

10

MODÈLES
POUR COMPRENDRE
L'UNIVERS

Ten Patterns That Explain the Universe
© 2021 UniPress Books Ltd, London, UK

This translation of *Ten Patterns that Explain The Universe* published in English in 2021 is published by arrangement with UniPress Books Limited.

Cette traduction de l'ouvrage *Ten Patterns that Explain The Universe* paru en langue anglaise en 2021 est publiée en accord avec UniPress Books Limited.

Direction artistique : Nicolas Wiel
Couverture : Florie Bauduin
Illustration de couverture : © Urvana / Shutterstock
Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, Paris, 2022 pour la traduction française
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083566-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4)

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

83566 - (I) - OSB 120° - NOC - LRN
Dépot légal : octobre 2022
Imprimé en France par Jouve

BRIAN CLEGG

10

**MODÈLES
POUR COMPRENDRE
L'UNIVERS**

Traduit de l'anglais par Marc Lachièze-Rey

DUNOD



SOMMAIRE

- 6 **INTRODUCTION**
- 11 **1 L'IMAGE DU FOND
DIFFUS COSMOLOGIQUE**
L'image du rayonnement fossile, écho du Big Bang
- 31 **2 LES DIAGRAMMES DE MINKOWSKI**
La représentation des liens entre l'espace et le temps
- 53 **3 LES TRACÉS DE PARTICULES**
Des trajectoires révélant l'antimatière et le boson de Higgs
- 75 **4 LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN**
La représentation des interactions entre lumière et matière
- 95 **5 LE TABLEAU PÉRIODIQUE**
Le tableau qui traduit la configuration spécifique de chaque atome



- 113 **6 DES CARTES AUX MODÈLES
MÉTÉOROLOGIQUES**
La représentation simple de systèmes météorologiques complexes
- 135 **7 LA DROITE NUMÉRIQUE**
À l'origine de l'arithmétique et de nombreux calculs mathématiques
- 155 **8 LES CLADOGRAMMES**
La représentation des relations entre espèces et leur évolution
- 179 **9 LA DOUBLE HÉLICE DE L'ADN**
La codification des données fondamentales du vivant
- 199 **10 LES SYMÉTRIES**
Un schéma omniprésent dans la nature, en mathématiques
et en physique
- 220 **INDEX**
- 224 **REMERCIEMENTS**

INTRODUCTION

Nous comprenons le monde qui nous entoure à l'aide d'« images ». Il ne s'agit pas simplement d'illustrations au sens visuel du terme, mais également de « représentations » mentales de la réalité, de schémas ou de diagrammes la modélisant. Leur régularité, la cohérence des règles qui les régissent, nous aident à appréhender le monde. Ils nous évitent de devoir réapprendre la nature, les conséquences ou l'utilisation d'un phénomène ou d'un objet, comme une ombre, une pomme ou un interrupteur, à chaque nouvelle rencontre.

Parfois, notre besoin de tout modéliser peut nous égarer. Par exemple, quand nous sursautons devant une ombre, nous réagissons davantage à l'idée qu'un prédateur puisse s'y dissimuler, qu'à la réelle présence de celui-ci ; il vaut certes mieux se tromper plutôt que de se faire dévorer sans réagir. De même, les superstitions découlent de la croyance en un présupposé qui ne correspond pas à la réalité ; et les préjugés d'une mauvaise application d'un schéma par extrapolation d'un exemple unique à un groupe plus large (ainsi, tous les serpents ne sont-ils pas dangereux). Notons que l'Homme n'est pas le seul être concerné par ce phénomène : les pigeons par exemple, s'ils ont l'habitude de répéter un mouvement avant d'être nourris, peuvent l'accomplir lorsqu'ils ont faim en s'attendant à recevoir de la nourriture.

Mais le fait que nos représentations mentales du monde puissent nous induire en erreur ne doit pas remettre en cause

leur rôle fondamental. Et c'est le rôle de la science que de trouver des modèles nous permettant de l'appréhender. Les lois naturelles, telles que celles de Newton, expriment des régularités observées dans certains aspects de l'univers. Sans eux, notre environnement resterait incompréhensible : son comportement apparaîtrait constamment différent, il n'y aurait pas de lois, pas de science, pas de technologie, et l'univers serait un royaume de chaos. Fort heureusement, et pour des raisons que nous ne comprenons pas entièrement, l'univers semble bien se prêter à des modèles, schémas ou représentations fondamentaux qui nous aident à comprendre son fonctionnement. Dix d'entre eux, particulièrement significatifs, sont explorés dans ce livre.

Le fond diffus cosmologique

Nous évoquerons tout d'abord l'image du fond diffus cosmologique, un rayonnement électromagnétique nous parvenant de toutes les directions de l'espace, et dont

l'origine remonte aux premiers moments de l'univers. Les motifs que dessinent ses subtiles variations d'intensité révèlent comment les toutes premières structures de l'univers se sont formées.

Les diagrammes de Minkowski

Nous verrons ensuite que les diagrammes de Minkowski, issus de la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein puis développés par Hermann Minkowski, illustrent l'imbrication de deux aspects familiers de la réalité – l'espace et le temps – et ses conséquences déroutantes lorsqu'un objet se rapproche de la vitesse de la lumière.

Les trajectoires de particules

Nous évoquerons également ces motifs de pluies de nouvelles particules, des enchevêtrements de motifs obtenus grâce aux accélérateurs de particules comme le Grand collisionneur de hadrons du CERN, en Suisse ; tel un marteau-pilon pour casser de très petites noix, il accélère à une vitesse proche de celle de la lumière des particules chargées et provoque leurs collisions. Une grande part de l'énergie de ces collisions est convertie en matière, selon la célèbre équation $E = mc^2$. Les configurations des nouvelles particules produites ont permis des découvertes comme celle du boson de Higgs.

Les diagrammes de Feynman

Contrairement aux images des trajectoires de particules, les diagrammes de


Feynman sont élégants, clairs et synthétiques. Conçus par le grand physicien Richard Feynman, ils illustrent les interactions entre particules de lumière et de matière. Leur utilisation simplifie les calculs complexes nécessaires pour prendre en compte toutes leurs conséquences possibles.

Le tableau périodique

Reconnaisable par beaucoup de gens, le tableau périodique des éléments domine la chimie. Régulièrement présent au cinéma et à la télévision, omniprésent sur les murs des laboratoires de chimie, il constitue un décor familier. Mais cette structure de rectangles cache une configuration fondamentale : les dispositions des électrons dans les atomes, qui déterminent les propriétés des réactions chimiques, de la myriade de celles qui font fonctionner notre corps jusqu'à celles qui font rouiller le métal.

Les cartes météorologiques

Habituellement, un modèle peut nous aider à comprendre ce qui se passe et à prédire l'avenir ; la météorologie en offre un parfait exemple. Presque totalement imprévisible jusqu'aux années 1980, elle a depuis bénéficié des apports de la théorie du chaos, un modèle mathématique puissant qui étudie l'évolution des systèmes dynamiques. Nous disposons aujourd'hui de cartes prédictives performantes, un exemple d'illustrations étonnamment simples de processus complexes.



Le ciel nocturne nous offre l'un des plus beaux spectacles qui soit : celui de la Voie lactée, notre propre galaxie, qui contient 200 à 400 milliards d'étoiles.

La droite numérique

La droite numérique offre un autre exemple de représentation simple de la complexité. L'idée d'une séquence de chiffres le long d'une ligne, comme les divisions d'une règle, peut sembler triviale, mais elle constitue la base de l'arithmétique et de presque toutes les opérations mathématiques quotidiennes. C'est un modèle qui s'impose dans notre vie quotidienne.

Les cladogrammes

Moins familière est la façon de représenter l'histoire de la vie à travers les âges. Dans son ouvrage fondateur *De l'origine des espèces* (1859), Charles Darwin avait opté pour un arbre généalogique. Mais biologistes et paléontologues utilisent



plutôt aujourd'hui le « cladogramme », qui donne une meilleure image de l'évolution en s'appuyant sur des données génétiques : un arbre informatif qui situe les moments où des espèces se sont séparées de leurs ancêtres communs.

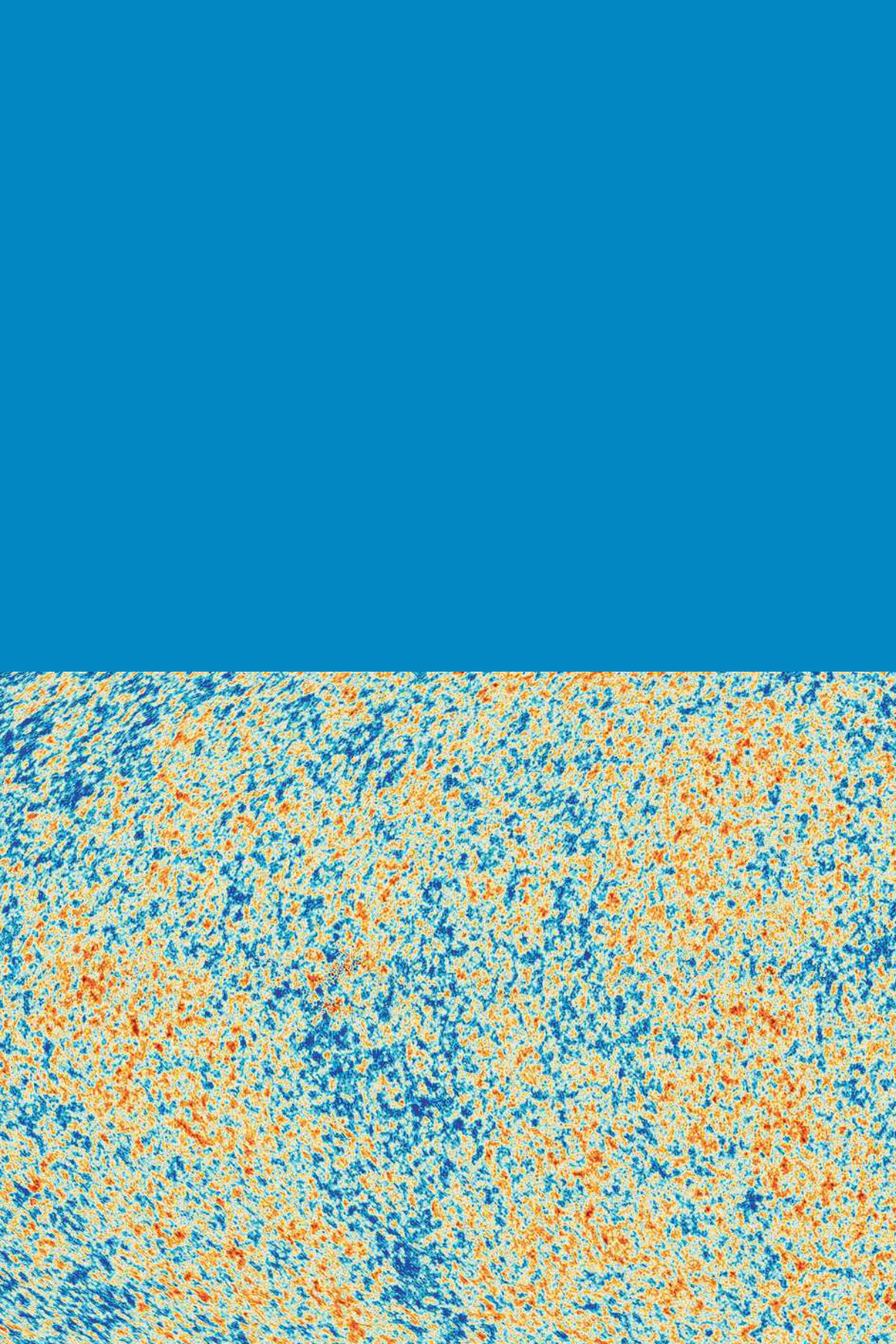
La double hélice de l'ADN

La génétique est née de la découverte de l'une des structures fondamentales de la vie : la molécule complexe d'ADN, deux brins antiparallèles enroulés l'un autour de l'autre pour former une double hélice. L'ADN contient toute l'information génétique d'un être vivant, sous la forme d'un motif spécifique de composés chimiques répartis sur toute sa longueur, comme les bits d'un fichier informatique.

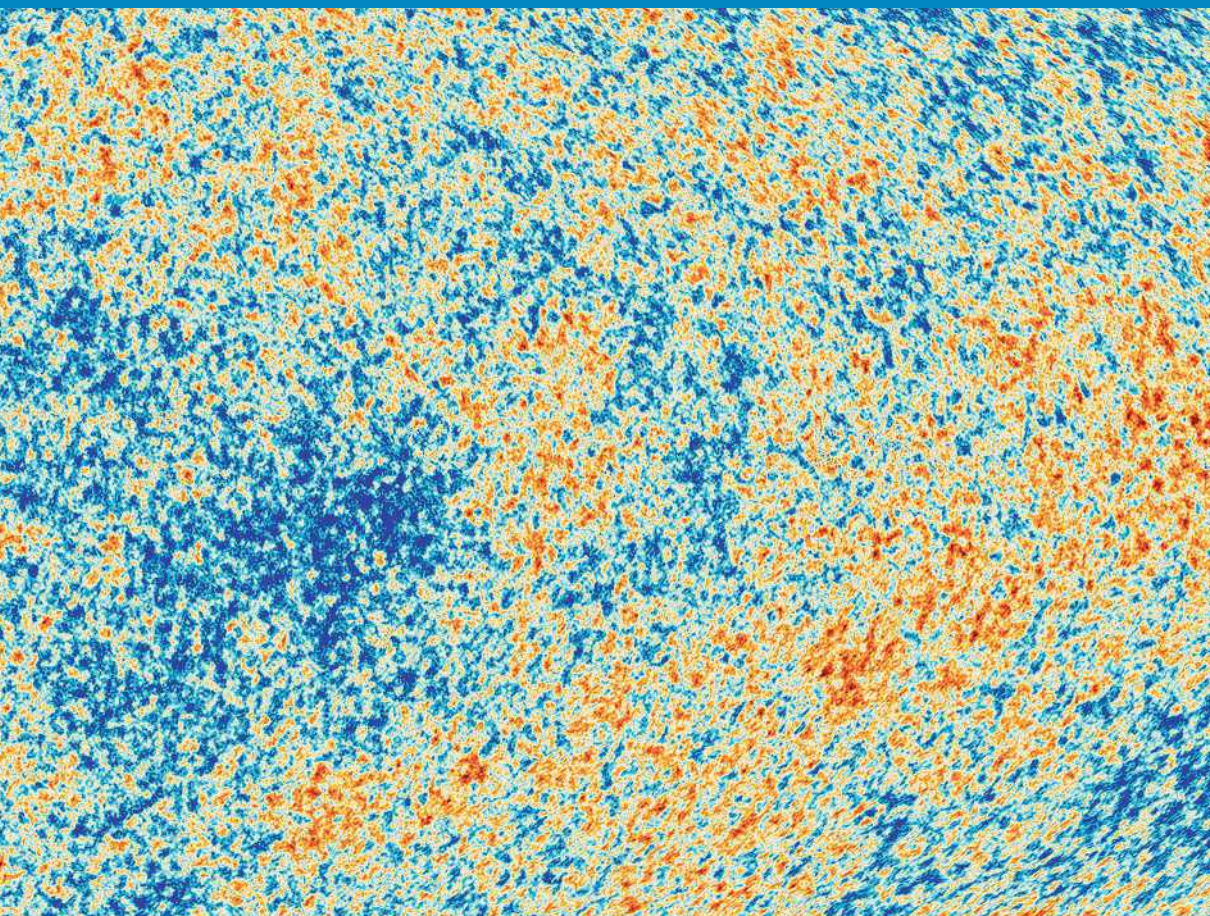
Les symétries

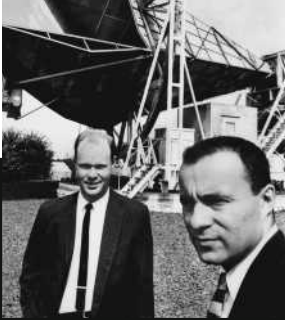
La molécule d'ADN présente une sorte de symétrie, car elle se divise en deux moitiés, chacune capable de déterminer ce qui se trouve dans l'autre. La symétrie semble être un schéma fondamental de l'univers. Elle sous-tend une grande partie de la physique, depuis la conservation de l'énergie jusqu'à la classification des particules élémentaires. Il semble donc pertinent d'y consacrer notre dernier chapitre.

Les dix « modèles » fondamentaux que nous nous apprêtons à découvrir dans cet ouvrage nous offrent une vision fascinante de la réalité, ainsi que les moyens de mieux comprendre le fonctionnement de l'univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.



1 L'IMAGE DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

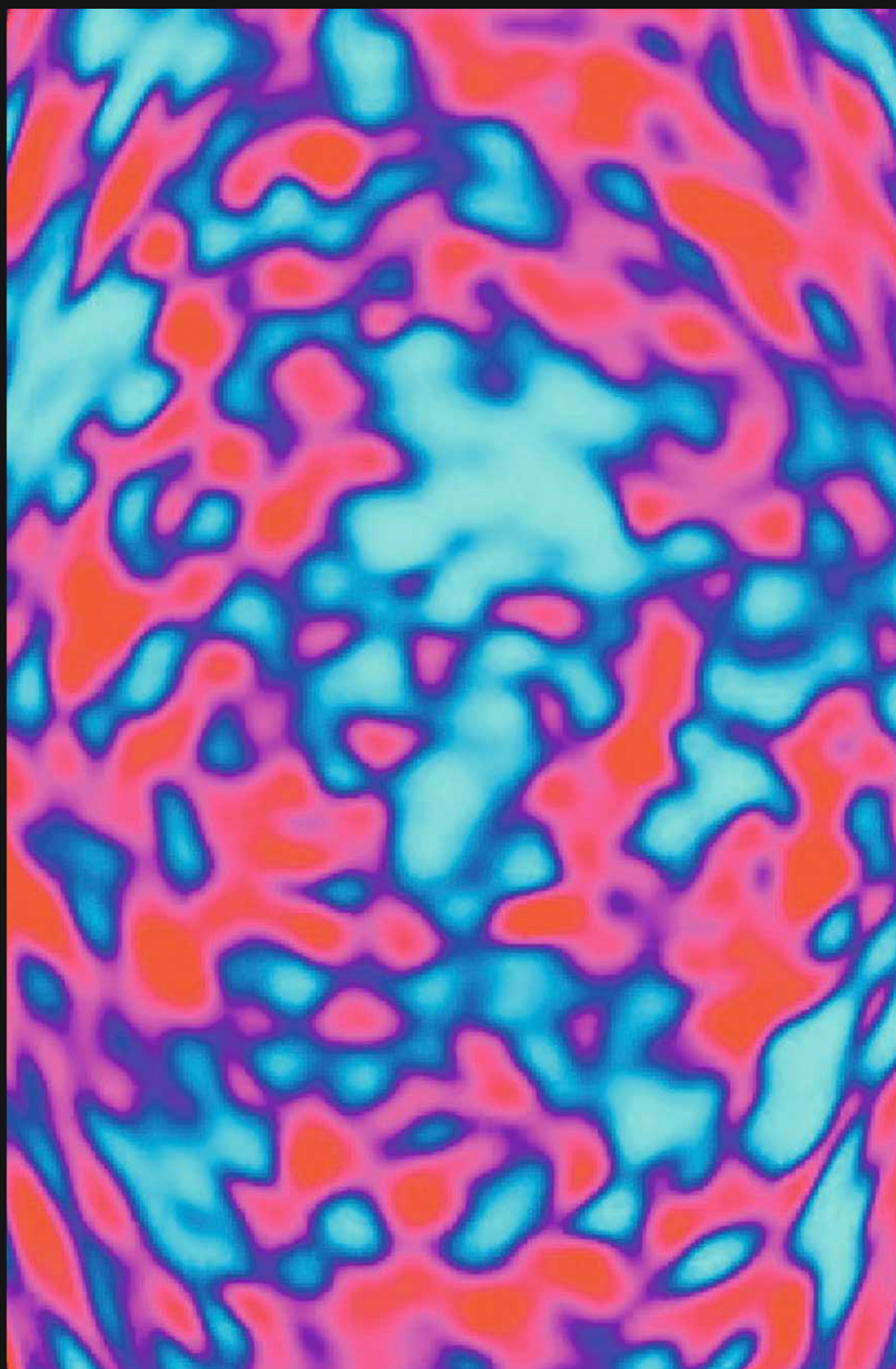




Robert **Wilson** (à gauche) : né en 1936.
Arno **Penzias** (à droite) : né en 1933.

UN ÉCHO DANS L'UNIVERS

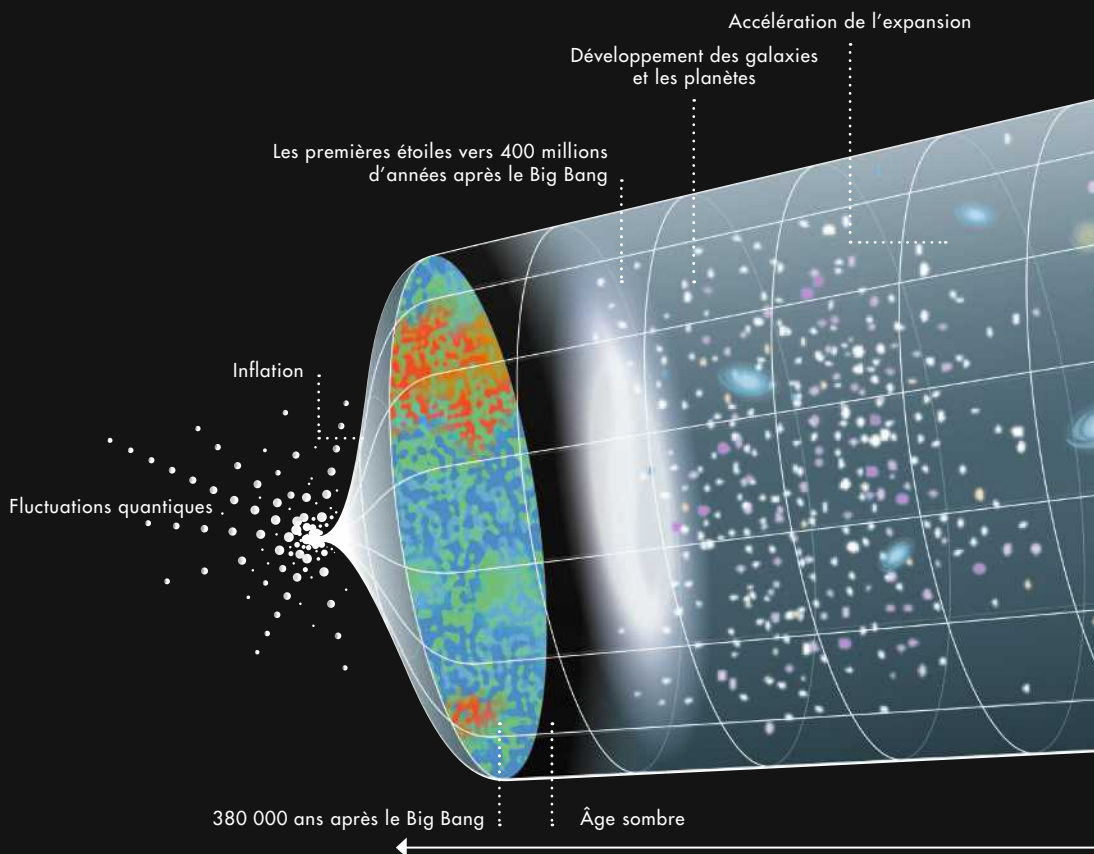
Environ 380 000 ans après le Big Bang, il y a 13,8 milliards d'années, l'univers est devenu transparent. La matière cosmique était auparavant ionisée, chaque particule chargée électriquement prête à absorber la lumière. Puis elle s'est transformée en atomes neutres, permettant à la lumière de circuler librement dans l'univers, jusqu'à aujourd'hui. L'expansion et le refroidissement de l'univers ont diminué son énergie et elle constitue aujourd'hui un rayonnement omniprésent, peu énergétique, dans le domaine des micro-ondes. Ce « fond diffus cosmologique » fut découvert fortuitement en 1964 par Robert Wilson et Arno Penzias. Décrit comme « l'écho du Big Bang », cet *instantané* du cosmos peut être considéré comme un scanner fœtal d'un bébé univers.



L'UNIVERS EN EXPANSION

Alors que l'univers continuait à s'étendre et à se refroidir après le Big Bang, l'énergie des photons de lumière a diminué jusqu'à constituer un faible rayonnement omniprésent, dans le domaine des micro-ondes. Sans doute plus connues comme mécanisme de chauffage des fours du même nom, ces dernières font partie du spectre du « rayonnement électromagnétique » qui englobe (par énergie croissante) ondes radio (incluant les micro-ondes), infrarouges, lumière visible, ultraviolets, rayons X et rayons gamma.

Tout au long de l'histoire de l'univers, la nature de la lumière s'est transformée : de rayons gamma ultrapuissants jusqu'aux faibles micro-ondes. C'est la conséquence directe de l'expansion de l'univers, que celui-ci n'a cessé de subir depuis le tout début.

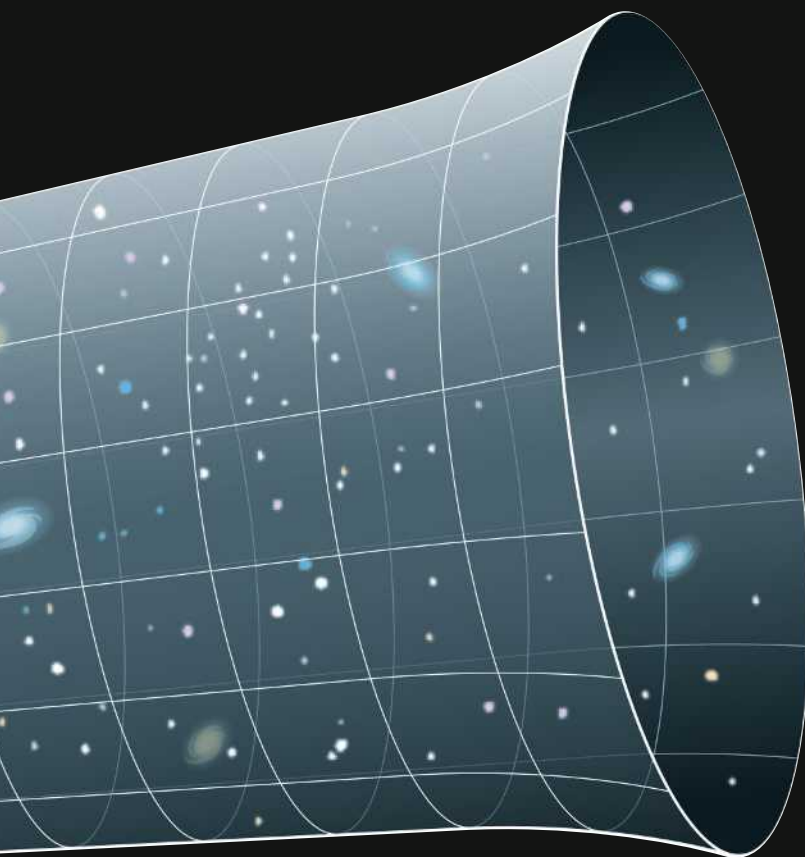


Aujourd'hui, cette expansion s'accélère sous l'effet d'une influence mystérieuse qui reste à comprendre, énergie sombre ou constante cosmologique...

L'expansion de l'univers ne se réduit pas à un simple éloignement mutuel des objets qu'il contient, comme une explosion qui expulserait des fragments dans toutes les directions. C'est l'espace lui-même qui s'étend, avec pour conséquence une augmentation de longueur d'onde pour tout rayonnement. Pour la lumière visible, cela signifie un déplacement du bleu vers le rouge. Et pour les rayons gamma de très courtes longueurs d'onde, une transition jusqu'aux micro-ondes, en passant par les rayons X, les ultraviolets, la lumière visible et les infrarouges.

L'évolution de l'univers en expansion

L'échelle de temps cosmique, du Big Bang (à gauche) à aujourd'hui (à droite), illustre l'évolution de l'univers. L'image du fond diffus cosmologique nous renseigne sur le développement des étoiles et des galaxies au fil du temps.



EXPANSION DU BIG BANG 13,8 MILLIARDS D'ANNÉES

EXPLORATION DE LA LUMIÈRE

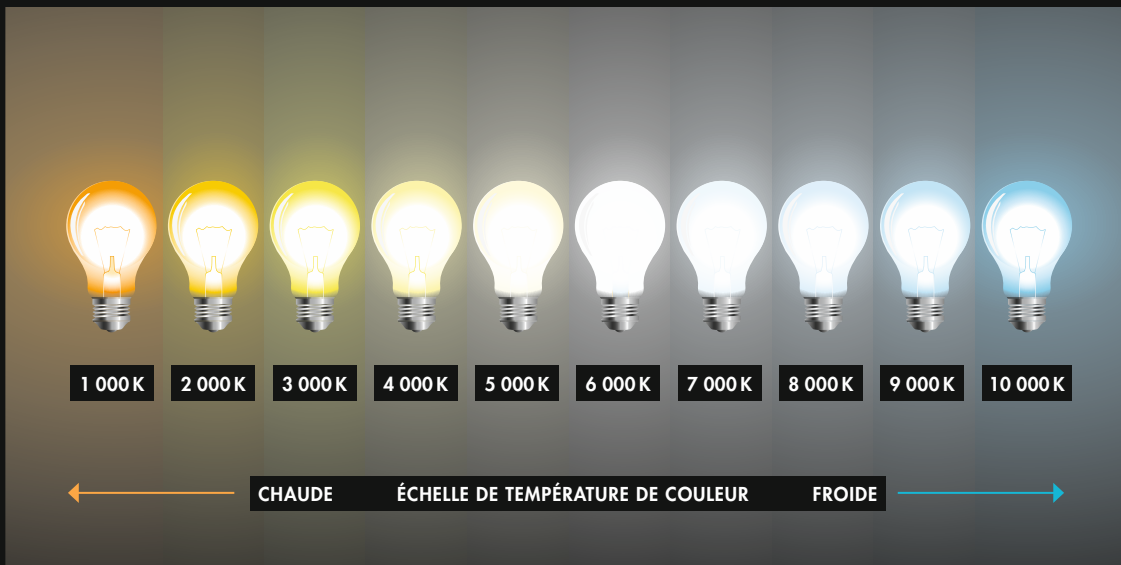
On peut envisager un faisceau de lumière comme un flux de particules appelées photons, sa couleur correspondant à l'énergie moyenne de ces derniers. Les photons gamma ont l'énergie la plus élevée, mais l'expansion cosmique a pour effet la diminution de celle-ci, comme un boxeur retenant son coup. C'est ainsi que les photons gammas sont devenus des micro-ondes.

À travers l'image de ce rayonnement datant des premières années de l'univers, la configuration du fond diffus cosmologique fut explorée par différents satellites d'observation dont nous parlerons plus loin : pour la première fois en 1992 par un satellite appelé COBE, puis en 2001 par WMAP et en 2009 par Planck. Apparurent d'infimes variations de ce que l'on appelle la « température » de ce rayonnement...

Habituellement, la « température » correspond à l'énergie individuelle de chaque atome de matière (qu'elle soit gazeuse, liquide ou solide) et se mesure avec un thermomètre. Ce n'est pas possible avec un rayonnement, dont la température fait référence à l'énergie de chaque photon, par analogie avec celle d'un système de référence appelé corps noir qui émettrait des photons d'énergies similaires. La luminosité des objets suffisamment chauds nous est familière, mais les objets froids émettent aussi du rayonnement ; invisible car d'énergie trop faible pour nos yeux. La température du rayonnement de fond cosmologique en micro-ondes est d'environ 2,7 degrés Kelvin (en termes plus familiers, environ $-270,45$ °C). Ce rayonnement constitue un instantané de l'univers.

PREMIÈRE DÉTECTION

La découverte de cette omniprésente radiation cosmique a résulté d'un coup de chance : la détection, en 1964, d'un signal inattendu par deux physiciens travaillant pour la société américaine de recherche en télécommunications Bell Labs, sur le site de Holmdel dans le New Jersey. Le site abritait le projet Echo, un programme expérimental de communication par satellites utilisant des ballons réfléchissants métallisés pour renvoyer les signaux d'un point terrestre à un autre. L'antenne du projet, appelée aussi le « cornet », fut utilisée à différentes reprises, notamment par les radioastronomes Robert Wilson et Arno Penzias.



Les températures sont mesurées en kelvin (K) sur l'échelle Kelvin absolue. Lorsque la température d'un objet augmente, le spectre de la lumière qu'il émet passe du rouge au jaune, puis au blanc et au bleu.

Comme son nom l'indique, la radioastronomie consiste à capter des ondes radio qui, comme la lumière visible, peuvent être émises par les étoiles. Wilson et Penzias tentaient de trouver des signaux radio émanant d'un nuage de gaz

que l'on pensait exister en dehors de notre propre galaxie, la Voie Lactée. Mais ils ont enregistré un bruit de fond qui semblait provenir de toutes les directions de l'espace.

L'explication la plus naturelle pour ce bruit était la présence d'un élément perturbateur situé à proximité. Mais on aurait alors attendu une variation du signal en fonction de la direction de l'encombrant cornet, ce qui ne fut pas le cas : le bruit conservait le même niveau, quelle que soit l'orientation du pointage. Penzias et Wilson supposèrent également une défaillance du récepteur lui-même, les premiers radiotélescopes étant souvent perturbés par le bruit radioélectrique produit par leurs propres systèmes électroniques.

Après un long processus d'élimination, une fois le câblage et l'électronique testés correctement, les scientifiques réalisèrent que l'ouverture du cornet était recouverte de fiente de pigeon (décrite pudiquement comme « matériau diélectrique blanc ») : un couple de pigeons avait décidé que le cornet constituait un bon site de nidification. Penzias et Wilson envoyèrent les oiseaux par le courrier interne de la société, jusqu'à un autre site des Bell Labs situé à 64 km de là. Or il s'agissait de pigeons voyageurs et au bout de quelques jours, ils étaient de retour. Ils furent finalement abattus et le cornet nettoyé. Mais les pigeons ont perdu la vie pour rien : le bruit de fond était toujours là, semblant toujours provenir de toutes les directions.

Alors se produisit l'une des coïncidences heureuses qui semblent parfois impliquées dans les découvertes scientifiques. Penzias mentionna son problème de bruit à un collègue radioastronome,

LA PRÉDICTION DE GAMOW.
En 1953, George Gamow avait prédit pour le fond diffus une température voisine de 7 K, très proche de la valeur réelle.

Bernie Burke, tout en discutant d'un tout autre sujet. Burke mit Penzias en contact avec le physicien Robert Dicke, de Princeton, dont Burke avait entendu dire qu'il travaillait sur un sujet associé au Big Bang, qui pouvait avoir un lien.

Au fil des ans, plusieurs théoriciens, notamment George Gamow, russe exilé aux États-Unis, avaient suggéré que du rayonnement, émis lorsque l'univers était devenu transparent, puisse encore traverser l'espace. Initialement sous forme de rayons gamma à haute énergie, puis sous celle de micro-ondes, l'expansion diminuant leur énergie. Dicke avait constitué une petite équipe pour tenter de détecter ce rayonnement. Mais ses équipements militaires réformés, de piètre qualité, ne lui avaient pas permis de l'isoler dans le bruit de fond radio ambiant, toujours présent sur Terre. (Bien que nous ayons tendance à distinguer micro-ondes et radio à cause de leurs usages différents,

« LA PLUS IMPORTANTE
IMPLICATION DE CETTE DÉCOUVERTE...
FÛT DE TOUS NOUS FORCER
À PRENDRE AU SÉRIEUX L'IDÉE
D'UN UNIVERS PRIMORDIAL.

STEVEN WEINBERG