

Gianfranco Bertone

# **LE MYSTÈRE de la MATIÈRE NOIRE**

DANS LES COULISSES  
DE L'UNIVERS

TRADUIT DE L'ANGLAIS PAR JACQUES PAUL

PRÉFACE DE FRANÇOISE COMBES  
Astronome à l'Observatoire de Paris,  
membre de l'Académie des Sciences

DUNOD

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en anglais en 2013 par Oxford University Press, sous le titre : *Behind the Scenes of the Universe: From the Higgs to Dark Matter*.

*Behind the Scenes of the Universe: From the Higgs to Dark Matter*, First Edition was originally published in English in 2013. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

*Illustration de couverture :*

© Gianfranco Bertone

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod, Paris, 2014  
ISBN 978-2-10-071020-1

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

Nous sommes infiniment petits dans l'univers. Mais ce qui est encore plus fascinant est de penser que nous sommes faits de matière très spéciale, qui ne représente que 15 % de la masse dans l'univers, et que l'essentiel, les 85 % restants, est d'une nature complètement différente, la matière noire. Celle-ci est partout, nous entoure dans le système solaire, dans notre Galaxie la Voie lactée, dans les galaxies extérieures à la nôtre, les amas de galaxies et les grandes structures filamentaires qui peuplent l'univers. Les particules de matière noire nous traversent sans interagir avec notre matière ordinaire. Elles jouent à cache-cache même dans les plus grands accélérateurs de particules, comme le LHC au CERN, qui n'ont pas pu la détecter. Les physiciens des particules s'entendent avec les astronomes pour proposer des candidats exotiques, en dehors des particules élémentaires connues. Mais les preuves manquent pour identifier les suspects.

Gianfranco Bertone nous prend par la main et nous guide dans les méandres de la plus grande énigme des temps modernes : de quelle matière notre univers est-il fait ? Dès le début, on apprend que nous sommes à un point critique de cette enquête : durant la douzaine d'années qui vient, nous allons savoir si toutes les recherches directes et indirectes de l'existence des particules exotiques sont une piste valable, à poursuivre, ou bien s'il faudra trouver autre chose, car toutes les recherches auront été négatives. Le grand accélérateur européen LHC, près de Genève, est en train de produire des particules avec de plus en plus d'énergie. Il est capable d'accélérer des protons, de les faire entrer en collision, et de produire dans cette collision une énergie égale à 7 000 fois la masse du proton. Ainsi de nombreuses particules sont créées à

partir de cette énergie, et même si les particules de matière noire sont encore furtives dans les débris de la collision, elles sont détectées par défaut. Toutes les autres particules dans la collision sont identifiées, et aucune parcelle d'énergie n'est perdue. Jusqu'à présent, toute l'énergie a été retrouvée avec des particules connues du modèle standard. Ceci permet déjà de conclure que si la particule de matière noire est bien un WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*), un des meilleurs candidats actuels, alors sa masse doit être au moins supérieure à 1 000 fois la masse du proton, sinon elle aurait déjà été remarquée.

Revenant en arrière dans le temps, Gianfranco Bertone nous fait part de la façon progressive dont la matière noire nous est apparue dans l'histoire. Il est certain que les astronomes ont eu beaucoup d'occasions de se rendre compte de son existence, mais l'idée ne s'est imposée qu'avec le temps. Par la cinématique, les courbes de rotation des galaxies, la force gravitationnelle perpendiculaire au plan de la Voie lactée, à chaque fois la masse visible apparaissait insuffisante. Pourtant, ce n'était pas une surprise, puisqu'on savait que des résidus de la formation stellaire ne rayonnent pas : non seulement naines brunes et étoiles manquées, mais aussi étoiles à neutrons, naines blanches, résidus de fin de vie des étoiles, et trous noirs. Et encore les nébuleuses de gaz, les objets de nature météorique, etc. Tout cela n'était pas bien connu, leur quantité mal établie, et pouvait rendre compte pour une bonne part de la masse manquante.

Aujourd'hui nous sommes bien mieux équipés pour traquer la matière noire : parmi nos moyens modernes, les lentilles gravitationnelles tiennent une grande place. Comme en optique, ces lentilles, des masses importantes sur la ligne de visée, dévient les rayons lumineux et produisent des mirages, soit plusieurs images de quasars lointains, ou seulement des déformations des galaxies d'arrière-plan, qui nous permettent de déduire la distribution de matière noire sur la ligne de visée. Parmi les autres moyens dont nous disposons pour falsifier ou confirmer nos hypothèses et modèles, citons surtout les simulations numériques, dont les progrès ont été fantastiques, des calculs rudimentaires des frères Toomre pour simuler l'interaction entre galaxies, jusqu'aux énormes simulations cosmologiques de tout l'univers de matière noire, dites du millenium (10 milliards de particules de matière

noire). Par des simulations en 1997, les astrophysiciens Navarro, Frenk et White ont prédit une accumulation de matière noire au centre des galaxies, dans un profil universel. Les simulations prédisent aussi l'existence de milliers de satellites noirs autour de galaxies comme la Voie lactée. Bien que ces prédictions n'aient pas été vérifiées, ce sont elles qui sont utilisées pour estimer la quantité de matière noire locale, et inspirer les recherches directes dans les laboratoires souterrains. D'après ces modèles, il nous faut rassembler toute la matière noire comprise dans un volume comme la Terre pour en faire un gramme ! on s'aperçoit de la difficulté de la détection directe de ces particules.

Afin de mieux comprendre pourquoi cette nouvelle matière n'a pas été prédite par le modèle standard de la physique des particules, Gianfranco Bertone déploie ses talents pédagogiques pour décrire l'édifice actuel des particules élémentaires, quarks, fermions, bosons jusqu'au boson de Higgs récemment découvert qui donne leur masse à toutes les particules, avec des métaphores éclairantes : les automobilistes hollandais seraient des bosons, tous à la même vitesse, alors que les Américains des fermions, à des vitesses individuelles aléatoires. Comment étendre le modèle standard, qui est pourtant un édifice cohérent, et complet ? Par la supersymétrie, où chaque fermion est associé à un boson, et réciproquement. Cette théorie a l'avantage de proposer une unification de toutes les forces à grande énergie. Toutes les particules supersymétriques ont des masses bien supérieures à celles connues, ce qui explique pourquoi elles n'ont pas été détectées jusque-là. L'existence de particules très massives est aussi présente dans les modèles d'univers à plus de quatre dimensions : nous ne voyons dans notre espace que la version à basse énergie, mais les états excités de ces particules existeraient dans les autres dimensions.

Dans toutes ces théories, la particule suspecte (WIMP) la plus légère est le neutralino, donc la plus stable, car toutes les autres particules peuvent se désintégrer, par un chemin qui se termine en neutralino. Attention, toutes ces particules sont encore des chimères, des monstres, tant que leur existence n'a pas été vérifiée. Mais de nombreuses autres solutions ont été proposées, en dehors des WIMPS, les plus célèbres sont les axions, ou les neutrinos stériles. Ces derniers ont été souvent étudiés ces dernières années, comme candidats de matière noire tiède.

Le livre de Gianfranco Bertone est agréable à lire, il est truffé d'anecdotes historiques et de citations : l'auteur se promène dans les méandres du travail scientifique, et raconte surtout l'histoire de la découverte et pas seulement l'objet de la découverte. Il invite le lecteur à prendre le chemin des écoliers, il fait des digressions, des analogies et métaphores, pour rendre compte de la portée d'une découverte et de ses conséquences. Certains éléments reviennent plusieurs fois, pour être décrits sous un jour nouveau. Nous n'avons pas l'impression d'une recherche méthodique, mais d'une promenade, où tous les indices nous apparaissent en pleine lumière. Non seulement les particules, mais tous les astres et phénomènes qui nous mettent sur la voie, étoiles, gaz interstellaire, supernovae, trous noirs... entrent dans le jeu.

Selon la parole de Confucius : Il est très difficile de chercher un chat noir dans l'obscurité, surtout s'il n'y a pas de chat. Et si la matière noire n'existait pas ? L'auteur nous décrit aussi les solutions alternatives, sous forme de gravité modifiée. La solution proposée par Moti Milgrom (MOND) est satisfaisante au niveau des galaxies, mais rencontre des problèmes au niveau des amas. L'exemple de l'amas du boulet permet de séparer matière noire et visible, et prouve l'existence d'une autre sorte de matière que les étoiles.

Les derniers chapitres décrivent les outils ou les instruments de l'enquête, que ce soit pour la création de particules exotiques dans les accélérateurs, la détection directe de matière noire dans les tunnels, ou bien la détection indirecte par les rayons gamma. Ici aussi, l'histoire joue un grand rôle, et les progrès techniques permettent de faire des prouesses : 400 collisions de protons par seconde dans le LHC, et mille téra-bytes par seconde d'informations ; on comprend pourquoi les physiciens nucléaires sont à la pointe du progrès pour le traitement de l'information !

Quel avenir après le LHC ? Pourra-t-on construire un accélérateur encore plus puissant ? Quel est l'état de la recherche dans les tunnels de particules exotiques ?

Des espoirs déçus, et parfois des résultats positifs clamés haut et fort, qui sont pourtant réfutés par d'autres expériences. Les experts s'accordent à dire que la nouvelle génération de détecteurs, pourrait mettre un point final à la recherche de WIMPS. Mais la matière noire pourrait-

t-elle être sous forme d'axions, ou de neutrinos stériles ? Là aussi, les instruments devraient être capables de trancher dans une douzaine d'années, soit vers le « cauchemar » : aucun signe de physique nouvelle, soit vers le « rêve », la détection de ces particules exotiques !

Les télescopes en rayons gamma sont activement utilisés pour détecter les manifestations de l'annihilation des particules exotiques. L'énergie des rayons gamma devrait porter la signature de la particule ou masse désintégrée. Le gros problème de ces recherches est que les astres émettent aussi des rayons gamma. Même si, pour l'instant, aucune détection indirecte de matière noire n'est convaincante, la recherche des rayons gamma d'annihilation a déjà été très utile, en faisant progresser nos connaissances sur les émetteurs astrophysiques de rayons gamma.

Finalement, si l'existence de la matière noire s'avère une hypothèse fautive dans une douzaine d'années, toute cette histoire étudiée fébrilement pendant près d'un demi-siècle aura été une belle illustration du fait que la science avance en dents de scie. Comme dans les meilleurs polars de Conan Doyle, l'enquête de nos Sherlock Holmes scientifiques peut encore subir plusieurs coups de théâtre !

Françoise Combes  
Astronome à l'Observatoire de Paris,  
membre de l'Académie des Sciences





*À Nadia. Et à notre fils Francesco,  
la plus agréable distraction dont un auteur peut rêver.*



# AVANT-PROPOS

Une extraordinaire découverte a ébranlé récemment les fondements de la cosmologie et de la physique des particules. La révolution scientifique qu'elle a déclenchée, encore loin d'être terminée, a modifié en profondeur notre compréhension de l'univers dans lequel nous vivons.

Dès les années 1920 et 1930, des astronomes précurseurs avaient déjà noté des anomalies suspectes du mouvement des corps célestes dans des galaxies lointaines et dans des amas de galaxies. Mais ce n'est qu'à la fin du xx<sup>e</sup> siècle que la communauté scientifique a été confrontée à une conclusion étonnante : l'univers est rempli d'une substance aussi insaisissable qu'inconnue, *fondamentalement différente* de tout ce que nous avons jamais vu avec nos télescopes ou mesuré dans nos laboratoires.

Elle s'appelle la *matière noire* et elle constitue l'un des défis les plus pressants de la science moderne. Démontrer son existence est bien plus qu'une curiosité académique, dans la mesure où la matière noire fournit l'échafaudage invisible qui maintient ensemble toutes les structures astrophysiques de l'univers. Faites-la disparaître loin d'une galaxie comme notre propre Voie lactée, et toutes ses étoiles et planètes s'égailleraient comme une volée de moineaux dans l'espace intergalactique !

Au cours des 30 dernières années, nous avons beaucoup appris sur les propriétés de cette mystérieuse substance. Par exemple, nous avons mesuré son abondance dans l'univers avec une remarquable précision et nous savons maintenant qu'elle est bien plus abondante que la matière qui nous est familière. Nous ne connaissons pas encore la nature de la matière noire, mais nous avons de bonnes raisons d'avancer qu'*elle doit être faite de particules nouvelles, encore inconnues*, à moins que nous

ayons été entièrement trompés par un large éventail d'observations astrophysiques et cosmologiques.

Les conséquences de cette découverte sont stupéfiantes. Le spectacle extraordinaire que le cosmos propose – la ronde des planètes autour des étoiles, l'élégance des nébuleuses lointaines, la collision violente de galaxies géantes, et, en fin de compte, le mystère même de notre propre existence – se déroule dans un théâtre colossal et invisible fait de halos de matière imperceptible, sans cesse en croissance. Et nous autres, en tant qu'êtres humains, sommes faits d'une forme de matière assez rare dans l'univers : nous sommes *spéciaux*, d'une manière que nous n'avons jamais soupçonnée.

Une course mondiale est en cours pour identifier la matière noire, avec des dispositifs expérimentaux comme l'accélérateur de particules du CERN et une variété d'expériences sur les astroparticules opérant sous terre comme dans l'espace.

Dans ce livre, destiné aux lecteurs du grand public s'intéressant à la science, je décris les stratégies des physiciens pour aller *dans les coulisses de l'univers*, afin d'identifier la nature de la matière noire. Je soutiendrai que nous sommes sur le point d'être témoins d'un changement décisif de paradigme de la physique. Trente ans se sont écoulés depuis que des théories de premier plan ont été proposées pour résoudre le problème de la matière noire. Au moins deux générations de physiciens ont fait des prévisions détaillées concernant un vaste domaine de recherches expérimentales et ont construit des expériences de plus en plus grandioses et performantes pour trouver les particules de matière noire.

Le temps est maintenant venu soit de réfuter ces théories et passer à de nouvelles idées, soit de découvrir la matière noire et ouvrir la voie à une nouvelle ère de la cosmologie et de la physique des particules.

Gianfranco Bertone

# REMERCIEMENTS

Dans l'écriture de ce livre, j'ai grandement bénéficié de perceptions précieuses et d'informations utiles que m'ont fournies de nombreux collègues, y compris certains précurseurs de la révolution de la matière noire dans les années 1970, et d'autres qui ont jeté les bases des recherches de la matière noire dans les années 1980. Je tiens à remercier en particulier Albert Bosma, David Cline, John Ellis, Adam Falkowski, Jonathan Feng, Carlos Frenk, Dan Hooper, Rocky Kolb, Jerry Ostriker, Jim Peebles, Bernard Sadoulet, Joe Silk, George Smoot, Alar Toomre, Juri Toomre, Scott Tremaine et Michael Turner pour de très intéressantes discussions, allant de simples vérifications jusqu'à de longues discussions sur l'histoire de la physique et de l'astronomie.

Des remerciements spéciaux à Roberto Trotta, pour ses commentaires, nombreux et utiles, à propos du manuscrit ; à Auke-Pieter Colijn, pour avoir suggéré le parallèle entre l'expérience de Michelson-Morley et le « scénario cauchemar » évoqué dans le texte ; à Lorenzo Tripodi, pour des conversations nombreuses et passionnantes. Merci aussi à Oxford University Press, et en particulier, à Sonke Adlung pour avoir cru dans ce projet et pour son soutien à la proposition initiale de publication.

Je suis redevable à de nombreux amis, collègues, post-doctorants et étudiants avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, dont Donnino Anderhalden, Chiara Arina, Ted Baltz, Lars Bergstrom, Enzo Branchini, Torsten Bringmann, David Cerdeño, Marco Cirelli, Jan Conrad, Juerg Diemand, Joakim Edsjo, Mattia Fornasa, Fabio Iocco, David Merritt, Georges Meynet, Aldo Morselli, Miguel Pato, Lidia Pieri, Roberto Ruiz de Austri, Guenter Sigl, Joe Silk, Hamish Silverwood, Charlotte Strece,

Tim Tait, Marco Taoso, Roberto Trotta, Christoph Weniger et Andrew Zentner ; tous ont participé à d'innombrables conversations et séances de brainstorming qui ont joué un rôle important en faisant prendre formes aux idées abordées dans ce livre.

Je tiens à remercier de leur soutien les instituts et les organismes de financement qui ont rendu possible la collaboration avec ces éminents scientifiques. En particulier, je suis heureux de remercier l'appui du Conseil Européen de la Recherche pour une subvention à destination de chercheurs indépendants en début de carrière, ainsi que le soutien de l'institut GRAPPA de l'université d'Amsterdam. J'aimerais aussi remercier le directeur et le personnel de l'institut Kavli de physique théorique pour leur hospitalité et le soutien financier rendu possible par leur subvention de la Fondation Simons au cours des dernières étapes de ce projet.

Un merci chaleureux à ma famille, surtout à Antonio, Nadine, Sophie, Alex et mes parents, pour avoir fourni, consciemment ou inconsciemment, maintes suggestions pour ce livre.

Enfin, je remercie ma femme, Nadia. Sans son constant soutien, ses encouragements, sa patience et ses précieuses suggestions – la plus importante étant peut-être celle du « début d'écriture » – ce livre n'aurait jamais été terminé. Et merci à notre fils Francesco, qui est né trois mois après que ce projet ait été lancé, en fournissant la plus agréable distraction dont jamais un auteur ne peut rêver.

# UN SOMBRE MYSTÈRE

Le 20 décembre 2010, une délégation de haut rang du Conseil des affaires de l'État de la République Populaire de Chine inaugurait, avec des représentants de l'université Tsinghua de Pékin, le laboratoire souterrain d'astroparticule le plus profond du monde. D'un volume utile de 1 400 mètres cubes, il est creusé à grande profondeur au cœur des monts Jinping, dans la province du Sichuan.

Treize mille kilomètres plus au sud, au même moment ou presque, une équipe scientifique injectait de l'eau chaude dans la glace du plateau Antarctique pour forer le dernier d'une série de 80 puits de 60 centimètres de diamètre et profond de 2 500 mètres, et y déployer la dernière des chaînes de détecteurs du télescope IceCube. C'était ainsi la fin d'une phase de construction commencée sept ans plus tôt et le début des observations.

Dans un site encore plus improbable, le 19 mai 2011 à 350 kilomètres *au-dessus* du sol, une équipe d'astronautes, à l'aide de bras robotiques, extrayait AMS-02, un détecteur d'une masse de six tonnes, de la soute de la navette spatiale *Endeavour* de la NASA pour le monter sur la Station Spatiale Internationale.<sup>1</sup>

---

1. Des images spectaculaires de ce transfert sont disponibles sur *YouTube* à l'adresse <http://www.youtube.com/watch?v=RqksBepilVs>.

Ce ne sont là que les dernières en date d'une liste toujours plus longue d'installations scientifiques majeures pour l'astroparticule, domaine scientifique en plein essor émergeant à l'intersection de la physique des particules et de l'astrophysique. La liste mêle des détecteurs de rayons gamma et d'antimatière en orbite autour de la Terre à bord de satellites ou montés sur la Station Spatiale Internationale, des télescopes à neutrinos enfouis dans les glaces du pôle Sud ou ancrés au fond de la Méditerranée, des accélérateurs de particules brisant les particules élémentaires à ultra-haute énergie.

Les scientifiques espèrent qu'en combinant les données de toutes ces expériences, ils seront en mesure de faire la lumière sur la *matière noire*, l'un des plus grands problèmes non résolus de la science moderne, un mystère qui défie notre conception de l'univers et de la place que nous y occupons. Ce mystère s'enracine loin dans le temps, mais le problème de la matière noire ne s'est manifesté que très récemment dans toute son implacable complexité, ébranlant les fondements de la cosmologie et de la physique des particules.

La compréhension de l'univers s'était plutôt déroulée sans à-coups une fois que son expansion fut mise en évidence par Hubble au début du  $xx^e$  siècle. Mais dans les années 1970, quand les scientifiques s'efforcèrent de bâtir un modèle cosmologique cohérent en rassemblant les nombreuses pièces du puzzle cosmique (comme l'abondance des éléments chimiques légers dans l'univers, le mouvement des étoiles dans les galaxies et la dispersion des vitesses des galaxies dans les amas), les pièces ne semblaient tout simplement pas s'ajuster. Pour compléter le puzzle, il fallait postuler l'existence d'une nouvelle forme de matière, la *matière noire*.

Dans un article paru le 1<sup>er</sup> octobre 1974 dans le prestigieux *Astrophysical Journal*, des cosmologistes de renom de Princeton décrivaient le changement de paradigme qui s'opérait alors avec ces mots choquants:<sup>1</sup>

---

1. J. P. Ostriker, P. J. E. Peebles, and A. Yahil, *The size and mass of galaxies, and the mass of the universe* (La taille et la masse des galaxies, et la masse de l'univers), *Astrophysical Journal* 193 (1974) pp. L1-L4.