

LES

BIG

SECRETS

DE

L'UNIVERS

LES
BIG
SECRETS
DE
L'UNIVERS

Florence Porcel

Préface de Hubert Reeves

DUNOD

Chez le même éditeur :

La folle histoire du Système solaire

Crédits photographiques

P. 36: © ESA and the Planck Collaboration. P. 78: © NASA, ESA, G. Dubner (IAFE, CONICET-University of Buenos Aires) *et al.*; A. Loll *et al.*; T. Temim *et al.*; F. Seward *et al.*; VLA/NRAO/AUI/NSF; Chandra/CXC; Spitzer/JPL-Caltech; XMM-Newton/ESA; Hubble/STScI.

Couverture: Claire Morel-Fatio

Illustrations: Rachid Marai

© Dunod, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077980-2

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.

Préface

Le métier de diffuseur des connaissances pose un problème de compromis: comment présenter aux auditeurs ou aux lecteurs un message qui respecte à la fois rigueur et clarté. Les fruits des recherches scientifiques s'expriment en des langages souvent hautement techniques acquis lors des années d'études. Celui qui veut rendre ces connaissances accessibles à un grand public doit adapter son langage au niveau de ceux auxquels il s'adresse.

Cette adaptation implique généralement de recourir à des compromis, et ceux-ci sont plus ou moins graves. Il faut éviter qu'ils le soient trop! Mais elle implique surtout la nécessité de ne pas dénaturer le contenu de ces connaissances. Entre ces deux exigences à respecter, le diffuseur place son curseur et cherche ensuite à ne pas le faire trop varier de position.

J'ai lu certaines des œuvres de Florence Porcel et j'ai écouté ses émissions sur Youtube. J'ai voulu tester sur un sujet particulièrement difficile: la découverte des ondes

gravitationnelles. J'ai été favorablement impressionné! Le résultat mérite le détour... et me laisse admiratif.

Ma propre expérience de diffuseur des connaissances m'a révélé une caractéristique assez générale des séances publiques. Les gens arrivent souvent porteurs d'une certaine dose d'anxiété: «Est-ce que je vais comprendre? Est-ce que je suis assez intelligent? Et si je ne comprends rien, je vais être face au constat de ma propre infériorité, dans quel état vais-je me trouver à la fin de la conférence si cela se produit?» Ils ont donc grand besoin d'être rassurés. Que le conférencier prononce trois mots inconnus, et ils sont désorientés, et ils «zappent»: c'est un échec, un gaspillage de temps... Et c'est mauvais pour le moral!

Face à cette difficulté, le fait que Florence Porcel ne soit pas titulaire d'un diplôme en astronomie est un atout, et elle sait en jouer très habilement. L'auditeur se sent alors en bonne compagnie et, prenant acte du fait qu'elle a eu, elle aussi, des difficultés à comprendre, gageant qu'elle saura lui expliquer sans l'humilier, il va se laisser guider.

On peut ne pas être toujours d'accord avec les textes du livre de Florence Porcel. On voudrait ici et là lui souffler des formules interrogatives, des mots exprimant le doute ou une simple prudence. Pourtant, le lecteur peut se rassurer, il s'agit de points de détails. Laissons-nous emporter par l'enthousiasme communicatif de Florence!

Hubert Reeves

Préambule

Bonjour à tous! Je suis Florence Porcel, *community manager* officielle de l'Univers, et je vous souhaite la bienvenue dans ce nouvel ouvrage adapté de mon podcast vidéo. Après vous avoir proposé un voyage dans le Système solaire, je vous emmène maintenant à la découverte de notre Univers...

Comme tout ouvrage de vulgarisation scientifique, il faut le replacer dans le contexte de son époque: il n'est qu'un instantané de l'état de nos connaissances au moment de sa publication. C'est le risque du métier: parfois, la science progresse plus vite que le processus de sortie d'un livre!

Mais c'est également toute la beauté de notre époque: malgré les nombreuses années (voire dizaines d'années!) nécessaires à la conception et à la construction d'une mission spatiale, d'un accélérateur de particule, ou d'un télescope, le talent et l'opiniâtreté des scientifiques et des ingénieurs qui reçoivent et interprètent les données nous offrent des réponses qui repoussent toujours plus loin les

frontières de la connaissance. Et quand on sait que, surtout en cosmologie, la moindre réponse ouvre sur cent questions, ce délicieux vertige est permanent.

Si vous avez déjà eu l'occasion de lire quelques-uns de mes ouvrages, sachez que celui-ci sera parfois un peu plus complexe, un peu plus technique. Mais rassurez-vous : aucune équation, et des analogies dans tous les sens pour tenter de rendre concrets des concepts parfois trop abstraits. Et puis, vous savez quoi ? Ce n'est pas grave, de ne pas tout comprendre. Parfois, on peut buter sur une explication – mais il n'y aura ici ni examen une fois la dernière page tournée, ni interro surprise si par bonheur nos routes se croisent !

Laissez-vous porter. Notre monde, dans ses intimités quantique et cosmologique, est si surprenant, si bouleversant, et si bizarrement dérangent qu'aucun être humain ne le comprend vraiment. Je vous propose un voyage dans ce que nous avons réussi à savoir, avec plus ou moins de certitudes, à travers les chemins empruntés par les scientifiques pour tenter de saisir ce qui leur échappe encore, à eux aussi. Et c'est ça qui est passionnant !

Prenez ma main, je vous emmène depuis très loin dans le temps (le Big Bang) jusque très loin dans l'espace (l'hypothèse des multivers), en passant par les mystères scientifiques les plus tenaces (l'énergie et la matière noires), sans oublier de rendre visite à des objets exotiques (les trous noirs, les étoiles à neutrons et l'antimatière) ainsi qu'à des mondes plus ou moins semblables au nôtre (les exoplanètes).

Préambule

Ensemble, apprivoisons les mots qui font peur et la physique la plus déroutante. Et vous savez pourquoi? Parce que tout ceci, c'est notre histoire. Et croyez-moi... c'est l'histoire la plus folle qui soit!

1

La fabrique de l'Univers

Commençons par un chapitre un peu spécial : voici un tuto pour fabriquer notre Univers. Parmi les ingrédients, de l'espace, du temps, et des énergies phénoménales. C'est parti !

Le Big Bang n'est pas l'instant zéro

Qu'est-ce que le Big Bang? Comme le disait si bien une éminente philosophe non-humaine du xxiii^e siècle nommée Leeloo¹: «Boum! Big bada boum!» Oui... Mais en fait, NON: le Big Bang n'est pas un Gros Boum. Pourquoi ce nom, alors? C'est l'astronome anglais Fred Hoyle qui l'a inventé en 1949 pour nommer une des théories de l'époque qui décrivait effectivement une sorte d'explosion. Puis la théorie a évolué, jusqu'à enterrer définitivement le concept d'explosion primordiale, et elle est devenue l'un des modèles les plus fiables à l'heure actuelle. Mais le terme «Big Bang», lui, est resté. Pas de bol.

Le Big Bang n'est donc pas une explosion. C'est bien beau de savoir ce que ça n'est pas, mais c'est encore mieux de définir ce que c'est! L'expression est utilisée indistinctement pour évoquer deux choses très différentes. Si vous parlez à des scientifiques, ils la comprendront comme une version courte du «modèle du Big Bang» qui décrit l'ensemble des étapes de l'évolution de l'Univers jusqu'aujourd'hui et qui reste à l'heure actuelle une des théories les plus fiables du monde scientifique – parce que corroborée par de très nombreuses observations et mesures dans des domaines aussi différents que l'astrophysique et la physique des particules. Pour eux, le Big Bang est donc l'histoire de l'Univers qui se décline en plusieurs étapes (que je vais vous détailler plus loin, tuto oblige!).

En revanche, les non-spécialistes comme vous et moi comprenons l'expression comme désignant le moment originel, l'endroit où quelque chose a émergé du néant...

Or, cette idée, en plus d'être reçue, a toutes les chances d'être fausse : on l'imagine comme l'instant zéro, ou on le décrit comme un point de dimension nulle et d'énergie infinie... ce qui n'existe pas en physique ! (Vous serez d'accord pour dire que c'est embêtant, hashtag euphémisme.) Pour le dire autrement, le Big Bang en tant qu'« origine de l'Univers » n'a pas de sens et on se fourre le doigt dans l'œil jusqu'au coude gauche en s'obstinant à garder cette image en tête.

Mettons-nous bien dans le crâne que « Big Bang » est juste la version feignasse de « le-modèle-du-Big-Bang-qui-décrit-l'évolution-de-l'Univers », et voyons en quoi cette idée éculée d'instant zéro (qui n'existe pas, pardon d'insister) peut éventuellement ressembler de loin, parce qu'il nous est inaccessible, à un concept scientifique.

Étape n° 1 : l'ère de Planck (avant 10^{-43} s)

Au tout début de son histoire, notre Univers était minuscule. Si minuscule qu'on ne peut pas se le représenter, et qu'aucune théorie mathématique n'existe pour le décrire. C'est « l'atome primitif » qu'avait imaginé le prêtre et physicien belge Georges Lemaître et qu'on nomme aujourd'hui « ère de Planck », du nom du physicien allemand Max Planck.

Cette période n'a duré qu'un dix-millionième de milliardième de milliardième de milliardième de milliardième (soit 10^{-43}) de seconde. Ce fut bref, mais intense... Cette durée, la plus petite que nous puissions appréhender avec nos outils physiques actuels, s'appelle le temps de Planck.

On spécule (j'insiste: ce sont des théories mathématiques, pas des données issues d'expériences ou d'observations) que pendant l'ère de Planck, l'Univers était très dense et très chaud. Quand je dis très chaud, on évalue ladite température à plus de 10^{40} K, soit plus de dix mille milliards de milliards de milliards de milliards de degrés Celsius. Dans cette fournaise, il n'y a évidemment pas de matière; en tout cas, pas sous la forme qu'on lui connaît aujourd'hui. Elle existe, mais sous son autre forme: l'énergie. Et voilà, cette énergie, c'est le vide quantique, le troisième ingrédient dont vous avez besoin pour fabriquer l'Univers, avec l'espace et le temps.

Comme vous l'avez compris, le vide quantique n'a de «vide» que le nom. Les analogies dans ce domaine sont très approximatives et ont leurs limites, mais voyez ça comme un océan de potentialités. Si on frappe la surface d'un océan, on lui communique de l'énergie, ce qui fait jaillir des gouttes qui nous éblouissent. Ces gouttes existaient avant, puisqu'elles forment l'océan, mais elles n'avaient pas d'existence propre, *en tant que goutte*.

Le vide quantique n'est pas fait d'eau et n'a pas de surface, mais c'est le même principe: il est constitué de «particules virtuelles» qui se trouvent dans l'état d'énergie le plus bas, et si on l'agite suffisamment fort, donc avec suffisamment d'énergie, une particule peut en sortir et exister en tant que telle. (Oui, une particule, c'est un peu le Perceval d'un champ quantique².)

Pour être plus précise encore, le vide quantique est l'ensemble des champs quantiques, comme si un océan était constitué d'eaux différentes mais mélangées. Chaque

champ engendre les particules qui lui correspondent: le champ de Higgs, par exemple, engendre les particules de Higgs (les fameux bosons).

Le vide quantique fait également partie de ce qui reste de l'Univers si vous voulez retirer tout ce qu'il y a dedans. Demeurent trois entités: l'espace, le temps, et ce vide quantique, virtuellement plein à craquer.

La présence du vide quantique pendant l'ère de Planck est la seule chose dont nous soyons sûrs. Et s'il y avait eu des physiciens et des physiciennes à l'époque, ils n'auraient pas pu distinguer de champs différents, pour la simple et bonne raison qu'ils ne faisaient qu'un. C'est le refroidissement futur de l'Univers qui donnera à tous ces champs leur existence propre, avec leurs propriétés intrinsèques, et qui permettra à des particules diverses de passer du statut de particule virtuelle à celui d'objet physique détectable et mesurable.

Le vide quantique de l'ère de Planck est un monde chaotique, rempli de soubresauts et de hoquets qui le déforment et qui, pendant cette période où la chaleur et la densité sont à leur paroxysme, le déchirent succinctement. Ces «déchirures succinctes» peuvent être des trous noirs évaporés immédiatement, ou bien des particules virtuelles contenant autant d'énergie qu'une seconde de production d'énergie d'une centrale nucléaire. C'est un monde étrange où les notions d'espace et de temps n'ont pas encore de sens...

Cette ère de Planck, donc, c'est un «endroit-moment» que nous ne pouvons pas observer et que nous ne pouvons

pas décrire mathématiquement. Il nous échappe, le bougre, pire qu'une savonnette chevauchée par Bip-Bip poursuivie par Coyote sur une patinoire en pente raide. C'est l'inconnue ultime. Nous n'allons évidemment pas rester coincés à cette étape. Mais pour avancer, il va nous falloir quelques notions de base indispensables. Après les champs quantiques, je vous présente (tadaaaaaam!) : la brisure spontanée de symétrie. (Ne fuyez pas, tout va bien se passer.)

Permettez-moi une métaphore culinaire: pour faire une vinaigrette, il faut du sel, du poivre, de la moutarde, mais surtout de l'huile et du vinaigre. Le terme souvent important en cuisine est « mélanger ». Plus vous mélangez votre vinaigrette (donc plus vous mettez d'énergie dans ce geste), moins vous parviendrez à distinguer les éléments qui la composent. Mais si vous la laissez reposer tranquillement au fond du saladier... donc si vous laissez l'énergie se dissiper... donc si vous la laissez se refroidir... alors au bout d'un moment, l'huile et le vinaigre vont se dissocier.

En physique, l'équivalent s'appelle la brisure spontanée de symétrie: on avait un tout homogène, et puis à un moment donné, pouf!, on a un champ quantique d'un côté et un autre champ quantique de l'autre. Mais attention, comme toute analogie, celle-ci a ses limites: si l'huile et le vinaigre sont séparés spatialement, ce n'est pas le cas des champs. Comme je le disais tout à l'heure pour l'océan: le vide quantique est constitué de sous-ensembles, mais ces derniers sont parfaitement superposés. Formulé autrement, on ne trouve pas le champ de Higgs d'un côté de l'Univers et le champ électromagnétique de

l'autre: les champs nous immergent, ils emplissent l'Univers, nous vivons dedans.

Les cosmologistes ont de bonnes raisons de penser que lors de l'ère de Planck, les quatre forces fondamentales de la physique (la gravitation, l'électromagnétisme, la force nucléaire faible et la force nucléaire forte, définies plus bas) n'étaient qu'une seule superforce. Un physicien ou une physicienne de l'ère de Planck n'aurait jamais pu imaginer qu'il puisse y en avoir plusieurs, mais voilà: nous en distinguons quatre aujourd'hui, et nous croyons qu'initialement, elles n'en faisaient qu'une.

Je vous la fais courte: on a d'abord compris au XIX^e siècle que l'électricité – le déplacement de particules chargées – et le magnétisme – les forces attractives ou répulsives des matériaux –, que l'on pensait être deux forces différentes, pouvaient en fait n'en faire qu'une – et pouf!, le physicien anglais James Clerk Maxwell (1831-1879) formalise l'électromagnétisme, qui est devenu l'une des quatre forces fondamentales de la physique. Plus tard, on découvre les forces nucléaires faible – à l'origine de la radioactivité – et forte – assurant la cohésion des particules dans le noyau des atomes –, et hop!, les physiciens réalisent qu'à un moment donné, j'y reviendrai, l'électromagnétisme et la force faible ont été unifiées elles aussi en une force «électrofaible».

L'étape ultime, c'est l'unification des quatre forces fondamentales pendant l'ère de Planck avec, à la clé, la théorie qui décrirait cette superforce. Mais voilà, l'une d'entre elles, la gravité, est mathématiquement incompatible avec les autres: Gravity fait de la résistance. C'est pour

ça qu'on ne parvient pas à comprendre ce moment-là : on ne trouve pas de modèle qui puisse décrire ce qui se passe dans un monde où la gravitation et les trois forces quantiques ne font plus qu'une ! Enfin, il y a des tentatives d'explication, mais pour le moment, rien qui ne soit étayé expérimentalement, comme nous le verrons au chapitre 7.

Revenons à l'ère de Planck avant de la quitter une bonne fois pour toutes. Sa fin serait marquée par une brisure spontanée de symétrie : la gravitation se désolidariserait de la superforce pour en devenir une à part entière et vivre sa vie loin des basses considérations quantiques.

Étape n° 2 : la Grande Unification (de 10^{-43} s à 10^{-35} s)

Vous allez me dire : mais pourquoi appelle-t-on cette deuxième étape « la Grande Unification » puisque les quatre forces, qui étaient unifiées pendant l'ère de Planck, ne le sont plus ? Excellente remarque, vous êtes très perspicace, je vous félicite !

Tout est de ma faute (envoyez vos noms d'oiseaux et les images desdits piafs en pièces jointes sur Twitter à l'adresse @FlorencePorcel) : j'aime bien raconter les histoires dans l'ordre chronologique. Or, ce n'est pas comme ça qu'on l'a comprise, cette histoire. La compréhension de l'évolution de notre Univers a été progressive, en remontant dans le temps pour piger comment on a pu en arriver là.

Sauf que ça me perturbe, moi. Je ne sais pas vous, mais personnellement, j'aime bien regarder les films à l'endroit et commencer les livres par la première page. Du