. ➤

> Par cette approche, on peut décrire complètement un trou noir à partir de ce qui se passe à la frontière de l'univers. Juan Maldacena a établi cette relation à la fin des années 1990, alors qu'il travaillait dans le cadre de la théorie des cordes avec pour objectif de résoudre certains problèmes de calcul pour développer une description quantique de la gravitation.

Grâce à la correspondance AdS/CFT, les physiciens espèrent découvrir une théorie qui soit équivalente à la gravitation quantique, tout en étant beaucoup plus simple à manipuler – en laissant de côté la gravitation.

## LA GRAVITATION... SANS GRAVITATION

Comment une théorie laissant de côté la gravité pourrait-elle être légitime en tant que théorie quantique de la gravitation? La réponse viendrait peut-être de la nature fondamentale de la gravitation. La gravité et l'espace-temps pourraient n'être que le produit final, en trois dimensions, de l'intrication des qubits dans un espace n'ayant que deux dimensions.

La théorie de l'information quantique pourrait aussi contribuer à ce projet grâce à un outil de cette discipline: les codes quantiques correcteurs d'erreurs. Les chercheurs en informatique quantique ont conçu ces codes pour aider à protéger l'information d'éventuelles pertes en cas d'interférences avec les intrications des qubits. Les ordinateurs quantiques, au lieu de coder l'information avec des bits

uniques, utilisent des états hautement intriqués de multiples qubits. Le système reste ainsi robuste: une erreur unique ne peut pas affecter l'exactitude d'un élément d'information donné. Mais de façon surprenante, ces codes correcteurs pourraient jouer un rôle dans la correspondance AdS/CFT.

En effet, les mathématiques impliquées dans ces codes se retrouvent aussi dans cette dernière. Il semble que l'arrangement utilisé par les chercheurs pour intriquer de multiples bits et former des réseaux exempts d'erreurs soit aussi en jeu dans, par exemple, le codage de l'information de l'intérieur du trou noir que l'on retrouve à sa surface à travers l'intrication.

Même si les physiciens parviennent à comprendre comment fonctionne la correspondance AdS/CFT, et par là à concevoir une théorie de dimensionnalité inférieure qui se substitue à la gravité quantique, ils ne seront toutefois pas encore au bout de leurs peines. La correspondance elle-même ne fonctionne que dans une version simplifiée de l'Univers.

En particulier, toutes les lois de la gravitation qui s'appliquent à notre Univers n'interviennent pas dans le monde épuré de la correspondance AdS/CFT. Elle est dotée d'une sorte de gravitation, mais ce n'est pas la théorie de la gravitation dans un univers en expansion comme celui où nous vivons. L'univers anti-de Sitter ne contient pas de matière, juste une constante cosmologique de valeur négative. Et, décrit d'une certaine façon, il est stable: ni en

## BIBLIOGRAPHIE

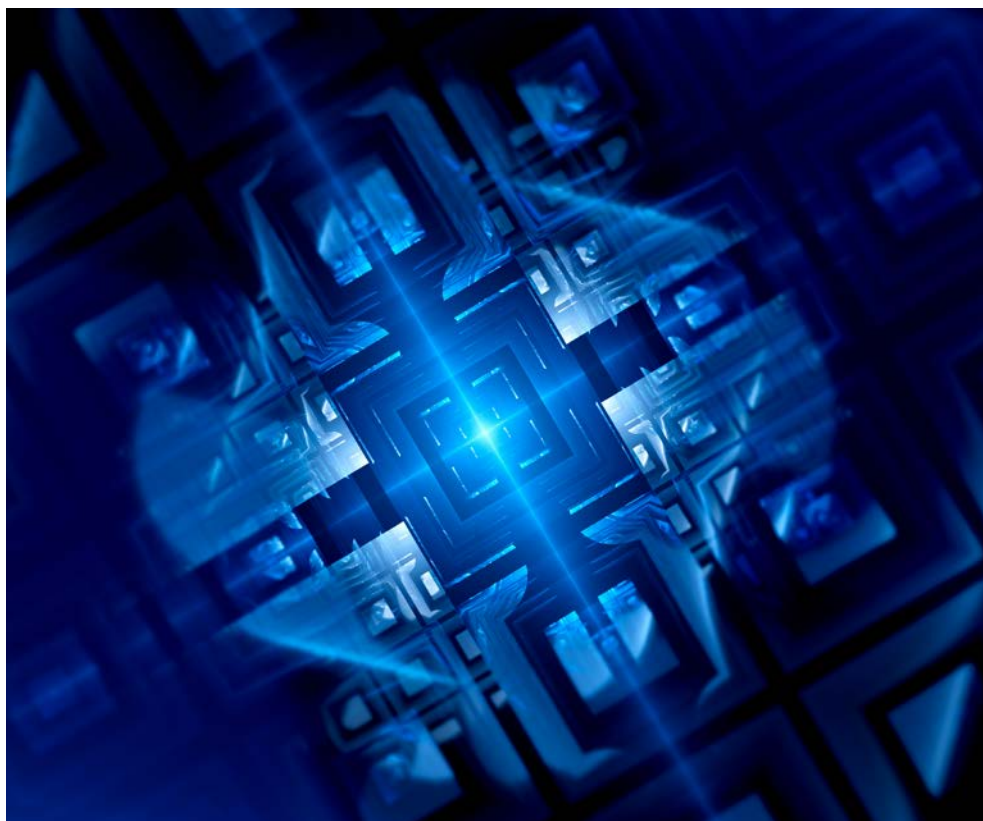
T. FAULKNER ET AL., Nonlinear gravity from entanglement in conformal field theories, *JHEP*, vol. 1708, 057, 2017.

P. BINÉTRUY, Au-delà de la relativité générale: «une théorie quantique de la gravitation est nécessaire», *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

M. VAN RAAMSDONK, Building up spacetime with quantum entanglement, *Gen. Rel. Grav.*, vol. 42, pp. 2323-2329, 2010.

J. MALDACENA, The large-N limit of superconformal field theories and supergravity, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 38(4), pp. 1113-1133, 1999.

Le projet *It from Qubit*: [http://bit.ly/PLS475\\_IHQ](http://bit.ly/PLS475_IHQ)



Les ordinateurs quantiques utilisent des codes correcteurs d'erreur mathématiquement comparables à la correspondance AdS/CFT qui lie deux types de modèles cosmologiques.



expansion ni en contraction (voir l'encadré ci-contre). Si notre Univers contient aussi une constante cosmologique, elle doit être légèrement positive pour s'accorder aux observations sur l'expansion accélérée du cosmos. Malgré ces limites, ce modèle fournit aux physiciens un terrain de jeu théorique utile pour tester leurs idées, et appréhender plus simplement la gravitation quantique.

Si le projet *It from Qubit* repose sur des fondements irréalistes, font remarquer certains sceptiques, peut-il vraiment produire des résultats valables? Pourquoi se concentrer sur ce modèle simplifié? Tout cela dépend de la validité du modèle simplifié et de l'idée que, *in fine*, il est une version approchée, mais satisfaisante, de notre Univers. Les participants du projet *It from Qubit* font le pari qu'en partant d'un tableau simplifié plus facile à manipuler, ils pourront à terme y greffer la complexité nécessaire pour appliquer la théorie au monde réel. Malgré ces réserves, les physiciens affirment que l'approche vaut la peine d'être tentée.

## UNE NOUVELLE RÉVOLUTION ?

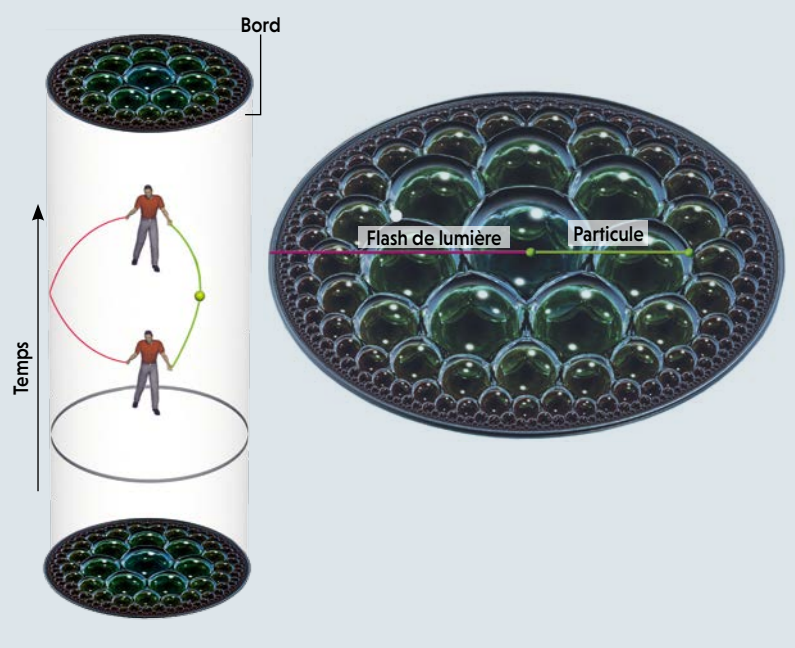
De plus, même si le projet n'aboutit pas au développement d'une théorie quantique de la gravitation, il aura vraisemblablement des retombées fructueuses. L'application de techniques et d'idées inspirées de la théorie des cordes et de la relativité générale à des questions d'information quantique aidera, par exemple, à mieux définir les différents types d'intrication quantique, à la fois pour comprendre l'espace-temps et pour construire des ordinateurs quantiques.

Dorit Aharonov, spécialiste en informatique quantique à l'université hébraïque de Jérusalem et participante au projet *It from Qubit* pensent que les physiciens sont en train de progresser sur des questions posées depuis de nombreuses années. Par exemple, des chercheurs ont trouvé qu'il serait possible de mesurer le temps à l'intérieur d'un trou de ver en le représentant comme un circuit quantique, que l'utilisation de la théorie des cordes et de l'intrication permet de définir certaines phases de la matière condensée, etc.

En outre, combiner information quantique et théorie des cordes aiderait aussi à évaluer les théories que les chercheurs proposeront. On peut se représenter n'importe quelle théorie physique comme un ordinateur, ses entrées et ses sorties étant l'équivalent d'un état initial et d'un état ultérieur, mesurable, décrits par la théorie. Lorsque les chercheurs proposeront une théorie candidate pour la gravitation quantique, ils pourront la tester avec cette analogie et se demander quelle est la puissance de calcul de la théorie. «Si cette puissance est trop grande, si notre

## UN UNIVERS HYPERBOLIQUE

Un univers anti-de Sitter est un monde dont l'espace-temps est à courbure négative, ou hyperbolique. Dans le cas de deux dimensions d'espace, on peut le représenter par un disque de Poincaré (à droite). En y ajoutant le temps (axe vertical, à gauche), on obtient un cylindre plein dont chaque section est un espace hyperbolique. Cet univers possède une certaine forme de gravitation. Une particule lancée du centre y retourne en un temps fini. Un rayon de lumière ira jusqu'au bord de l'espace avant de revenir dans le même temps. La description de cet univers est équivalente à une théorie des champs dite conforme définie sur l'enveloppe du cylindre. Elle comporte une dimension spatiale de moins et est dénuée de gravitation, ce qui facilite les calculs.



modèle de gravitation quantique était capable de calculer des choses dont nous pensons qu'elles ne peuvent pas être calculées dans notre monde, cette théorie susciterait un doute», explique Dorit Aharonov. «C'est un moyen de dire, par une approche différente, si la théorie tient la route ou non.»

Le projet *It from Qubit* rappelle à certains physiciens une autre époque grisante où de grandes idées voyaient le jour. Ainsi, Hiroshi Ooguri, physicien à l'Institut de technologie de Californie fait le parallèle entre l'actuelle explosion d'intérêt autour de ces idées et la révolution de la première théorie des cordes, au début des années 1980. Pour lui, c'est clairement une époque passionnante, notamment pour les jeunes chercheurs. Mark Van Raamsdonk ne dira pas le contraire, lui qui a publié près de vingt-cinq articles sur le sujet depuis ses premières péripéties. Aucun n'a été refusé ! ■



# LE RÊVE ULTIME des physiciens

Comprendre les débuts de l'Univers suppose de réconcilier la relativité générale et la physique quantique. Ce serait le cas avec une nouvelle théorie selon laquelle l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver les reliant.

Deux trous noirs (*en haut et en bas*) pourraient être reliés par un trou de ver (*au centre*), d'après les équations de la relativité générale. De tels trous de ver et l'intrication quantique seraient deux aspects d'un même phénomène.



### L'ESSENTIEL

- La physique quantique permet l'intrication d'objets éloignés, les mesures réalisées sur l'un affectant celles sur l'autre, même s'il n'y a pas de lien physique entre eux.
- Les équations de la relativité générale, qui décrivent la géométrie de l'espace-temps, autorisent l'existence de trous

de ver, des raccourcis entre des régions éloignées.

- Les deux phénomènes pourraient être équivalents. Cette équivalence fournirait une piste pour élaborer une description quantique de l'espace-temps, indispensable pour comprendre les premiers instants de l'Univers.

### L'AUTEUR



JUAN MALDACENA est physicien théoricien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis.

# À

À gauche, la mécanique quantique, invaincue dans la description des interactions subatomiques. À droite, la relativité générale, imbatte à rendre compte de la dynamique de l'espace-temps et de la gravitation. Ces deux théories physiques, solidement établies et

validées, chacune de leur côté, par d'innombrables expériences, sont les piliers de la physique moderne. Cependant, elles souffrent d'un grave problème: elles sont incompatibles (voir l'avant-propos, par É. Klein, page 10)...

C'est bien dommage, car elles devraient l'être notamment pour expliquer et décrire ce qui se passe dans certaines conditions, à commencer par l'Univers primordial et les trous noirs. En d'autres termes, une théorie quantique de la gravitation est nécessaire pour explorer les instants les plus reculés de l'histoire de l'Univers et l'intérieur des trous noirs. Peut-on réconcilier les deux édifices intellectuels de la physique?

Oui, en passant par deux des plus étranges notions que chacun d'eux porte, l'intrication quantique et les trous de ver. La première est un phénomène purement quantique, dans lequel deux objets, en général des particules



➤ subatomiques, ont des propriétés directement corrélées même si de grandes distances les séparent et qu'aucun lien physique ne semble exister entre eux. Quant aux trous de ver, prédits par la théorie de la relativité générale, ce sont des raccourcis qui connecteraient des régions éloignées de l'espace-temps, par exemple deux trous noirs distants.

J'ai récemment proposé, avec d'autres, que ces deux concepts *a priori* irréconciliables sont peut-être liés. À partir de calculs portant sur des trous noirs, nous nous sommes rendu compte que l'intrication de la physique quantique et les trous de ver de la relativité générale pourraient constituer deux facettes d'un même phénomène. Plus encore, cette similitude s'étendrait à des situations qui ne se limitent pas aux trous noirs.

Si elle se confirme, cette idée aura des conséquences profondes sur notre compréhension de l'Univers. En effet, elle suggère par exemple que l'espace-temps lui-même émergerait de l'intrication de constituants microscopiques plus fondamentaux. Elle laisse aussi penser que la relation entre objets intriqués (et qui ont longtemps été considérés comme n'ayant pas de lien physique entre eux) serait moins « magique » qu'il n'y paraît.

Une compréhension fine de cette relation entre intrication et trous de ver ouvrira peut-être une piste pour unifier la physique quantique et la relativité générale, un préalable pour développer une théorie quantique de la gravitation.

## LE MAÎTRE DES NOTIONS

Étonnamment, les notions d'intrication quantique et de trous de ver ont toutes deux été émises par Albert Einstein et ses collaborateurs dans des articles écrits en 1935. Ces textes traitent de phénomènes très différents, et Einstein n'a probablement jamais imaginé qu'il pourrait y avoir entre eux un rapport. Et ce d'autant plus que, pour le physicien, l'intrication quantique trahissait des problèmes fondamentaux au cœur de la théorie quantique. L'ironie est grande: ce phénomène pourrait aujourd'hui ouvrir une voie pour concilier la théorie de la relativité générale, développée par Einstein en 1915, et la physique quantique.

Pour comprendre les liens entre intrication quantique et trous de ver, penchons-nous d'abord sur certaines propriétés des trous noirs. Ces objets sont décrits dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Celle-ci montre comment, d'une part, la matière et l'énergie déforment l'espace-temps et, d'autre part, la force gravitationnelle est une manifestation de la courbure de ce dernier.

Dans la plupart des situations, la courbure de l'espace-temps est très faible. Mais elle devient extrême dans les trous noirs. On distingue alors deux régions: l'intérieur du trou noir, d'où même des objets se déplaçant à la vitesse de la lumière

dans le vide ne peuvent s'échapper, et son extérieur, où l'espace-temps est courbé mais d'où les objets et l'information peuvent encore s'échapper. La frontière séparant ces deux régions est l'« horizon des événements ». D'après la relativité générale, cet horizon n'est qu'une surface immatérielle: un astronaute qui le traverserait ne res-

**Les notions  
d'intrication  
quantique et de  
trous de ver ont  
toutes deux été  
émises par Albert  
Einstein et ses  
collaborateurs  
dans des articles  
écrits en 1935**

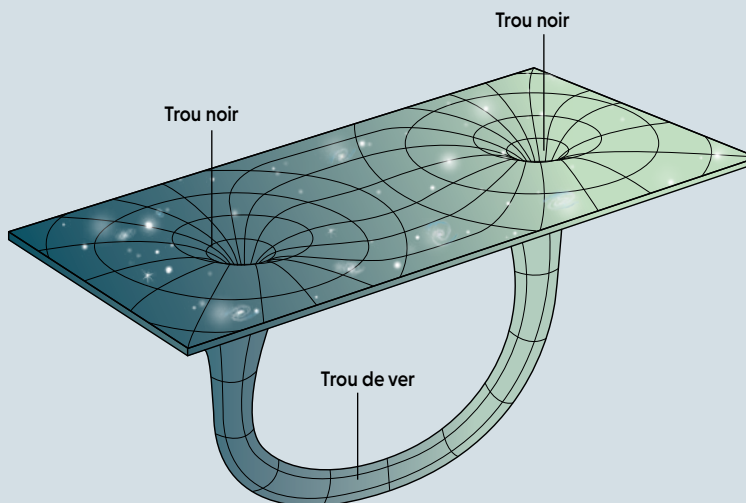
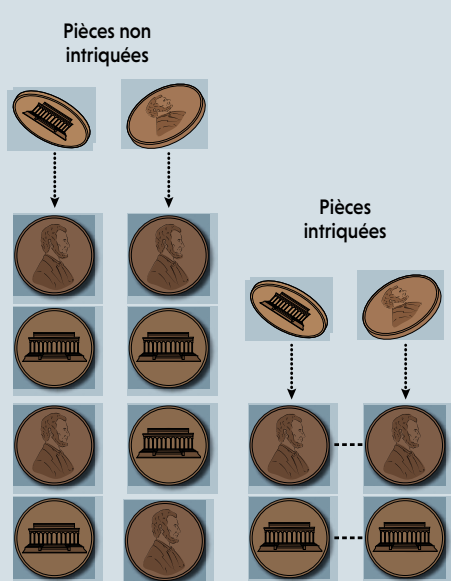
sentirait rien de particulier, mais serait alors condamné à atteindre la région du trou noir où la courbure devient infinie selon la physique non quantique, la singularité interne.

En 1916, soit un an seulement après l'introduction de la relativité générale par Einstein, le physicien allemand Karl Schwarzschild trouva la solution la plus simple des équations d'Einstein décrivant ce qu'on nommera plus tard un trou noir. Cependant, la géométrie de l'espace-temps correspondant à la solution de Schwarzschild – et à la plupart des autres solutions aux équations d'Einstein – était difficile à interpréter jusque dans ses plus subtiles conséquences en raison des limites des mathématiques de l'époque.

En 1935, Einstein et Nathan Rosen, alors à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, découvraient la possibilité des trous de ver, on parle aussi de ponts d'Einstein-Rosen, ou ER. Les deux physiciens n'en saisissaient pas toute la géométrie. Il fallut attendre les années 1960 pour que les chercheurs commencent à comprendre le sens de la solution de Schwarzschild et comment un trou de ver relie en quelque sorte deux trous noirs. Vus de l'extérieur, les deux astres se présentent comme des entités ➤

## QUAND L'INTRICATION QUANTIQUE RENCONTRE LES TROUS DE VER

L'intrication est un concept de la physique quantique qui décrit un type particulier de corrélations entre les propriétés de deux objets, quelle que soit la distance qui les sépare. Les trous de ver, prédits par la relativité générale, sont des ponts spatio-temporels pouvant relier des régions éloignées, dans certains cas deux trous noirs. Certains physiciens émettent l'hypothèse que ces deux phénomènes, apparemment sans rapport, sont fondamentalement liés.

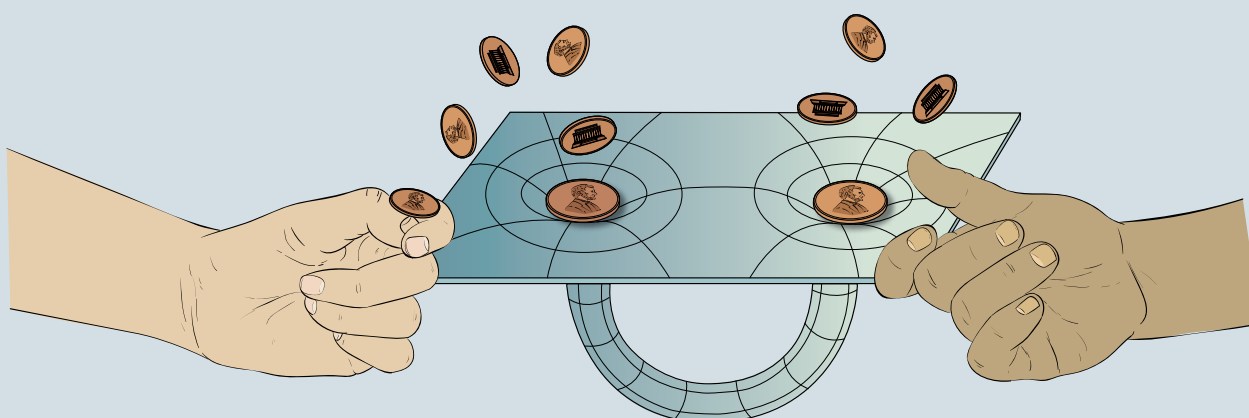


### TROUS DE VER

Les équations de la relativité générale suggèrent qu'un trou de ver peut connecter deux trous noirs, même très distants l'un de l'autre, pour créer un pont dans l'espace-temps. À un observateur extérieur, les trous noirs donneraient l'impression de constituer des entités séparées, mais ils seraient reliés par un intérieur partagé. Cependant, aucune personne ni signal ne pourraient voyager à travers.

### INTRICATION QUANTIQUE

Quand on lance deux pièces quelconques, le résultat du tirage de l'une n'influe pas sur celui de l'autre – n'importe laquelle des quatre combinaisons se produira (à gauche). Mais si les deux pièces sont intriquées, alors le résultat du lancer de la première détermine celui du lancer de la seconde. Si la première tombe sur pile, par exemple, la seconde tombera également sur pile, et si la première donne face, la seconde donnera face aussi (à droite).



### UN SEUL ET MÊME PHÉNOMÈNE?

Si deux trous noirs venaient à être intriqués, tous les éléments microscopiques à l'intérieur du premier trou noir seraient corrélés avec ceux du second. Dans cette situation, il semble que les trous noirs formeraient un espace-temps qui présente un trou de ver reliant les intérieurs des deux astres. Cette découverte suggère que l'intrication et les trous de ver seraient des phénomènes équivalents.

> distinctes situées dans des régions différentes de l'espace-temps, mais, d'après les équations, les trous noirs partagent le même intérieur.

Le trou de ver de la solution de Schwarzschild diffère *a priori* des trous noirs qui se forment dans le cosmos suite à l'effondrement d'étoiles massives en cela qu'il ne contient pas de matière, mais uniquement de l'espace-temps courbe. La plupart des chercheurs considèrent la solution de Schwarzschild présentant deux extérieurs comme une curiosité mathématique sans pertinence pour le monde réel. Les physiciens théoriciens se sont néanmoins interrogés sur son interprétation physique.

En 1962, les physiciens américains John Wheeler et Robert Fuller ont montré que le trou de ver reliant les extérieurs des deux trous noirs est instable. Il s'allonge et s'affine à mesure que le temps passe, comme de la pâte à pain que l'on étirerait. Les horizons des trous noirs finissent alors par se séparer. En fait, ils s'écartent tellement vite qu'il est impossible d'utiliser un trou de ver de ce type pour voyager d'un extérieur à l'autre. Le pont s'écroule avant que nous puissions le traverser.

### INTRIGUANTE INTRICATION

L'article de 1935 discutant de l'autre phénomène qui nous intéresse, l'intrication quantique, a été écrit par Einstein, Rosen et Boris Podolsky (aussi à l'Institut d'études avancées). Le trio est souvent désigné par ses initiales, EPR. Dans cet article, les trois physiciens tentaient de mettre au jour un problème de la théorie quantique en exposant un phénomène qui semblait violer le principe relativiste selon lequel aucune particule ou information ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière. Or dans le phénomène présenté par le trio EPR et qu'on nommera plus tard intrication, deux objets physiques présentent bien d'étranges corrélations, même s'ils sont distants au point qu'aucun signal physique n'a le temps de se propager de l'un à l'autre au cours de la durée qui sépare les mesures effectuées sur chacun d'entre eux.

Voyons un exemple. Prenons les corrélations portant sur la polarisation des photons qui, lorsqu'on la mesure, est soit «horizontale», soit «verticale». De façon générale, l'état de polarisation d'un photon est, sur le plan mathématique, une combinaison linéaire (une somme pondérée) de ces deux états observables de base. Mais quand on mesure la polarisation, cette superposition d'états disparaît: l'orientation mesurée est soit verticale, avec une certaine probabilité (qui dépend de l'état initial), soit horizontale, avec la probabilité complémentaire.

Aujourd'hui, on sait préparer une paire de photons A et B dans un état quantique, dit intriqué, où la polarisation mesurée pour l'un des photons, que le résultat soit «verticale» ou «horizontale», est toujours orthogonale à celle

mesurée pour l'autre photon. Le système global a ici un état bien défini (on sait qu'il contient deux photons de polarisation orthogonale), mais on ne peut rien dire sur ceux des particules individuelles avant d'effectuer la mesure.

Une expérience consisterait à produire des paires de photons intriqués A et B qui partent dans des directions opposées et s'éloignent. Supposons qu'à un instant donné, on mesure la polarisation de A; si le résultat est «verticale», une mesure de la polarisation de B donnera à coup sûr «horizontale», même si aucun signal physique n'a pu aller d'un photon à l'autre dans le laps de temps qui sépare les deux mesures. Ainsi, les deux particules semblent communiquer au moment de la mesure pour s'accorder instantanément sur leurs polarisations respectives, en violation des lois de la relativité. C'est le paradoxe EPR.

Pour le résoudre, Einstein, Podolsky et Rosen suggéraient que la formulation de la théorie quantique était incomplète et qu'il existait des variables cachées donnant cette impression de communication sans lien physique entre les deux photons. Le physicien danois Niels Bohr a répondu à cette critique en soulignant que le paradoxe apparent réside dans l'attachement d'Einstein au principe de localité. Selon Bohr, l'intrication est un phénomène non local: les deux particules forment un

**Le trou noir au centre de la Voie lactée est visible de façon indirecte grâce au rayonnement émis par la matière qui s'échauffe en tombant dedans (en bleu), et observé par le télescope Chandra. Est-il relié à une autre région de l'Univers par un trou de ver?**





système lié indépendamment de la distance qui semble séparer ses entités.

Le défi était donc de vérifier qui, d'Einstein ou de Bohr, avait raison. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a obtenu un système d'inégalités portant sur les corrélations entre les particules et que l'on pouvait tester expérimentalement: si ces inégalités sont satisfaites, c'est qu'il existe des variables cachées; à l'inverse, si elles sont violées, c'est que l'intrication quantique est bien un phénomène non local.

## L'intrication quantique crée une connexion géométrique entre deux trous noirs

Une telle expérience a été difficile à mettre en place, mais en 1980, Alain Aspect et ses collègues, en France, ont réussi à montrer de façon convaincante que les inégalités de Bell sont violées. Et d'autres expériences ont suivi afin de vérifier de façon toujours plus rigoureuse la nature non locale de l'intrication quantique (voir la figure page 107).

Nous avons décrit dans les grandes lignes les trous de ver et l'intrication quantique, mais comment relier ces deux phénomènes si différents? Une réponse est venue de l'étude détaillée des trous noirs. En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement similaire à celui d'un objet chaud.

Le physicien britannique s'est intéressé à un phénomène quantique qui se déroule en permanence. L'espace sans matière est loin d'être vide: des paires particule-antiparticule y naissent spontanément, et disparaissent tout aussi vite en s'annihilant. Stephen Hawking a considéré des paires qui se forment juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir. Il peut arriver qu'une des particules d'une paire tombe dans le trou noir et que l'autre s'échappe loin de l'astre. Pour un observateur distant, le trou noir semble alors rayonner à la façon d'un corps chaud, si bien que ce phénomène implique aussi que le trou noir a une température.

Or depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, les physiciens ont compris que la température d'un système résulte des mouvements erratiques de ses constituants microscopiques. Dans un gaz, par exemple, la température est liée à l'agitation des molécules. Par conséquent, si les trous noirs ont une température, on peut s'attendre à ce qu'ils renferment eux aussi des constituants microscopiques collectivement capables d'adopter différentes configurations, que l'on nomme microétats, dont certaines correspondraient au même état macroscopique du trou noir.

Les travaux de Stephen Hawking ont conduit les physiciens à considérer que, au moins vus de l'extérieur, les trous noirs devraient se comporter comme des systèmes quantiques. Ils devraient donc être soumis à toutes les lois quantiques. Pour résumer, quand nous regardons un trou noir macroscopique de l'extérieur, nous devrions observer un système qui a de nombreux microétats possibles, chacun ayant la même probabilité d'être réalisé.

### TROUS NOIRS CONNECTÉS

Puisque, vus de l'extérieur, les trous noirs ressemblent à des systèmes quantiques ordinaires, rien ne nous empêche de considérer deux trous noirs intriqués et très éloignés l'un de l'autre. Chacun a un grand nombre de microétats quantiques possibles. Et l'on peut imaginer une intrication telle que chaque microétat quantique du premier trou noir est corrélé avec le microétat correspondant du second. En particulier, si l'on mesure un certain état pour le premier trou noir, l'autre trou noir devra être exactement dans le même état.

L'histoire devient alors fascinante. En s'appuyant sur certaines considérations inspirées de la théorie des cordes (voir *L'Univers ressuscité*, par G. Veneziano, page 84), nous avons suggéré qu'une paire de trous noirs aux microétats ainsi intriqués (ce qu'on pourrait nommer un état d'intrication EPR) produirait un espace-temps dans lequel un trou de ver (un pont ER) relierait l'intérieur des deux trous noirs. En d'autres termes, l'intrication quantique crée une connexion géométrique entre les deux trous noirs. C'est étonnant, car on pensait que l'intrication implique des corrélations sans liens physiques; or ici, les deux trous noirs distants sont physiquement connectés par leur intérieur grâce au trou de ver.

Leonard Susskind, de l'université Stanford, et moi avons noté «ER = EPR» cette équivalence des trous de ver et de l'intrication. Du point de vue d'EPR, les observations près de l'horizon de chaque trou noir sont corrélées parce que les trous noirs sont dans un état quantique intriqué. Et dans la perspective ER, les observations sont corrélées parce que les deux systèmes sont liés par le trou de ver. >

► Notre idée s'appuie sur de nombreux travaux. Citons notamment un article publié en 1976 par Werner Israel, alors à l'université de l'Alberta, au Canada, sur la thermodynamique des trous noirs. En 2006, Shinsei Ryu et Tadashi Takayanagi, à l'université de Californie à Santa Barbara, ont étudié la relation entre l'intrication et la géométrie de l'espace-temps. Mais c'est surtout un article récent d'Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski et James Sully, tous alors à l'université de Californie, à Santa Barbara, qui nous a incités à regarder de plus près le lien entre intrication quantique et trous de ver. Ces chercheurs ont réexaminé ce que nous savions des trous noirs. Et ils ont mis au jour un paradoxe.

### LES TROUS NOIRS BRÛLENT-ILS ?

Une question majeure concernant les trous noirs est celle de la perte d'information. En effet, toute information qui traverse l'horizon des événements d'un trou noir ne peut en ressortir. *A priori*, cette information ne serait pas réellement perdue, mais juste hors de portée, pour nous autres à l'extérieur du trou noir. Mais avec les travaux de Stephen Hawking, le sort de l'information est devenu moins trivial. Pour un observateur distant, un trou noir qui rayonne perd de la masse. Il s'évapore jusqu'à disparaître complètement. Que devient l'information (que le rayonnement de Hawking ne peut transporter, en raison de sa nature aléatoire) ? Les physiciens en débattent encore car,

en physique quantique, un principe fondamental impose la conservation de l'information.

Les trous noirs violent-ils ce principe ? Pas nécessairement. En 1997, j'ai apporté un élément de réponse en développant le principe holographique. Ce modèle établit une équivalence mathématique entre un univers tridimensionnel régi par la gravitation (qui peut donc contenir des trous noirs) et un univers bidimensionnel dépourvu de gravitation, qui borde l'espace tridimensionnel. Ainsi, la description de l'évolution d'un trou noir en trois dimensions, où le problème de la conservation de l'information se pose, peut être réalisée à l'aide de champs vivants dans un espace à deux dimensions, où le problème ne se pose pas car, sans gravitation, il n'y a pas de trous noirs ! En conséquence, puisque l'information est préservée dans l'univers 2D, elle l'est nécessairement dans l'univers 3D.

Cependant, cela n'explique pas ce que devient l'information. Dans les années 1990, Leonard Susskind a montré que le rayonnement de Hawking peut porter l'information s'il constitue un système de particules intriquées entre elles. Mais un nouveau problème surgissait : chaque particule du rayonnement de Hawking est *a priori* corrélée à son partenaire tombé dans le trou noir. Or, d'après un principe nommé monogamie de l'intrication, une particule ne peut être simultanément intriquée avec deux systèmes différents (ici, le partenaire tombé dans le trou noir et l'ensemble du rayonnement de Hawking émis par le trou noir).

## ROMÉO ET JULIETTE, GÉNIES DE LA PHYSIQUE

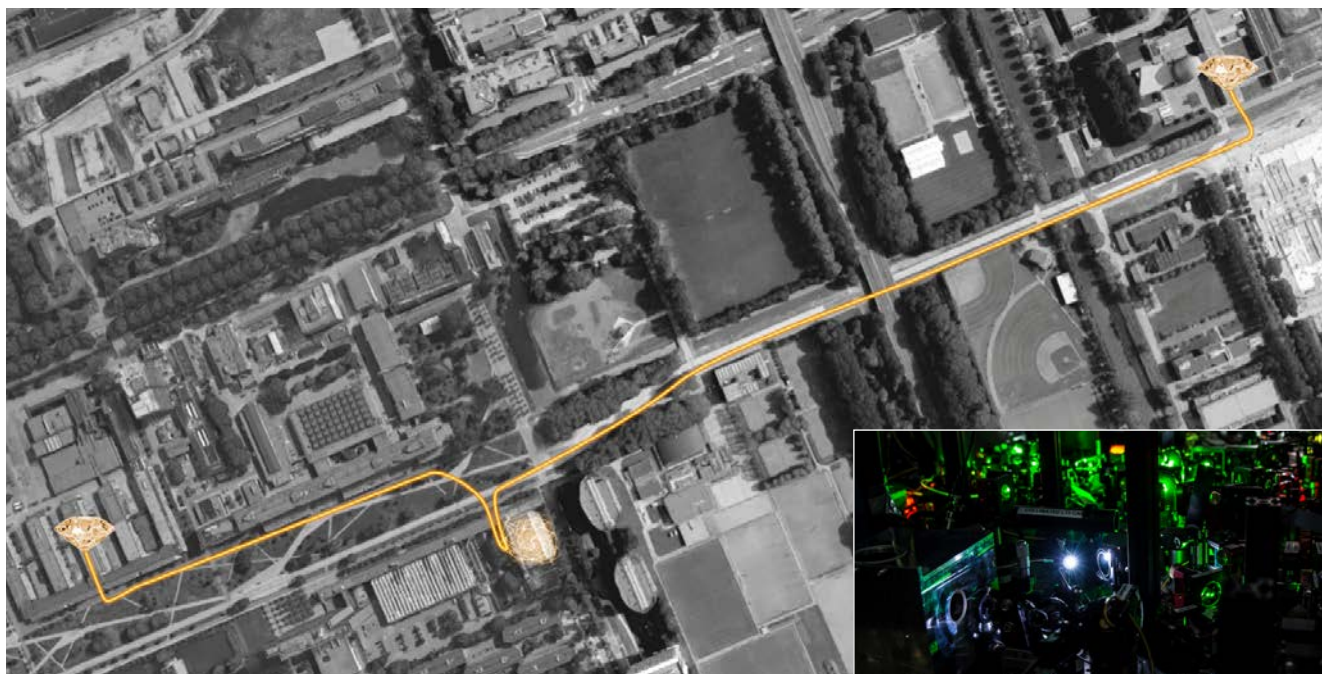
Les trous de ver à la Einstein-Rosen, décrits dans l'article, diffèrent en partie de ceux que l'on rencontre parfois dans la science-fiction, comme dans le film *Interstellar*, de Christopher Nolan, car ils ne sont pas « traversables ». S'ils ne sont pas qu'une curiosité mathématique, on pourrait néanmoins les inclure dans le scénario d'une œuvre de science-fiction de la façon suivante : pour séparer Roméo et Juliette, les familles des deux amants les envoient dans deux galaxies éloignées, en leur interdisant de voyager. Mais les tourtereaux, très doués en physique, réussissent à se construire un trou de ver. De l'extérieur, le trou de ver semble n'être qu'une paire de trous noirs, l'un dans la galaxie de Roméo, l'autre dans celle de Juliette. Les amants se jettent alors à l'intérieur de leur trou noir respectif. Aux yeux de leurs familles, ils se sont simplement suicidés et on n'a jamais plus entendu parler d'eux. Mais la géométrie du trou

de ver est telle que Roméo et Juliette se sont en réalité retrouvés dans l'intérieur partagé, à l'insu du monde extérieur ! Et ils y vivent heureux ensemble pendant un petit moment, avant que le pont ne s'écroule, détruisant l'intérieur et les tuant tous les deux.

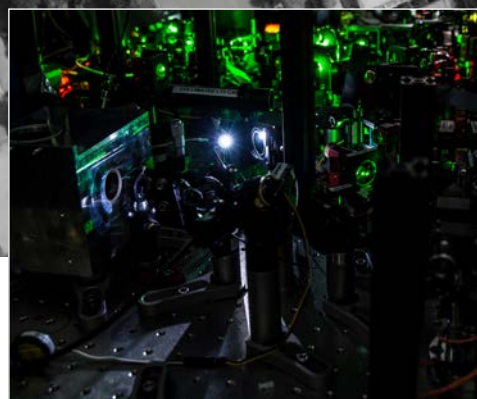
Roméo et Juliette peuvent-ils créer le trou de ver destiné à les réunir ? Oui. D'abord, ils doivent produire de nombreuses paires de particules intriquées, Roméo possédant un membre de chaque paire intriquée et Juliette l'autre. Il leur faut ensuite construire des ordinateurs quantiques très complexes qui manipuleront leurs particules quantiques respectives et les combineront de façon contrôlée pour créer une paire de trous noirs intriqués. Un tel exploit serait extrêmement difficile à réaliser en pratique. En effet, à la moindre interaction, les particules perdent leurs propriétés d'intrication. Mais l'opération n'est pas interdite par

les lois de la physique. Et n'avons-nous pas dit que Roméo et Juliette étaient très intelligents ?





L'intrication quantique et sa nature non locale sont testées avec des dispositifs de plus en plus complexes afin d'éliminer toute faille possible dans l'interprétation. En 2015, l'équipe de Ronald Hanson, de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a réalisé l'une des expériences les plus abouties, à l'aide de deux dispositifs (l'un est montré à droite) distants de 1,3 kilomètre (entre les deux diamants).



## BIBLIOGRAPHIE

L. SUSSKIND, ER = EPR, GHZ, and the consistency of quantum measurements, *Fortschritte der Physik*, vol. 64(1), pp. 72-83, 2016.

B. HENSEN ET AL., Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

J. POLCHINSKI, L'horizon des trous noirs brûle-t-il?, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

R. COWEN, The quantum source of space-time, *Nature*, vol. 527, pp. 290-293, 2015.

J. MALDACENA ET L. SUSSKIND, Cool horizons for entangled black holes, *Fortschritte der Physik*, vol. 61(9), pp. 781-811, 2013.

Pour résoudre cette difficulté, Joe Polchinski et ses collègues ont alors proposé que les intrications des paires étaient rompues au niveau de l'horizon des événements du trou noir. Mais ce phénomène devrait s'accompagner d'une libération d'énergie qui, à l'échelle de l'astre, devient importante au voisinage de l'horizon, ce que les physiciens ont nommé le *firewall* («mur de feu»). Cette solution a un inconvénient majeur : l'horizon ne serait plus, comme en relativité générale, une frontière virtuelle où rien de particulier ne se passe. Mais l'idée ER = EPR, qui stipule que l'intérieur du trou noir fait partie d'un trou de ver reliant l'astre à un autre système, atténue certains aspects de ce paradoxe.

Bien que nous ayons identifié une connexion entre les trous de ver et les états intriqués en considérant des trous noirs, il est tentant de spéculer que le lien est plus général : qu'à chaque fois que nous avons une intrication, nous avons une sorte de connexion géométrique. Il en serait ainsi même dans le cas le plus simple, quand nous n'avons que deux particules intriquées.

## UN PRINCIPE UNIVERSEL ?

Pour en revenir au paradoxe du *firewall*, du fait de l'intrication des paires de particules, l'une s'échappant et l'autre tombant dans le trou noir, un trou de ver devrait les relier et, de fait, les espaces à l'intérieur et à l'extérieur seraient connectés. Pour se faire une image de la situation,

le trou noir ressemblerait à une pieuvre géante dont les tentacules (les trous de ver) seraient reliés aux particules du rayonnement de Hawking.

Si l'équivalence entre les trous de ver et l'intrication quantique se généralise, la connexion spatiale pourrait impliquer de minuscules structures quantiques qui ne suivraient pas notre vision habituelle de la géométrie. Nous ne savons toujours pas décrire ces géométries microscopiques, mais l'intrication de ces structures pourrait, d'une manière ou d'une autre, donner naissance à l'espace-temps lui-même. C'est comme si l'intrication pouvait être considérée comme un fil reliant deux systèmes. Quand la quantité d'intrication augmente, nous avons beaucoup de fils, et ensemble ces fils pourraient tisser la trame de l'espace-temps. Dans cette représentation, les équations de la relativité d'Einstein régissent les connexions et les reconnexions de ces fils, tandis que la physique quantique serait l'essence de la construction de l'espace-temps.

Pour le moment, ce tableau relève encore d'une spéculation débridée, mais plusieurs indices pointent vers lui, et de nombreux physiciens se penchent sur ses implications. L'hypothèse de l'équivalence entre intrication et trous de ver fournit une piste pour développer une description quantique de l'espace-temps – ainsi qu'une unification très attendue, et jusqu'à présent insaisissable, de la relativité générale et de la physique quantique. ■





**Petite excursion dans le cosmos**  
NEIL DEGRASSE TYSON

BELIN, 2017  
(160 PAGES, 14,90 EUROS)

**L'**auteur, astrophysicien et chercheur associé au Muséum américain d'histoire naturelle, dirige le planétarium Hayden de New York. Avec verve et humour, il nous embarque pour une petite excursion pour tout comprendre du cosmos et répond aux questions essentielles. Quelle est l'histoire de l'Univers? Quelles lois physiques et forces gouvernent la matière? Que sait-on sur la matière noire et l'énergie sombre? D'où viennent les éléments qui nous constituent? Il rend accessible les principes les plus compliqués de l'astrophysique.



**Discours sur l'origine de l'Univers**  
ÉTIENNE KLEIN

FLAMMARION, 2010  
(192 PAGES, 17,30 EUROS)

**D'**où vient l'Univers? Et d'où vient qu'il y a un Univers? Les expériences dans les grands accélérateurs, tel le LHC, à Genève, et celle des satellites, tel *Planck*, nous ont apporté plusieurs éléments de réponse. Mais de quoi parle au juste la physique quand elle parle d'«origine»? Qu'est-ce que les théories actuelles sont réellement en mesure de nous révéler? À bien les examiner, les perspectives que nous offre la cosmologie contemporaine sont plus vertigineuses encore que tout ce que nous avons imaginé: l'Univers a-t-il jamais commencé?



**Par-delà le visible. La réalité du monde physique et la gravité quantique**  
CARLO ROVELLI

ODILE JACOB, 2015  
(272 PAGES, 23,90 EUROS)

**É**crit par un pionnier dans l'étude de la gravité quantique, ce livre nous plonge dans la physique la plus moderne. Le lecteur est pas à pas conduit vers l'étrange image du réel suggérée par cette physique: celle d'un monde sans espace ni temps, ni énergie. Seul reste un fourmillement probabiliste de quanta élémentaires qui, dans leur danse folle, dessinent l'espace, le temps, la matière et la lumière. C'est ce que postule la «gravité quantique à boucles», une théorie qui cherche notamment à comprendre les tout premiers instants de l'Univers.



**La Magie du cosmos. L'espace, le temps, la réalité: tout est à repenser**  
BRIAN GREENE

ROBERT LAFFONT, 2005  
(672 PAGES, 24,50 EUROS)

**L'**auteur, professeur de physique et de mathématiques à l'université Columbia, à New York, est célèbre pour son ouvrage *L'Univers élégant, sur la théorie des cordes*. Cette fois, il nous fait découvrir les grandes questions qui, au XXI<sup>e</sup> siècle, continuent d'assaillir les théoriciens, plus que jamais à la recherche d'une «théorie du tout». Dans les pas de Newton, Maxwell, Schrödinger, Dirac, Einstein... il s'agit de comprendre la réalité même de notre monde et, avec elle, les concepts les plus fondamentaux tels que l'espace, le temps et le vide.



BEAU LIVRE

**Le Grand Récit de l'Univers**  
COLLECTIF

LE POMMIER, 2007  
(240 PAGES, 45 EUROS)

**C**et ouvrage écrit par plusieurs spécialistes et préfacé par Michel Serres a été publié pour accompagner l'exposition sur l'Univers ouverte en 2008 à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris.

Avec l'ambition d'être surprenant, précis et poétique, cette enquête sur la matière qui constitue les objets de l'Univers débute aujourd'hui et sur la Terre, puis remonte vers le passé pour un voyage dans l'espace et dans le temps, pour aboutir à un stade de l'Univers où la matière n'existait pas encore il y a près de 14 milliards d'années.

# RENDEZ-VOUS

P. 110

## REBONDISSEMENTS

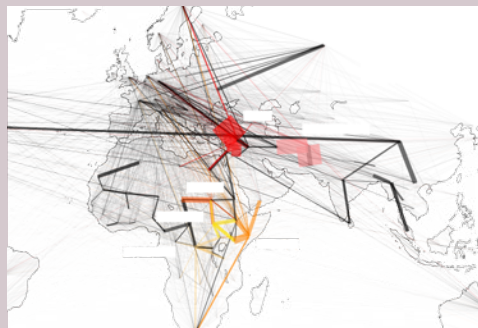
DES ACTUALITÉS SUR  
DES SUJETS ABORDÉS  
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 114

## DONNÉES À VOIR

DES INFORMATIONS  
SE COMPRENNENT MIEUX  
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

## LES INCONTOURNABLES

DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,  
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,  
DES PODCASTS... À NE PAS MANQUER



P. 118

## SPÉCIMEN

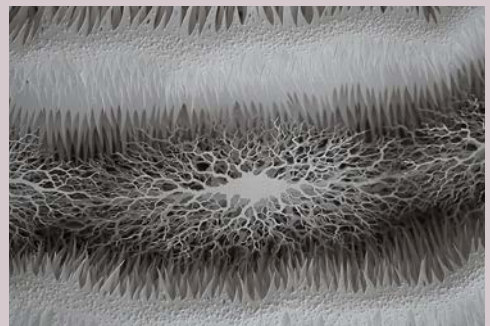
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI  
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR  
LE BLOG «BEST OF BESTIOLES»



P. 120

## ART & SCIENCE

COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE  
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT  
SUR UNE ŒUVRE D'ART



Hors-Série 96 : Alexandre le Grand

# Un cimetière à usage prolongé

Trois nouveaux tombeaux, ainsi que plusieurs sarcophages, ont été découverts dans un ancien cimetière qui fut en service durant l'ère achéménide et jusqu'à l'époque ptolémaïque.

**E**n 332 avant notre ère, Alexandre le Grand et ses troupes, avant de filer vers l'est et l'Indus, ont pris soin de placer l'Égypte sous leur contrôle. Le *Hors-Série* n° 96: «Alexandre le Grand. Quand l'archéologie bouscule le mythe» racontait, d'une part, la conquête du pays par le Macédonien et, d'autre part, l'installation au pouvoir de Ptolémée, l'un des généraux d'Alexandre, après la mort de celui-ci. Le nouvel homme fort fonda une dynastie, les Lagides, qui régna pendant près de trois siècles, jusqu'à la mort de sa dernière représentante, Cléopâtre, l'événement marquant la fin de l'époque dite ptolémaïque. Le ministre égyptien des Antiquités vient d'annoncer au journal *Al Ahrām* la découverte de trois tombeaux de cette époque, près de la ville de Samalut, à 200 kilomètres au sud du Caire.

Les tombeaux renferment plusieurs sarcophages, de diverses tailles et formes, ainsi que de nombreux fragments de terre cuite. De quand datent ces vestiges? Les premières analyses des tessons montrent que certains remontent à la XXVII<sup>e</sup> dynastie (de 525 à 404 avant notre ère), quand l'Égypte était encore dans le giron de l'Empire achéménide qu'Alexandre défit. D'autres sont en revanche beaucoup plus

récents et dateraient de l'époque ptolémaïque. Les archéologues, dirigés par Ayman Ashmawy, en concluent que l'endroit aurait servi de nécropole pendant plusieurs siècles.

D'un point de vue architectural, les trois nouveaux tombeaux diffèrent des vingt autres découverts lors d'une précédente campagne de fouilles. Le premier est constitué d'une fosse creusée dans la roche et conduisant à une chambre funéraire abritant quatre sarcophages en pierre, à face humaine (*voir la photo ci-dessous*). Dans les murs de la chambre, neuf loges ont été creusées afin d'accueillir des corps.

Le deuxième tombeau est doté de deux chambres funéraires. La première contenait les restes de deux sarcophages et six autres loges funéraires, dont une destinée à un enfant. Dans la seconde chambre, seuls les restes d'un sarcophage en bois ont été retrouvés. Le troisième tombeau est toujours en cours d'exploration.

Les restes osseux mis au jour sont ceux d'hommes, de femmes et d'enfants, indiquant que le site était un cimetière urbain et non celui d'une garnison militaire comme il fut un temps proposé. Les découvertes ne s'arrêteront pas là, car d'ores et déjà cinq nouveaux tombeaux ont été repérés sur le site. ■

Un sarcophage à tête humaine a été découvert dans un cimetière en service à l'époque ptolémaïque.



## Intrication sous-marine

**L**e *Hors-Série* n° 93: «Les Promesses du monde quantique» faisait la part belle à l'intrication quantique, ce phénomène par lequel deux particules, par exemple des photons, qui interagissent gardent la trace de ce lien même quand elles sont très éloignées. Il est à la base de futurs protocoles de transmissions sécurisées d'informations dans les futurs réseaux. On maîtrise et maintient cette intrication sur des distances de plus en plus grandes dans l'espace et dans des fibres optiques. Xian-Min Jin, de l'université Jiao Tong, à Shanghai, en Chine, a montré que l'on pouvait faire de même à travers de l'eau de mer. Ils ont observé l'intrication de photons avec une longueur d'onde de 405 nanomètres après une traversée de 3,3 mètres d'eau de mer contenue dans un tube. C'est un bon début avant des expériences en pleine mer.

L. JI ET AL., *OPTICS EXPRESS* VOL. 25, PP. 19795-19806, 2017

## L'homme africain dans l'histoire

**B**eaucoup du passé de l'humanité narré dans le *Hors-Série* n° 94: «Évolution. La saga de l'humanité» a été révélé par l'analyse d'ADN ancien. Cependant, on disposait de peu d'études sur notre histoire africaine faute d'ADN exploitable. Des travaux récents bouleversent notre vision du passé. D'abord, Pontus Skoglund a récemment présenté en congrès les analyses de plusieurs ADN africains (de 6 000 et de 3 000 ans). Elles montrent que les humains auraient conquis le continent plus vite qu'on ne le pensait. Elles confirment également la théorie selon laquelle certaines populations sont retournées en Afrique il y a 3 000 ans.

[HTTP://BIT.LY/AFADN](http://bit.ly/afadn)



## Un rendez-vous manqué

**D**ans le *Hors-Série* n° 94 : «Évolution. La saga de l'humanité», plusieurs rencontres entre espèces de la lignée humaine étaient évoquées. L'une d'elles intrigue particulièrement, la rencontre entre les humains anatomiquement modernes et les Néandertaliens. On pensait connaître un des endroits où ces deux espèces ont pu coexister, mais ce ne serait pas le cas, à en croire les travaux de Thibaut Devièse, de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne.

L'endroit en question est la grotte Vindija, en Croatie, où des restes de Néandertaliens ont été trouvés au début des années 1980. Une première datation avait révélé que ces individus auraient vécu il y a environ 31 000 ans. Ce fut une surprise, car à cette époque l'homme moderne venait d'arriver en Europe. On pouvait donc imaginer que les deux populations s'étaient croisées.

Une nouvelle datation, fondée sur une méthode plus fiable, a repoussé de 8 000 ans l'âge des fossiles. Quelle est la nouveauté? Les deux méthodes s'appuient sur la désintégration du carbone 14. Cependant, la première s'intéressait aux restes de collagène (une protéine qui constitue notamment la trame de l'os) pris dans leur ensemble, une matière facilement contaminée par les sédiments ou des microorganismes.

La seconde méthode, elle, se concentre sur un acide aminé particulier, en l'occurrence l'hydroxyproline. Cette molécule est caractéristique du collagène, et ne se trouve donc pas dans les possibles contaminants de l'échantillon. Les Néandertaliens de Vindija n'ont donc pas connu ces nouveaux venus qui allaient les supplanter. C'est peut-être mieux ainsi... ■

T. DEVIÈSE ET AL., PNAS, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2017

## Les saisons du microbiote

Les chasseurs-cueilleurs Hadzas, en Tanzanie, ont un microbiote distinct de celui des Occidentaux. Qui plus est, il varie selon les saisons, au gré des changements de régime.



Un chasseur Hadza en quête de nourriture.

**L'**un des articles du *Hors-Série* n° 95 : «Intestin, l'organe qui révolutionne la médecine» signalait l'influence de nos modes de vie modernes sur la composition du microbiote, notamment sa diversité.

On s'en rend compte en comparant les flores intestinales d'individus occidentalisés à celles de chasseurs-cueilleurs au mode de vie plus ancestral. C'est ce qu'ont fait Justin Sonnenburg, de l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues en étudiant pendant un an les Hadzas, un peuple vivant près du lac Eyasi, en Tanzanie.

Les résultats sont étonnants. D'abord, le microbiote des Hadzas varie notablement avec les saisons, sèche ou humide sous ces latitudes. Ces changements reflètent le régime alimentaire qui lui aussi suit un rythme saisonnier : la viande est consommée surtout pendant la saison sèche, alors que le miel et les fruits constituent l'essentiel du régime alimentaire durant la saison humide. D'une saison à l'autre, des espèces bactériennes semblent disparaître de la flore intestinale pour réapparaître ensuite ! Par exemple, les Bacteroidetes, et surtout les bactéries de la famille des *Prevotellaceae*, se raréfient quand viennent les pluies. La diversité des enzymes dédiées à la dégradation des sucres, d'origine végétale ou animale, varie également avec les saisons.

Ensuite, outre ces oscillations, le microbiote des Hadzas se distingue de celui d'Occidentaux, en étant plus riche et diversifié. Parmi les différences, citons plusieurs espèces de Spirochètes, que l'on ne trouve que chez les chasseurs-cueilleurs. À l'inverse, ces derniers sont pauvres en actinobactéries (dont le genre *Bifidobacterium*) alors qu'elles dominent le microbiote des Occidentaux. L'influence bénéfique de la diversité du microbiote sur la santé n'étant plus à démontrer, peut-être devrions-nous nous inspirer des Hadzas. Abandonnons le Caddie de supermarché pour un arc ! ■

S. SMITS ET AL., SCIENCE, VOL. 357, ISSUE 6353, PP. 802-806, 2017

Hors-Série 93 : Le monde quantique

# L'ordinateur quantique fera-t-il un (flip-) flop ?

Les qubits dits flip-flop simplifieraient la fabrication d'ordinateurs quantiques et en diminueraient les coûts de production.

**L**es multiples pistes explorées pour concevoir un ordinateur quantique, que l'on nous annonce bien plus performant que nos machines actuelles, étaient détaillées dans le *Hors-Série* n° 93 : «Les promesses du monde quantique». La pièce maîtresse d'un tel engin est le qubit, l'équivalent quantique du bit: alors que ce dernier prend comme valeur 0 ou 1, le premier peut exister dans deux états à la fois, c'est-à-dire 0 et 1 (on parle de superposition des états). Les physiciens imaginent faire des qubits avec des ions, des supraconducteurs, des semi-conducteurs..., qu'ils doivent ensuite associer et connecter de façon à constituer un processeur, une puce. L'équipe d'Andrea Morello, de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney, en Australie, vient de proposer une nouvelle méthode, simple, de concevoir qubits et processeurs qui de plus diminuerait grandement les coûts de production.

Ici, le qubit est un atome de phosphore dont les états sont reliés aux spins d'un électron et du noyau de l'atome. Les états sont définis par les couples de spins opposés des deux éléments: «0» quand le spin de l'électron est orienté vers le bas et celui du noyau

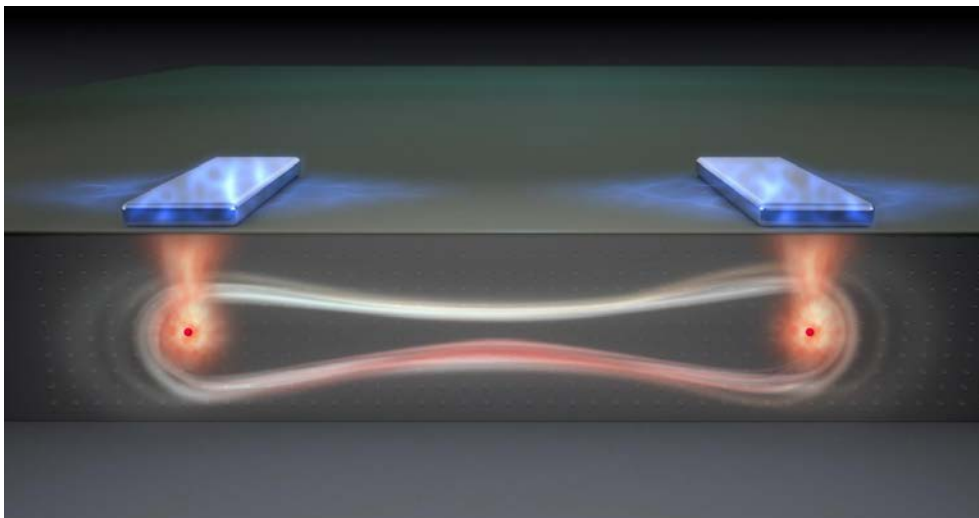
vers le haut; «1» dans la situation inverse. De tels qubits, dits flip-flop, sont robustes et restent longtemps dans des états superposés (ils sont cohérents). Ils sont ensuite placés sur une puce d'oxyde de silicium pourvue d'électrodes. Celles-ci permettent de gérer le qubit en déplaçant l'électron par rapport au noyau. On crée alors un dipôle électrique qui peut interagir et se coupler avec celui d'un autre qubit même éloigné (jusqu'à un micromètre).

Cette nouvelle architecture présente deux avantages majeurs. D'abord, les qubits (les atomes de phosphore) n'ont pas besoin d'être minutieusement disposés sur le processeur. Ensuite, ils n'ont pas besoin d'être très proches les uns des autres, ce qui laisse de la place aux autres composants indispensables tels que les interconnexions ainsi que les dispositifs de contrôle et de lecture.

La fiabilité de cette méthode a été testée par des modèles. L'équipe de physiciens prévoit de construire un premier véritable processeur quantique à 10 qubits d'ici à 2022. ■

G. TOSI ET AL., NATURE COMMUNICATIONS, VOL. 8, ART. 450, 2017

Les qubits flip-flop sont constitués d'atomes de phosphore dont les états sont manipulés par des électrodes (en bleu). Des dipôles électriques (en rose) se créent et autorisent les interactions (en blanc) de qubits, même éloignés.



## Le trésor d'Alexandre



**L**e *Hors-Série* n° 96: «Alexandre le Grand. Quand l'archéologie bouscule le mythe» racontait comment Alexandre a bouleversé le paysage monétaire. L'un des faits marquants de cette époque est la quantité de pièces frappées à l'effigie du Macédonien. Plusieurs de ces pièces, en l'occurrence des drachmes en argent, ont été récemment retrouvées dans le village de Kyzylkend, en Azerbaïdjan, par un de ses habitants, Etiram Rzayev. Les traces d'une habitation et d'une nécropole ont également été relevées à l'endroit où ce «trésor» a été mis au jour. Des fouilles archéologiques vont bientôt être menées sur le site établi aux confins orientaux de ce que fut l'empire d'Alexandre.

## Un microbiote de compétition!

**L**'essentiel à notre santé, le *Hors-Série* n° 95: «Intestin, l'organe qui révolutionne la médecine» le démontrait. Jonathan Scheiman, de l'université Harvard, a récemment présenté ses résultats selon lesquels le microbiote influe aussi sur les performances sportives. Il a analysé le microbiote de plusieurs marathoniens, avant et après l'épreuve, et mis en évidence des bactéries qui sont notablement plus nombreuses après. Les espèces sont efficaces pour dégrader l'acide lactique, un composé justement produit pendant un effort intense... A quand la bactérie du beach-volley?

[HTTP://BIT.LY/ACS-MICRO](http://bit.ly/acs-micro)



# DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS  
LES NUMÉROS  
DEPUIS 1996

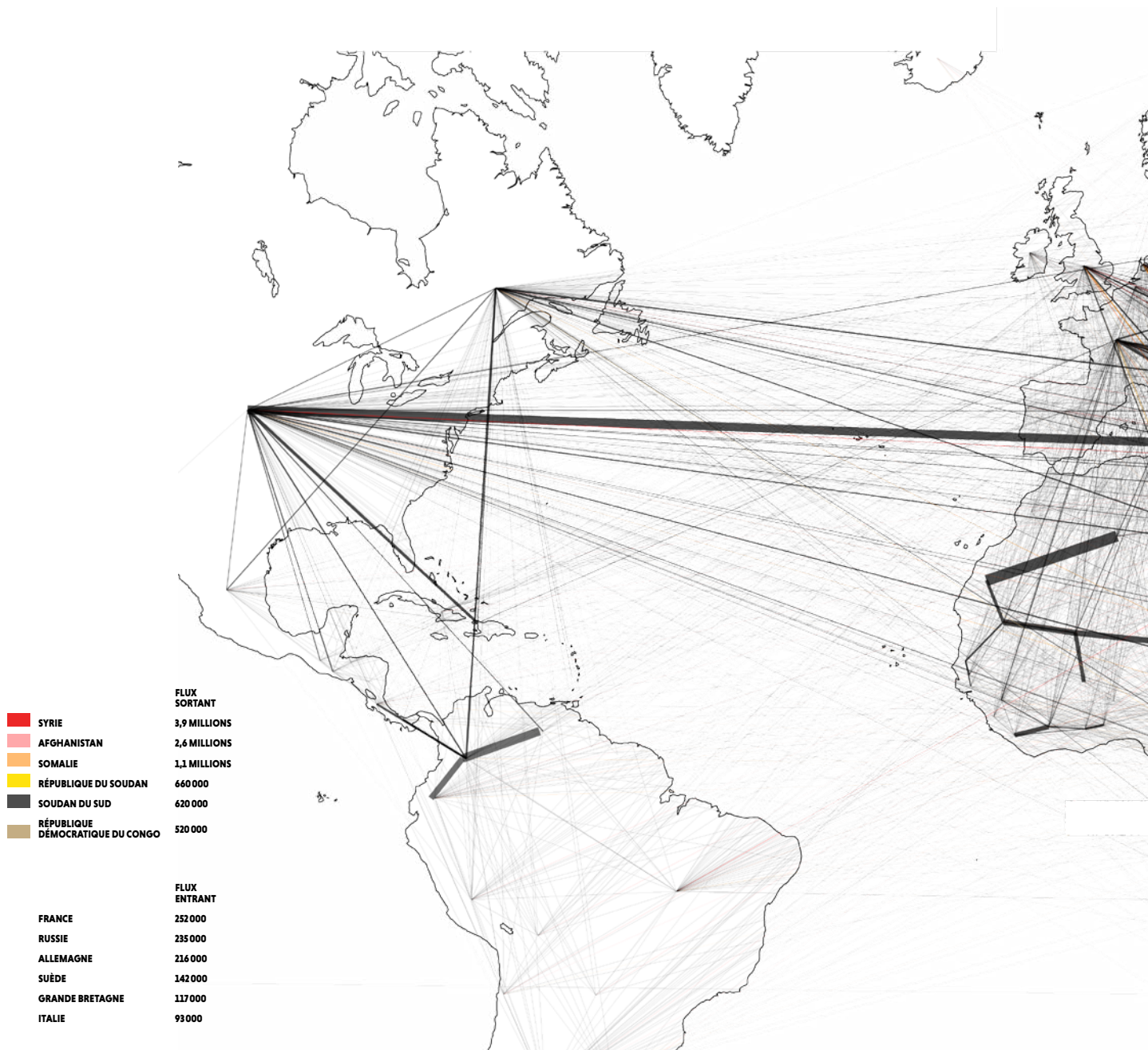
COMPLÉTEZ  
VOTRE COLLECTION  
SUR [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)





# L'Europe, une destination phare ?

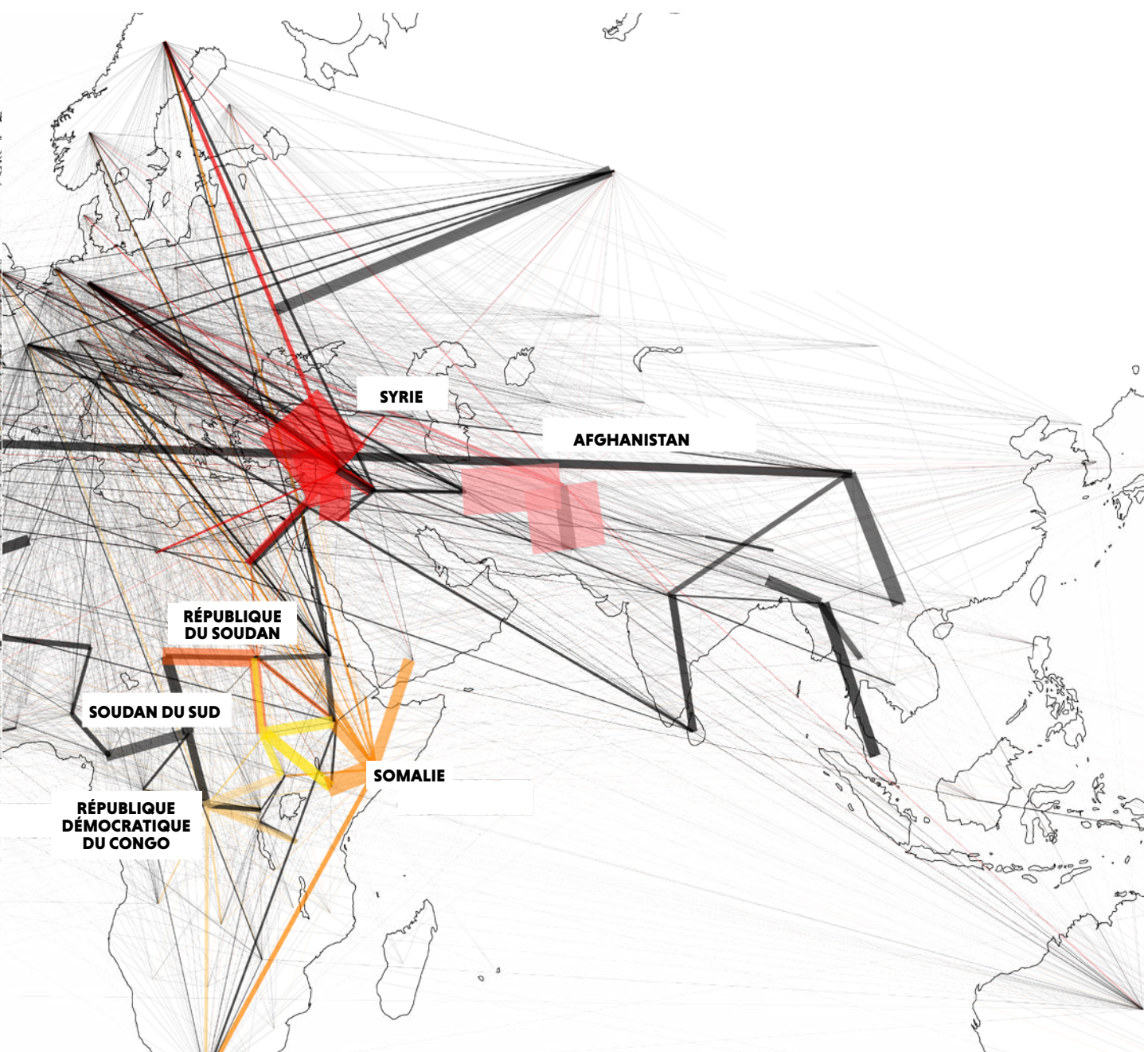
On entend souvent que les réfugiés n'ont qu'une idée en tête, rejoindre l'Europe. Les données, analysées correctement, montrent que ce n'est pas le cas.



**P**our l'année 2014, le Haut Commissariat aux réfugiés des Nations Unies a enregistré 14,37 millions de réfugiés à travers le monde (ils étaient 22,5 millions en 2016). D'où viennent-ils? Où vont-ils? Martin Grandjean, de l'université de Lausanne, en Suisse, a fait parler les chiffres, que l'institution onusienne tient à la disposition de tous.

Les pays où les départs sont les plus importants sont la Syrie et l'Afghanistan, essentiellement vers les pays voisins (*ci-dessous, l'épaisseur des traits est proportionnelle aux nombres d'individus déplacés*). Les autres pays que l'on quitte le plus sont ensuite la Somalie, la République du Soudan, le Soudan du Sud et la République démocratique du Congo. Les trois premiers pays

correspondent à eux seuls à plus de la moitié du total des réfugiés dans le monde! L'Europe, excepté l'Ukraine, est certes plus une destination qu'un territoire que l'on fuit. Cependant, les données révèlent que l'ensemble des arrivées dans les six pays les plus «accueillants» du continent excède à peine un million. C'est à peine 7,3 % du nombre total de réfugiés! On est donc loin de la vision facilement diffusée par les médias selon laquelle l'essentiel des réfugiés débarque en Europe. Par exemple, en 2014, l'Éthiopie a accueilli 665 000 Soudanais et Somaliens... à comparer avec les 760 000 individus qui ont trouvé refuge en France et aux États-Unis réunis! ■





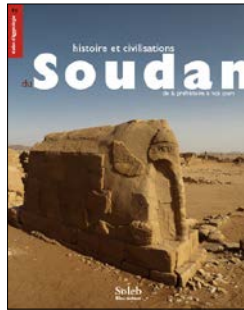
À lire



**Monsanto**  
**Une enquête photographique**  
MATHIEU ASSELIN

ACTES SUD, 2017  
(156 PAGES, 55 EUROS)

**A**gent orange (un défoliant utilisé pendant la guerre du Vietnam), PCB (utilisés comme isolants électriques), hormone de croissance transgénique, glyphosate (un désherbant)... Ces produits ont deux points communs: ils ont été fabriqués par Monsanto et ont été à l'origine de désastres sanitaires et environnementaux. Un exemple? Plutôt des dizaines en fait. Parmi les sites américains prioritaires aux yeux de l'Agence américaine de protection de l'environnement en raison de contaminations élevées, de nombreux ont été pollués par Monsanto... Mathieu Asselin, photographe de l'agence L'Œil du Sud, a mené l'enquête sur les impacts de ces pollutions sur les communautés et leur environnement. Les photographies, exposées cet été lors des Rencontres photographiques d'Arles, sont parfois difficiles à supporter. Elles révèlent le passé et le présent de la firme américaine, les dégâts causés, ses pratiques en matière de désinformation, son agressivité procédurière à l'encontre de quiconque mettrait en doute la qualité de ses activités... C'est édifiant! On en ressort avec l'idée, insistante, que la réorientation de l'entreprise vers les semences et des biotechnologies, avec les OGM, n'est pas forcément une bonne nouvelle pour le monde... Cet ouvrage (dans sa version originale anglaise) a reçu le premier prix du *Dummy Award* du *Fotobook Festival Kassel*, en 2016.

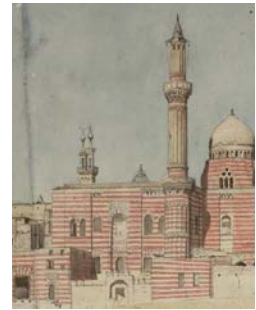


**Histoire et civilisations du Soudan**  
**de la préhistoire à nos jours**  
COLLECTIF

SOLEB ET BLEU AUTOUR, 2017  
(960 PAGES, 49 EUROS)

**D**u Soudan, on ne connaît guère que le conflit actuel qui ensanglante la République du Soudan et le Soudan du Sud, deux pays nés de la partition récente. Peut-être certains ont-ils en tête les étonnantes pyramides de Méroé, dans l'antique Nubie. Pourtant le Soudan est un pays à l'histoire riche, même si elle fut occultée par celle de son encombrant voisin, l'Égypte. Réunissant les meilleurs spécialistes, cet ouvrage abondamment illustré, publié dans la collection «études d'égyptologie», dirigée par Nicolas Grimal, professeur au Collège de France, est une synthèse accessible à tous qui fait le point sur les faits essentiels ou marquants et sur les connaissances les plus récentes en histoire, en art, en archéologie... Les méconnues langue et écriture méroïtiques ont droit à un chapitre entier. Le Soudan ne se résume pas à des civilisations disparues et des sites archéologiques. Aussi une large part du livre est-elle dédiée au Soudan moderne, son économie, sa politique, ses villes et villages, sa diversité ethnique (56 groupes formant quelque 570 tribus et parlant environ 125 langues), la condition féminine... La vie intellectuelle et la création artistique, bouillonnantes, ne sont pas non plus oubliées. Ce n'est peut-être pas votre prochaine destination pour les vacances, mais c'est assurément un pays à découvrir!

À cliquer



**Bibliothèques**  
**d'Orient**

**L**a bibliothèque d'Alexandrie vous a toujours fait rêver? Elle est désormais à portée de souris grâce au projet Bibliothèques d'Orient, initié par la Bibliothèque nationale de France. Cette bibliothèque numérique a pour objectif de sauvegarder et valoriser le patrimoine (manuscrits, photographies, cartes, dessins...) détenu dans les collections de plusieurs bibliothèques du Proche et du Moyen-Orient (Le Caire, Jérusalem, Istanbul, Beyrouth, Alexandrie...). Plus de 7 000 documents, couvrant la période 1798-1945, sont d'ores et déjà à disposition du grand public, mais aussi des chercheurs, enseignants, étudiants. Et ce n'est que le début.

<http://heritage.bnf.fr/bibliothequesorient/homepage>

À visiter

**Les cailloux**  
**de l'espace**

**L**e Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, propose une exposition exceptionnelle consacrée aux météorites. Ces pierres ont gardé le mystère de leur origine extraterrestre jusqu'en 1803, à la chute de la météorite de l'Aigle. Elles n'ont cependant pas tout dévoilé, et leur étude est toujours très active. De fait, elles sont riches d'enseignements sur les débuts du Système solaire, dont elles sont les témoins privilégiés. Avec plus de 350 pièces issues de la collection du Muséum, l'exposition est un voyage entre l'imaginaire et la science la plus récente.

Jusqu'au 10 juin 2018  
<http://meteorites.grandegaleriedevolution.fr/>



## À voir

### 74 minutes d'éclipse

Le 21 août 2017, aux États-Unis, une éclipse totale du Soleil a fait le bonheur du public, mais brièvement. La durée maximale espérée était de 2 minutes et 40 secondes. C'est court pour un tel spectacle ! Le 30 juin 1973, les passagers (des scientifiques emmenés notamment par l'astrophysicien Pierre Léna) du Concorde 001, un prototype de l'avion supersonique, ont eu plus de chance : ils ont eu droit à 74 minutes d'obscurité ! L'avion avait décollé de Las Palmas, aux Canaries, et a suivi l'ombre à travers le Sahara, à une vitesse supérieure à Mach 2, pour se poser à Fort-Lamy, aujourd'hui Ndjamena, au Tchad. Ce fut l'occasion de mener de nombreuses expériences. Cette vidéo (de moins de 6 minutes seulement) en retrace les moments forts.

<https://vimeo.com/158093891>

## À écouter

### Le seigneur des anneaux

Le 15 septembre 2017, la sonde *Cassini*, de la Nasa, s'est précipitée vers la planète Saturne après treize ans d'exploration de la planète aux anneaux et ses lunes. Durant toutes ces années, nos connaissances sur ce système se sont considérablement enrichies et ont bouleversé nos conceptions. On sait désormais mieux comment se sont formés les anneaux, ce à quoi ressemble l'intérieur de Saturne, ce que cache la diversité des satellites (Titan, Encelade, Japet...). Dans *La Méthode Scientifique*, sur France Culture, Nicolas Martin fait le point avec ses invités sur les formidables résultats de la mission *Cassini*.

<http://bit.ly/LMS-Sat>

## À visiter

# On dirait que ça ne te gêne pas de marcher dans la boue

Au Parc zoologique de Paris, un parcours biodiversité prolonge la découverte du monde animal. Au programme : douze expériences insolites, dont un parcours « pieds nus » !



Il y a trois ans rouvrait le Parc zoologique de Paris. Entièrement rénové, il s'organise désormais autour de cinq biozones : la Patagonie, le Sahel-Soudan, l'Europe, la Guyane et Madagascar. En les parcourant, on découvre 2 000 animaux de 180 espèces installés dans leurs 16 milieux naturels reconstitués. Depuis mai 2017, les visiteurs peuvent prolonger l'expérience grâce à un nouveau dispositif pérenne, un ensemble de douze installations ludiques placées le long des allées publiques ou des points de vision. Toutes sont en lien étroit avec les différents écosystèmes et leurs occupants et s'inscrivent dans le projet d'ensemble du Parc : sensibiliser à la biodiversité, à sa sauvegarde et à la préservation des équilibres naturels par le partage des connaissances. En quoi consiste plus précisément ce parcours ?

La première étape est l'occasion d'aborder la diversité du vivant grâce à des empreintes d'animaux, des plantes odorantes et des bruits d'animaux. Une autre invite à distinguer une autruche d'un nandou, un alpage d'un lama... On confond souvent ces animaux, que seule une observation détaillée permet de distinguer. Dans une autre encore, on se rend compte de ce que représentent les hommes par rapport à la biomasse des vers de terre, des rhinocéros et des bovins domestiques. Le public est également invité à identifier des girafes en fonction de leur pelage. Ce n'est pas une mince affaire ! Des lunettes révèlent l'adaptation de la vue selon que l'on est prédateur ou proie. Et ainsi de suite.

L'expérience sans conteste la plus physique est un parcours « pieds nus » de 225 mètres qui offre à la plante des pieds de ressentir les différentes textures des sols qui tapissent les enclos : aiguilles et pommes de pin, mulch, basalte, ardoise (attention lors de forte chaleur), boue... En fin de compte, les expériences proposées abordent des questions importantes portant notamment sur les interactions au sein d'un milieu naturel, les formes d'adaptation des animaux, les facteurs d'évolution des écosystèmes... On en ressort avec un regard affûté. Il ne sera alors plus question de vivre sans jamais voir un cheval, un hibou. ■

Plus de renseignements ici : <http://www.parczoologiqueparis.fr/>

# Quand la limace léopard fait tousser

**L**a limace léopard (*Limax maximus*) est un gastéropode connu pour ses ébats spectaculaires lors desquels il exhibe son sexe bleuté aussi long qu'elle. L'animal attire également l'attention pour des risques sanitaires qu'elle fait courir à divers mammifères.

En effet, ce gastéropode, avec d'autres, est l'hôte des larves de vers *Metastrongylus*, des parasites qui occasionnent toux, bronchites et trachéites, parfois fatales, notamment chez les sangliers, les chats et les chiens. Ces animaux sont contaminés lorsqu'ils ingèrent des mollusques infestés par le ver.

Gary Conboy, du Collège vétérinaire Atlantique, à Charlottetown, au Canada, et ses collègues se sont penchés sur une possible transmission directe aux mammifères *via* des larves libérées dans l'environnement par les mollusques. Pour ce faire, ils ont étudié la survie des larves excrétées par des limaces léopards infectées.

Résultat? Cette survie est suffisamment longue pour autoriser une contamination sans que l'ingestion d'un gastéropode soit nécessaire. C'est un nouveau canal de propagation du parasite que l'on doit prendre en compte. ■

Cette photographie est extraite du blog *Best of Bestioles*: <http://bit.ly/PLS-BOB>

G. CONBOY *et al.*, Spontaneous shedding of metastrongyloid third-stage larvae by experimentally infected *Limax maximus*, *Parasitology Research*, vol. 116, pp. 41-54, 2017.







# UNE BACTÉRIE en papier

L'Anglo-Irlandais Rogan Brown réalise des sculptures en papier découpé, à partir d'images scientifiques. Sous son scalpel, les détails d'une bactérie, par exemple, apparaissent dans toute leur complexité.

# C

Connaissez-vous le Jiānzhǐ? Non! Pourtant, dans une version simple, vous l'avez sans doute pratiqué. Il s'agit de l'art du papier découpé chinois. Connue depuis au moins le VI<sup>e</sup> siècle dans ce pays, il a été décliné de diverses autres façons: les kirie au Japon, le canivet en Suisse, les ketouba juives jusqu'à l'art de la silhouette, développé au XVIII<sup>e</sup> siècle en France par un certain... Étienne de Silhouette. Cet art n'a pas disparu, tant s'en faut. Il est aujourd'hui celui qu'exerce Rogan Brown, un Anglo-Irlandais installé dans le Sud de la France. Son sujet de prédilection: la nature et l'iconographie scientifique.

Voyons comment il s'y prend avec une œuvre créée pour une exposition sur le microbiote, organisée par le Wellcome Trust et présentée de façon permanente à *The Eden Project*, un complexe environnemental dédié à la nature et au développement durable, en Cornouailles. On distingue une bactérie enveloppée d'une sorte de toison, ce sont des flagelles et des pili (les premiers, plus longs, favorisent la mobilité du microorganisme, les seconds facilitent l'adhérence à un support, par exemple la paroi intestinale). Cette cellule, ici de plus d'un mètre de longueur, est un hybride d'*Escherichia coli* et de *Salmonella* né d'échanges entre l'artiste et une

société savante de microbiologie. On repère également, au cœur de la bactérie, son ADN.

L'idée est de modifier le regard du public sur les bactéries. Ce public, en s'approchant, peut constater que l'œuvre est une sculpture en papier composée de dizaines de feuilles découpées avec une précision extrême et empilées. L'artiste explique qu'il a passé cinq mois à inciser les feuilles nécessaires sur lesquelles il a dessiné le motif désiré, avec un scalpel, voire même avec un laser. C'est le principe de l'impression 3D en mode méditatif!

Parmi le bestiaire en papier de Rogan Brown, on trouve, outre des bactéries, des mousses, des coraux, des radiolaires... ainsi que des sujets moins ancrés dans la réalité et plus chimériques nés de plusieurs sources d'inspiration. Toutes ces sculptures ont en commun de mettre en valeur l'architecture de la nature et la croissance organique à différentes échelles. L'ambition affichée est de faire la synthèse entre les romantiques du XIX<sup>e</sup> siècle, qui, tel William Blake, voyaient «un monde dans un grain de sable», et la science actuelle, confrontée à la complexité sans bornes de la nature. À vos ciseaux! ■

Le site de Rogan Brown: [www.roganbrown.com](http://www.roganbrown.com)



© R. Brown





# PROCHAIN HORS-SÉRIE en kiosque le 10 janvier 2018



## Déchiffrer les nombres BIG DATA, STATISTIQUES, PROBABILITÉS...

À l'ère des Big Data, nombres et données coulent à flots ininterrompus. Comment s'y retrouver et extraire des informations pertinentes? Les nombres s'invitent aussi dans notre quotidien sous la forme de statistiques et de probabilités prétendument incontestables. Et pourtant, elles sont loin d'être innocentes... Un numéro pour dompter les nombres!



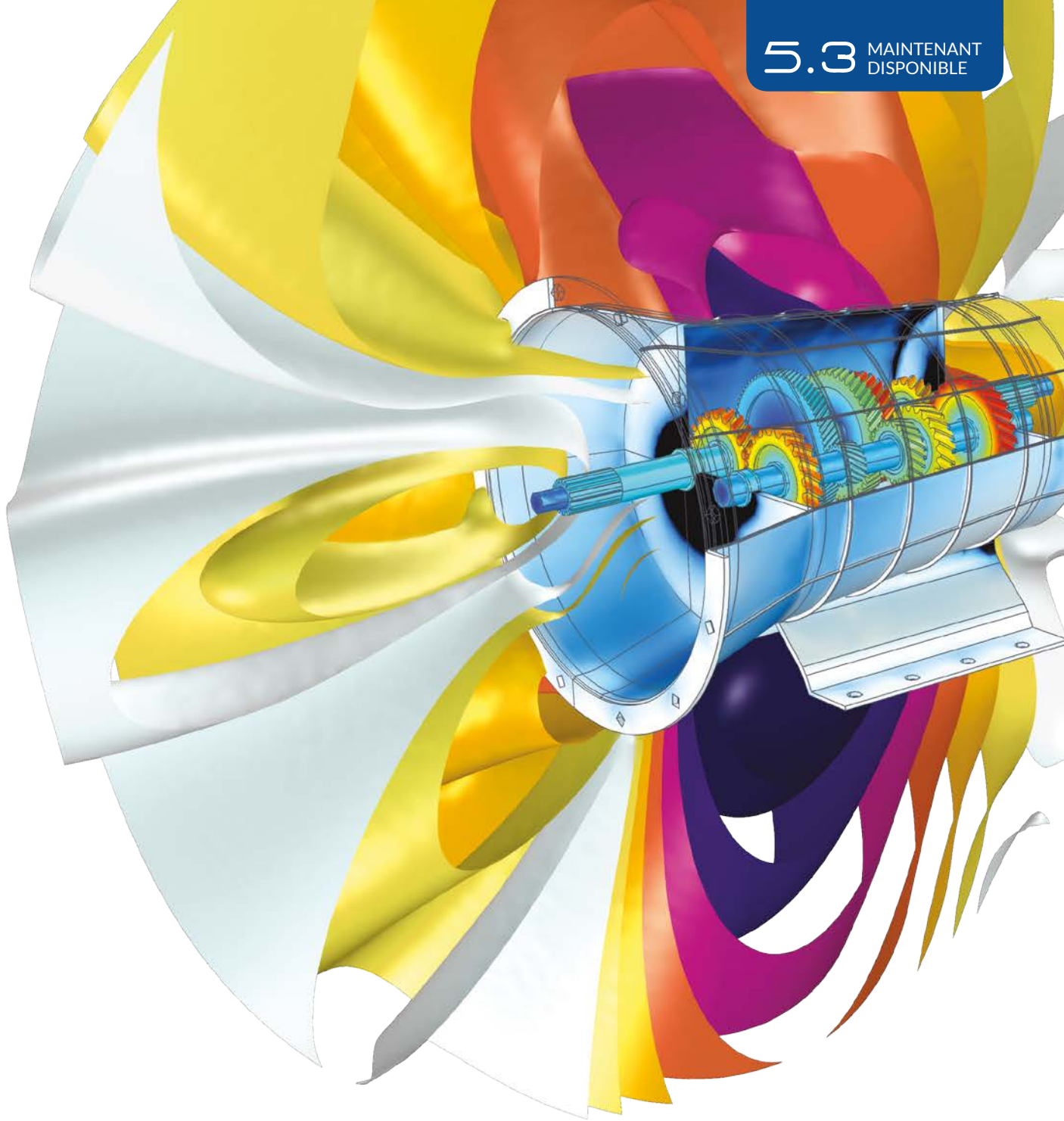
# Dans l'**inter**êt de la science

mathieu  
vidard

la tête au carré  
14:05-15:00



**inter**venez  
franceinter.fr



# LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique  
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

[comsol.fr/products](https://www.comsol.fr/products)