

« Brillant et envoûtant » Carlo Rovelli



JORGE CHAM

DANIEL WHITESON

**TOUT
CE QUE
NOUS NE
SAVONS
PAS ENCORE**



Champs sciences

JORGE CHAM DANIEL WHITESON

Tout ce que nous ne savons
pas encore

Pas une année sans que les prédictions des physiciens ne soient vérifiées, de l'existence du boson de Higgs à celle des ondes gravitationnelles. Mais cette victoire cache pourtant une surprenante vérité : nous ne savons rien (ou presque) !

Des exemples ? La composition de 95 % de l'Univers reste une énigme, tout comme ce qu'il s'est vraiment passé durant le Big Bang. Et pourquoi est-il impossible d'aller plus vite que la lumière ? Quelle est l'origine des rayons cosmiques qui bombardent la Terre en permanence ? Mystère !

Non content d'exposer avec la plus grande clarté le peu que nous savons déjà sur l'infiniment petit et l'infiniment grand, cet ouvrage fait le point sur les grands défis lancés à la science. Il reste tant à découvrir... et c'est heureux !

Jorge Cham est roboticien et créateur du blog dessiné «PhD Comics» qui rassemble des milliers de visiteurs. **Daniel Whiteson** est physicien des particules. Il a développé une application visant à détecter les rayons cosmiques avec un smartphone.

Traduit de l'anglais (États-Unis) par Pierre Kaldy.

Flammarion

TOUT CE QUE NOUS NE SAVONS
PAS ENCORE

JORGE CHAM & DANIEL WHITESON

**TOUT
CE QUE
NOUS NE
SAVONS PAS
ENCORE**

**LE GUIDE
DE L'UNIVERS INCONNU**

TRADUIT DE L'ANGLAIS (ÉTATS-UNIS) PAR PIERRE KALDY

Champs sciences

Copyright © 2017 by Jorge Cham and Daniel Whiteson
Tous droits réservés
L'ouvrage original a paru en 2017 sous le titre *We Have No Idea*
aux Editions Riverhead Books.

© Flammarion, 2018, pour la traduction française.
© Flammarion, 2022, pour l'édition en « Champs »
ISBN : 978-2-0802-7537-0

Pour ma fille, Elinor

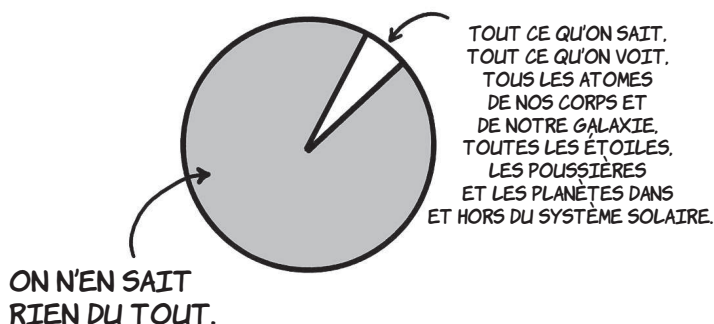
J. C.

À ma famille, qui m'a soutenu dans tous les chapitres de ma vie,
même quand ils contenaient de mauvaises blagues.

D. W.

INTRODUCTION

NOTRE CONNAISSANCE DE L'UNIVERS :



Aimeriez-vous savoir comment l'Univers a commencé, de quoi il est fait, comment va-t-il se terminer ? Comprendre d'où viennent le temps et l'espace ? Savoir si nous sommes seuls dans le cosmos ?

Domage, car ce n'est pas avec ce livre que vous aurez une réponse à ces questions.

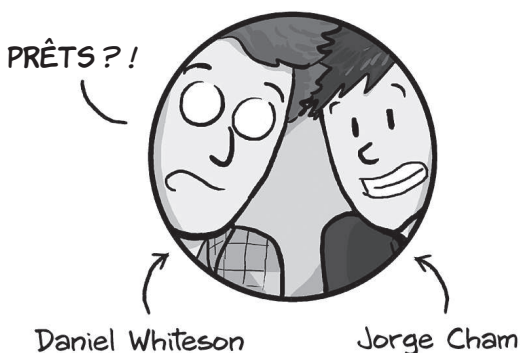
Il est plutôt consacré à tout ce que nous ne savons pas de l'Univers, à toutes ces grandes énigmes que vous croyez déjà résolues et qui, en fait, ne le sont toujours pas.

Souvent, on annonce aux informations une grande découverte qui répond enfin à une interrogation lancinante sur l'Univers. Mais combien d'entre nous avaient déjà entendu parler de cette fameuse question ? Et combien d'entre elles restent sans réponses ? Voilà pourquoi nous avons écrit ce livre : pour vous les présenter.

Dans les pages qui suivent, nous allons expliquer les plus importantes questions sur l'Univers qui restent à élucider et pourquoi ce sont de telles énigmes. Au terme de ce voyage, si vous pensez toujours que nous avons une certaine idée de ce qui se passe dans l'Univers ou de la manière dont il fonctionne vraiment, nous aurons échoué ! Vous aurez au moins l'avantage de savoir pourquoi nous n'en avons pas la moindre idée.

Notre objectif n'est pas de vous déprimer en évoquant tout ce que nous ignorons, mais bien au contraire de vous instiller un peu d'enthousiasme sur l'incroyable foule de domaines qui restent à explorer. Pour chaque mystère cosmique, nous dévoilerons ce que sa résolution pourrait signifier pour nous humains, et les surprises stupéfiantes que pourrait recéler chaque coin d'inconnu. Nous vous apprendrons à voir le monde sous un autre jour, car en comprenant ce que nous ne savons pas nous allons découvrir un avenir regorgeant de possibilités extraordinaires.

Alors installez-vous bien à votre aise dans votre canapé et soyez prêt à explorer les profondeurs de notre ignorance, car le premier pas dans la découverte est de savoir ce qui est encore inconnu. Embarquons maintenant pour un voyage à travers les plus grands mystères de l'Univers !



1

DE QUOI L'UNIVERS EST-IL FAIT ?

Où vous apprendrez que vous êtes vraiment bizarre
et spécial

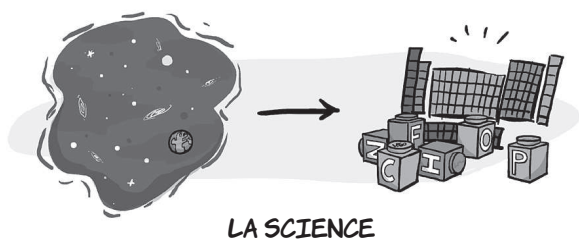


Si vous êtes un être humain (nous le supposons à partir de maintenant), vous êtes probablement légèrement curieux du monde qui nous entoure. Cela fait partie de notre nature humaine et des raisons qui vous ont poussé à choisir ce livre.

Ce n'est pas nouveau au sein de notre espèce. Depuis toujours, l'Homme s'est posé des questions très simples et bien compréhensibles sur le monde, du style :

objets et ce qui les compose, elle peut s'avérer infinie. S'il n'est pas nécessaire de mentionner toutes les parties de chaque objet, la liste se résume alors à un seul élément : « l'Univers ». Cette méthode, quoi que l'on fasse, pose clairement un problème.

Mais plus important encore, établir une liste ne répond pas vraiment à la question. Une réponse satisfaisante ne ferait pas que répertorier toute la complexité qui nous entoure, la diversité quasi infinie de tout ce que nous voyons autour de nous, mais la simplifierait aussi. C'est précisément là où triomphe le tableau périodique des éléments (celui avec l'oxygène, le fer, le carbone, etc.). Il décrit tous les éléments que les humains sont capables de voir, toucher, goûter¹ ou se jeter à la figure, et les résume en une centaine de briques élémentaires. Il révèle que l'Univers est organisé selon le même principe que le Lego. Avec les mêmes petites briques de plastique, vous pouvez faire un dinosaure, un avion ou des pirates, et même créer votre propre créature hybride volante de Dino-Pirate.



Exactement comme dans un jeu de Lego, il suffit de quelques briques élémentaires pour construire une foule de choses dans l'Univers : des étoiles, des roches, de la poussière, de la glace à la vanille, des lamas. Ce principe organisateur, où des objets complexes se composent d'éléments simples, nous sert à mieux comprendre les choses car nous pouvons les décomposer.

Mais l'Univers entier suit-il la philosophie du Lego ? Il n'y a aucune raison, à notre connaissance, pour simplifier les choses à ce point. Comme le savaient déjà les premiers hommes et femmes préhistoriques un tant soit peu scientifiques, le monde aurait pu prendre une autre tournure. Les savants préhistoriques Ook et

1. Oui, même la fois où votre copain de CE2 a goûté un lézard.

Groog ne pouvaient se fier qu'à leur vécu et associer beaucoup d'idées différentes à tout ce qui constitue l'Univers.

Le nombre de catégories pour chaque objet aurait pu être infini par exemple. Les rochers auraient été faits de particules élémentaires de rochers, l'air de particules élémentaires d'air, les éléphants de particules élémentaires d'éléphant (appelons-les des Jumbotrons). Et dans cet Univers hypothétique le tableau des éléments aurait été pratiquement infini.



LES PREMIERS PHYSICIENS

Ou, plus étrange encore, nous aurions pu vivre dans un Univers où les choses ne sont pas faites de minuscules particules. La roche serait alors constituée d'une matière-roche uniforme décomposable en morceaux toujours plus petits avec un outil toujours plus aiguisé. Cela aurait été conforme aux données recueillies par les professeurs Ook et Groog dans leurs célèbres expériences de collision entre rochers.

Nous mentionnons ces possibilités non parce que nous pensons que l'Univers y obéit, mais pour rappeler qu'il aurait pu se comporter ainsi et que cela pourrait encore être le cas pour une matière d'un autre type encore inconnue dans l'Univers.

C'est pourquoi les mystères de l'Univers non résolus que vous explorerez au fil des pages vont probablement stimuler votre imagination plutôt que de susciter un terrible sentiment de frustration ou d'abattement. Ils nous montrent tout simplement combien il nous reste de choses à découvrir !

Dans l'Univers que nous connaissons et aimons, les choses qui nous entourent s'avèrent faites de minuscules particules. Après des milliers d'années de réflexion et de recherche, nous disposons d'une

théorie très précise de la matière¹. De nos jours, nous sommes allés bien au-delà du tableau périodique des éléments et scrutons désormais les entrailles des atomes.

La matière telle que nous la connaissons est formée d'atomes issus des éléments du tableau périodique. Chaque atome comporte un noyau entouré d'un nuage d'électrons. Ce noyau contient lui-même des protons et des neutrons, lesquels sont constitués de quarks up et down. Avec seulement ces deux types de quarks et l'électron nous pouvons construire n'importe quel représentant d'un élément du tableau périodique. Quelle prouesse ! La liste des ingrédients de l'Univers a été réduite d'une infinité à la centaine d'éléments du tableau périodique, puis à juste trois particules. Tout ce que nous avons vu, touché, senti ou accroché d'un doigt de pied peut se construire à partir de ces trois briques élémentaires. Un grand bravo aux millions de cerveaux humains qui ont œuvré à cette découverte !



Mais si notre espèce peut se réjouir de ce brillant résultat, une telle description demeure incomplète sous deux aspects très importants.

1. La science sous sa forme moderne, avec ses expériences, ses données et ses blouses blanches, ne date que de quelques siècles, mais l'histoire de la pensée sur ce type de questions remonte à plusieurs milliers d'années.

Tout d'abord, d'autres particules existent, hormis l'électron et les deux quarks. Ces trois dernières suffisent pour la matière normale, mais au siècle dernier les physiciens des particules ont découvert neuf autres particules de matière et cinq autres transmettant des forces. Certaines de ces particules sont très bizarres, comme les fantomatiques neutrinos capables de traverser des milliards de milliards de kilomètres de plomb sans interagir avec une seule de ses particules¹. Le plomb, pour les neutrinos, est comme transparent... D'autres particules ressemblent beaucoup aux trois premières particules de la matière mais sont beaucoup, beaucoup plus lourdes.



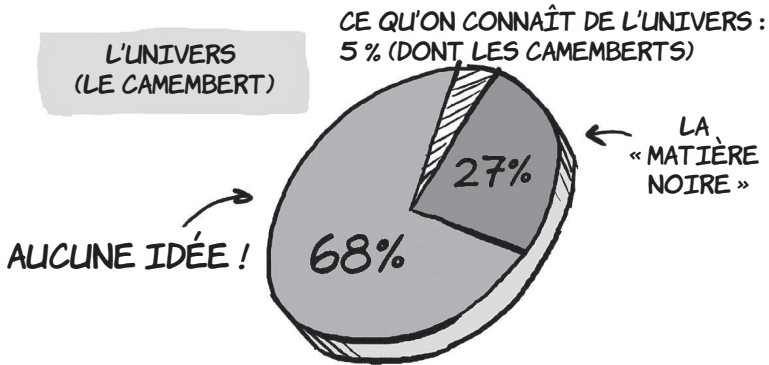
Pourquoi ces particules supplémentaires ? Quel est leur rôle ? Qui les a invitées à la grande fête cosmique ? Combien d'autres types pourraient-ils y avoir ? Nous l'ignorons. Pis encore : nous n'en avons pas la plus petite idée. Nous aborderons plus en détail ces étranges particules et leurs curieuses caractéristiques au chapitre 4.

Ensuite, cette description reste très partielle pour une autre raison, et pas des moindres. Alors que trois particules seulement suffisent pour construire des étoiles, des planètes, des comètes et des cornichons, il s'avère qu'elles ne participent à la composition que d'une minuscule partie de l'Univers. Le type de matière que nous considérons comme normal, parce que c'est le seul que nous connaissons, est en fait très inhabituel. En effet, il ne représente dans l'Univers, matière et énergie comprise, qu'environ 5 % du total.

De quoi sont faits les 95 % restants ? Aucune idée ! Si nous dessinons un camembert de la composition de l'Univers, il ressemble en gros à celui ci-contre.

Ce camembert paraît vraiment mystérieux. Seulement 5 % est connu, dont les étoiles, les planètes et tout ce qu'elles comprennent.

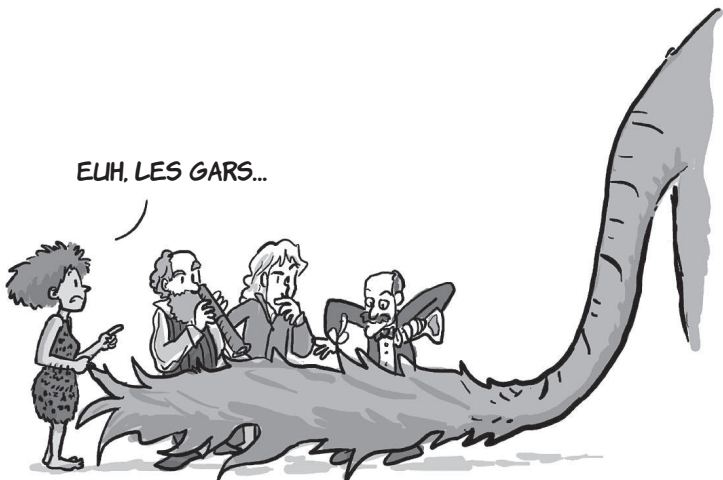
1. C'est ce que l'on pense. Personne n'a tenté de faire réellement cette expérience.



Puis, il y a 27 % de quelque chose baptisé « matière noire ». Les 68 % de l'Univers restant correspondent à un truc dont nous ne comprenons pas grand-chose. Les physiciens l'appellent « énergie noire » : elle expliquerait pourquoi l'Univers est en expansion, mais c'est tout ce que l'on en sait. Nous détaillerons plus loin ces deux notions et comment ces nombres ont été trouvés.

Et il y a pire. Même dans les 5 % de connu, beaucoup de choses restent encore incompréhensibles (vous vous rappelez les particules supplémentaires ?). Dans certains cas, on ne sait même pas comment poser les bonnes questions qui dévoileront ces mystères.

Voilà donc où en est notre espèce. Nous nous félicitons il y a peu de l'incroyable aventure intellectuelle qui a permis de décrire



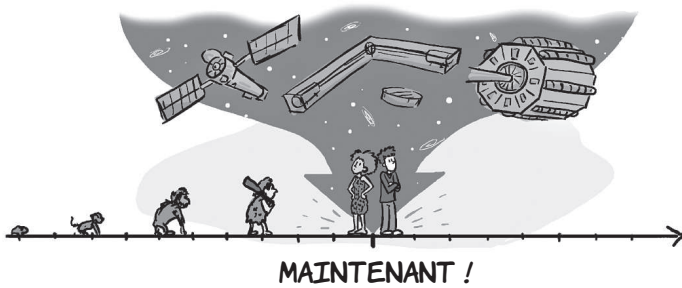
toute la matière connue en des termes simples. Cela nous paraît désormais un peu prématuré, vu que l'essentiel de l'Univers est fait d'autre chose. Un peu comme si, après avoir étudié un éléphant pendant des milliers d'années, on découvrait que l'on n'a observé que sa queue !

Sachant cela, vous risquez d'être légèrement dépité. Vous pensiez peut-être que nous avons atteint un summum dans la compréhension et la maîtrise de l'Univers (nous avons des robots qui passent l'aspirateur quand même !) ? Mais il est important de voir plutôt cela comme une formidable opportunité pour rencontrer et apprendre de nouvelles choses. Que se passerait-il si l'on vous disait que seulement 5 % de notre planète a été exploré ? Ou que vous n'avez goûté que 5 % des parfums de glace ? Le scientifique qui sommeille en vous exigerait immédiatement une explication qui tienne la route et se réjouirait à l'idée de pouvoir faire de nouvelles découvertes...

Rappelez-vous l'époque où vous étiez à l'école primaire, quand vous avez appris les exploits des grands aventuriers au cours de l'histoire. Ceux qui ont navigué vers l'inconnu et découvert de nouvelles terres, cartographié des territoires inconnus. Si cela vous transportait alors, peut-être êtes-vous maintenant un peu triste de savoir que tous les continents sont connus, toutes les petites îles nommées et qu'à l'époque des satellites et du GPS l'ère des explorateurs semble révolue. La bonne nouvelle, c'est que ce n'est pas le cas.

Une quantité énorme de choses, en fait, reste à explorer. Nous entrons dans une période qui devrait renouveler notre compréhension de l'Univers. D'un côté, nous avons conscience d'en savoir très peu (5 %, vous vous rappelez ?), de sorte que nous avons quelques idées sur les (bonnes) questions à poser. Et d'un autre côté, nous élaborons de nouveaux outils impressionnants tels que de puissants collisionneurs de particules, des détecteurs d'ondes gravitationnelles et des télescopes qui vont permettre d'esquisser de nouvelles réponses. Et c'est précisément ce qui est train de se passer maintenant !

Ce qui est fascinant, c'est que les grands mystères scientifiques ont des réponses tangibles. Nous ne les connaissons pas encore, mais il est probable qu'elles seront trouvées au cours de notre vie. Par exemple, soit il existe maintenant une vie intelligente quelque



part dans l'Univers, soit ce n'est pas le cas. La réponse à cette question, elle, existe dans tous les cas. Ces réponses vont radicalement changer la façon dont nous considérons le monde.

L'histoire des sciences est jalonnée de révolutions où l'on découvre à chaque fois que notre vision du monde était biaisée par un point de vue particulier. Une terre plate, une terre centrée sur le Soleil, un Univers fait essentiellement d'étoiles et de planètes, etc. : autant d'idées considérées comme raisonnables à chaque époque mais que nous trouvons maintenant d'une naïveté embarrassante. Il est presque sûr que de formidables révolutions nous attendent : elles vont ébranler des idées actuellement bien établies comme celles de la relativité et de la physique quantique et les remplacer par d'autres plus stupéfiantes encore. Si bien que dans deux cents ans, c'est notre façon à nous d'expliquer le monde qui paraîtra préhistorique.

L'aventure humaine pour comprendre l'Univers est loin d'être terminée et vous en faites partie. Nous vous promettons qu'il sera aussi savoureux qu'un bon camembert !

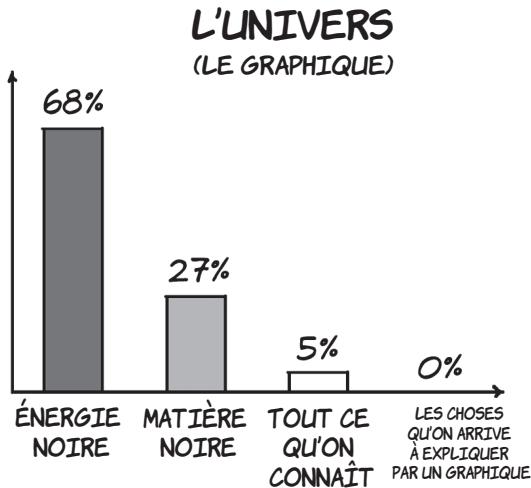


2

QU'EST-CE QUE LA MATIÈRE NOIRE ?

Vous nagez dedans

Voici un graphique montrant les répartitions de la masse et de l'énergie dans l'Univers tel que nous le connaissons :



Les physiciens estiment que pas moins de 27 % de la matière et de l'énergie dans l'Univers connu correspond à quelque chose appelé « matière noire ». Cela veut dire que la majeure partie de l'Univers

n'est pas celle étudiée depuis des siècles. Il y a cinq fois plus de cette matière mystérieuse que celle, normale, qui nous est familière. En fait, ce n'est pas tout à fait juste d'appeler cette dernière « normale », alors qu'elle est vraiment rare dans l'Univers.

Alors de quoi parle-t-on avec la matière noire ? Est-elle dangereuse ? Va-t-elle tacher nos vêtements ? Comment savons-nous qu'elle existe ?

La matière noire est partout. En fait, nous baignons dedans. Son existence a été proposée dès les années 1920, puis prise au sérieux dans les années 1960 lorsque les astronomes ont remarqué un truc étrange dans le déplacement des galaxies, ce qui impliquait un autre truc nouveau sur leur masse.

Comment nous savons que la matière noire est bien là

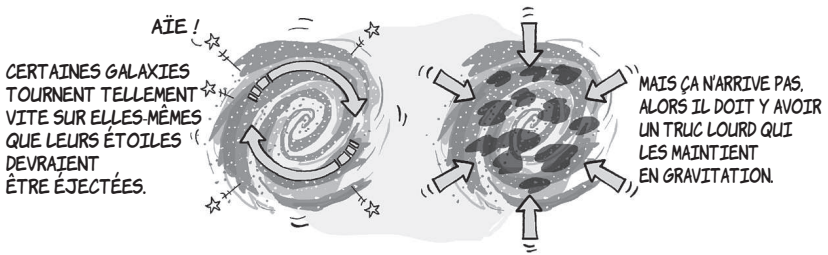
1. Les galaxies en rotation

Pour comprendre le lien entre matière noire et galaxies en rotation, imaginez qu'un gros paquet de balles de ping-pong soit soudain placé dans un manège pour enfants, puis que vous lanciez le manège. On s'attend à ce que les balles jaillissent de tous les côtés. Eh bien c'est presque la même chose pour une galaxie en rotation ¹. Comme la galaxie tourne sur elle-même, les étoiles qu'elle contient ont tendance à s'éloigner du centre. La seule chose qui les retient, c'est la force de gravité de toute la masse présente dans la galaxie (la gravité tend à rapprocher les masses entre elles). Plus la galaxie tournera vite, plus une masse importante sera nécessaire pour y maintenir les étoiles. Inversement, si l'on connaît la masse d'une galaxie, on est capable de prédire sa vitesse de rotation.

Les astronomes ont d'abord essayé de deviner la masse des galaxies en comptant le nombre d'étoiles qu'elles comportent. Mais lorsqu'ils ont exploité ce nombre pour en déduire la vitesse de rotation des galaxies, quelque chose clochait : les mesures indiquaient une vitesse de rotation plus élevée que celle prédite en comptant les étoiles. En d'autres termes, selon ce calcul, les étoiles auraient dû être éjectées des bords, comme les balles de ping-pong du

1. Même si les galaxies ont tendance à être plus grosses que des manèges...

manège. Pour expliquer ce résultat inattendu, les astronomes devaient ajouter une énorme masse aux galaxies afin que toutes les étoiles se maintiennent en leur sein. Le problème, c'est qu'ils ne voyaient vraiment pas d'où venait cette masse. Une contradiction qui ne pouvait être résolue qu'en supposant l'existence dans chaque galaxie d'un type de matière tout ce qu'il y a de plus pesante, mais invisible à nos yeux – « noire » en somme.



Une telle hypothèse était tout simplement extraordinaire. Et comme l'a joliment formulé le célèbre astronome Carl Sagan : « Les affirmations extraordinaires exigent des preuves extraordinaires. » Les astronomes ont cependant vécu pendant des décennies avec ce curieux paradoxe. Avec le temps, ils se sont faits à l'existence de cette mystérieuse chose pesante et invisible (ou matière noire, pour lui donner un nom).

2. Les lentilles gravitationnelles

Un autre indice important de la réalité de la matière noire a été d'observer qu'elle pouvait courber la lumière. C'est l'étrange effet dit de lentille gravitationnelle.

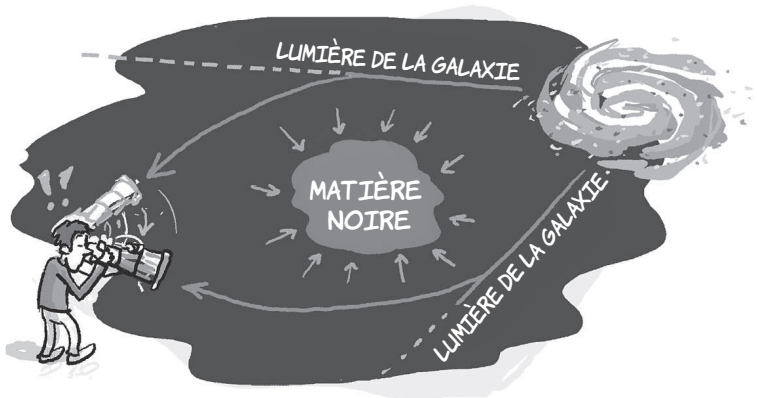
De quoi s'agit-il ? Les astronomes remarquaient parfois quelque chose de bizarre dans le ciel. Ils avaient l'image d'une galaxie provenant d'une direction. Rien d'anormal à cela mais, s'ils déplaçaient légèrement leur télescope, ils pouvaient voir l'image d'une autre galaxie lui ressemblant beaucoup. La forme, la couleur et la lumière étaient tellement semblables que les astronomes étaient persuadés d'avoir affaire à la même galaxie. Comment un tel phénomène était-il possible ? La même galaxie pouvait-elle vraiment apparaître deux fois dans le ciel ?

VUE D'UN TÉLESCOPE



Les physiciens ont trouvé la solution : voir deux fois le même objet se comprend si quelque chose de massif (et d'invisible) se trouve entre vous et lui. Cet objet va agir comme une sorte de lentille géante en courbant la lumière venant de l'objet, de sorte que cette dernière paraîtra venir de deux endroits distincts.

Imaginez une galaxie émettant de la lumière dans toutes les directions. Deux particules de lumière – des photons – s'en échappent sur votre gauche et votre droite respectivement. S'il y a quelque chose de massif entre vous et la galaxie, sa force de gravité va déformer l'espace qui l'entoure et entraîner un fléchissement de la trajectoire des photons vers vous ¹.



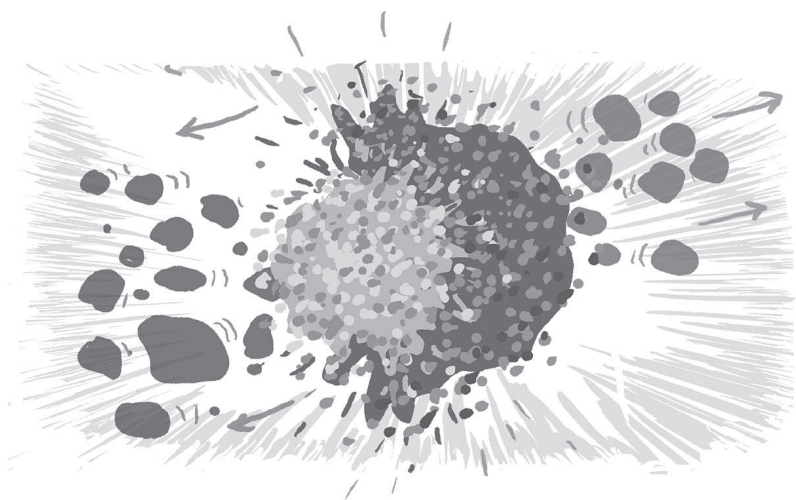
Sur Terre, vous verrez alors au télescope deux images de la même galaxie, qui proviennent de deux endroits différents du ciel. Ce

1. La courbure de la lumière due à la gravité est quelque chose qu'Albert Einstein a suggéré et ensuite prouvé. Les physiciens pensent que c'était un gars vraiment intelligent.

phénomène a été observé dans tout le ciel nocturne. Quelque chose de massif et d'invisible semble occuper l'espace. La matière noire n'est plus une idée bizarre : on peut constater ses effets quel que soit l'endroit où l'on porte son regard.

3. Quand les galaxies se percutent

La preuve unique la plus convaincante de l'existence de la matière noire est venue quand on a pu observer une collision galactique géante. Il faut dire que le spectacle était grandiose : deux amas de galaxies se sont écrasés l'un contre l'autre il y a des millions d'années. Nous sommes arrivés bien après le feu d'artifice, mais comme la lumière de l'événement prend des millions d'années pour parvenir jusqu'à nous, on a pu s'asseoir et contempler tranquillement les explosions qui en ont résulté.



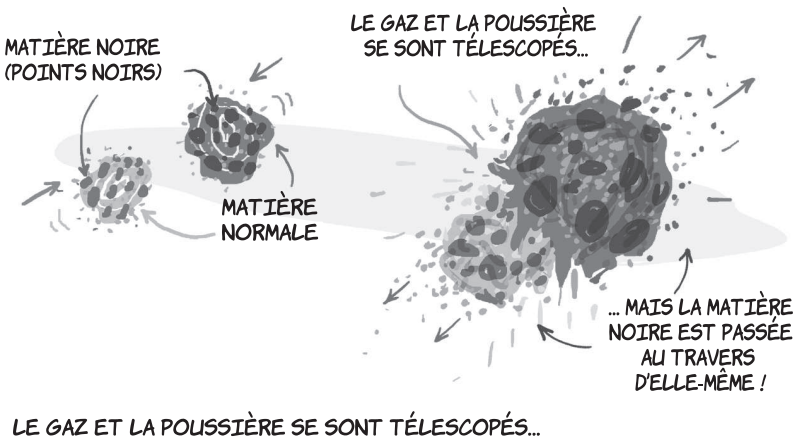
Quand les deux amas sont entrés en collision, boum ! le gaz et la poussière galactiques se sont entrechoqués en Technicolor, avec des déflagrations énormes, des nuages de poussières géants qui se sont disloqués – une débauche d'effets spéciaux ! En gros, ce que donnerait la collision entre deux gros tas de ballons remplis d'eau lancés à une allure folle...

Cependant, les astronomes ont noté quelque chose d'autre. Non loin du site de la catastrophe se trouvaient deux masses géantes de

matière noire. Elles étaient invisibles, bien sûr, mais ils purent les déceler indirectement en mesurant la déformation des rayons lumineux provenant des galaxies situées derrière elles. Les deux masses semblaient se déplacer sur le site de la collision comme si de rien n'était.

Les astronomes ont pu reconstituer ce qu'il s'était passé : il y avait deux amas de galaxies, chacun avec de la matière classique (essentiellement du gaz, de la poussière et quelques étoiles) et de la matière noire. Lorsque les deux amas sont entrés en collision, une bonne partie du gaz et de la poussière s'est écrasée comme on peut s'y attendre de la part de la matière normale. Mais que s'est-il passé quand une matière noire en a percuté une autre ? Eh bien, rien de détectable ! Les deux masses ont poursuivi leur chemin et sont passées l'une à travers l'autre comme si elles ne se voyaient pas. Les étoiles sont aussi passées au travers, mais parce qu'elles étaient très espacées.

D'énormes paquets de matière, plus gros que nombre de galaxies, se sont tout simplement traversés. En définitive, la collision a littéralement dépouillé ces galaxies de leurs gaz et de leurs poussières.



Ce que nous savons de la matière noire

À ce stade, il est clair que la matière noire existe et qu'il s'agit de quelque chose d'étrange, bien différent de ce à quoi nous sommes familiers.

Voici ce que nous en savons :

- elle a une masse ;
- elle est invisible ;
- elle aime bien traîner avec les galaxies
- la matière classique ne semble pas l'affecter ¹ ;
- d'autres matières noires ne semblent pas l'affecter non plus ;
- elle a un nom sympa.

Du coup, vous vous dites peut-être : « Wouah, j'aimerais bien être fait de matière noire. Je serais un méga superhéros. » Non ? Nous oui, en tout cas !

Une chose est certaine à son sujet, c'est qu'elle ne se cache pas bien loin. Elle tend à se regrouper en amas importants flottant dans l'espace et à se trouver dans les galaxies. Cela signifie qu'il y a de fortes chances que la matière noire vous entoure juste en ce moment. En lisant cette page, il est très probable qu'elle passe au travers du livre et de vous. Mais si elle est de partout, pourquoi est-elle si mystérieuse ? Pourquoi ne pouvons-nous pas la voir ou la toucher ? Comment quelque chose peut-il être là sans être visible ?

Étudier la matière noire est difficile car nous ne pouvons pas beaucoup interagir avec elle. Nous ne pouvons la voir (elle est donc noire), mais nous savons qu'elle a une masse (c'est donc une matière). Pour expliquer comment tout cela est possible, il faut d'abord nous pencher sur la manière dont la matière classique interagit.

Comment la matière interagit

La matière interagit de quatre manières différentes.

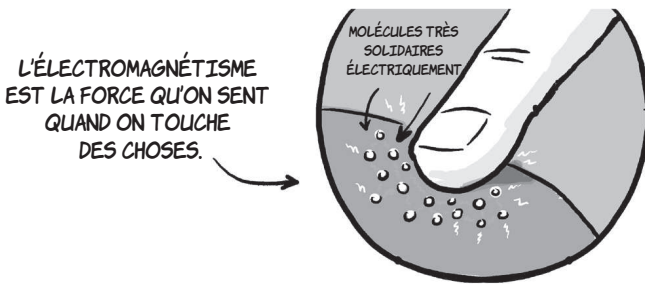
1. Il se peut que la matière noire soit elle-même légèrement affectée par le biais d'une nouvelle force encore inconnue.

La gravité

Si deux choses ont une masse, elles vont subir une force qui va les attirer l'une vers l'autre.

L'électromagnétisme

C'est la force que subissent deux particules dès qu'elles ont une charge électrique. Elle est attractive ou répulsive selon que les charges sont respectivement différentes ou pas.



On ressent cette force tous les jours, en fait. Si vous appuyez sur ce livre du bout du doigt, le papier ne s'écrase pas et votre main ne le traverse pas parce que des molécules dans le livre se maintiennent entre elles par des liaisons électromagnétiques tout en repoussant les molécules de votre main.

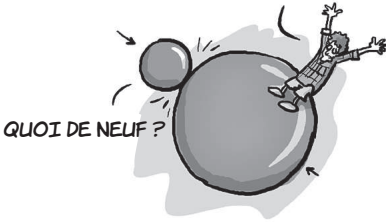
L'électromagnétisme est aussi à l'origine de la lumière et, bien sûr, de l'électricité et du magnétisme. Nous reviendrons sur la lumière et les liens profonds unissant les particules et les forces plus tard.

La force nucléaire faible

Cette force ressemble sur de nombreux points à la force électromagnétique, mais elle est beaucoup, beaucoup plus faible. Par exemple, les neutrinos l'utilisent pour interagir (faiblement !) avec d'autres particules. Aux très hautes énergies, la force faible devient aussi intense que l'électromagnétisme, et on a montré qu'elle faisait partie d'une force unifiée appelée « électrofaible ».

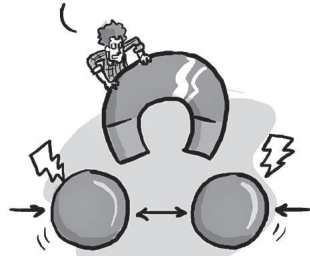
**LES QUATRE MANIÈRES
DONT LES CHOSES INTERAGISSENT**

IL SUFFIT D'UN PEU DE MASSE,
ET LES CHOSES SONT ATTIRÉES.



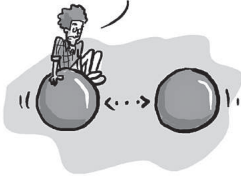
LA GRAVITÉ

DEUX CHARGES S'ATTIRENT
OU SE REPOUSSENT



L'ÉLECTROMAGNÉTISME

C'EST COMME LES FORCES
ÉLECTROMAGNÉTIQUES,
MAIS EN BEAUCOUP,
BEAUCOUP PLUS FAIBLE



L'INTERACTION FAIBLE

ELLE MAINTIENT
LE NOYAU UNI



L'INTERACTION FORTE

La force nucléaire forte

C'est la force qui maintient les protons et neutrons ensemble dans le noyau. Sans elle, tous les protons chargés positivement se repousseraient et s'en iraient.

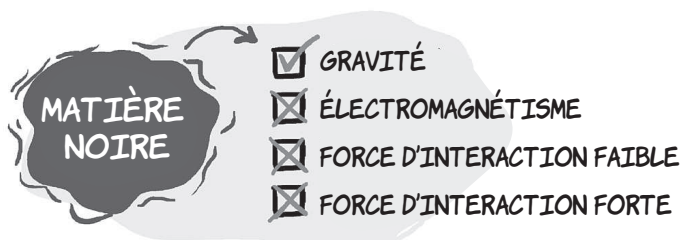
Comment la matière noire interagit

Il faut d'abord noter que cette liste de forces n'est que descriptive. Parfois, la physique ressemble ainsi à la botanique. Nous ne comprenons pas pourquoi ces forces existent. Il s'agit juste d'une liste de choses que l'on a observées. Nous ne savons même pas si elle est

complète. Mais jusqu'à présent, ces quatre forces nous permettent d'expliquer toutes les expériences faites en physique des particules.

Alors pourquoi la matière noire est-elle si noire ? Elle a une masse et subit donc la gravité, mais c'est tout ce que nous savons de ses interactions. On pense qu'elle n'a pas d'interactions électromagnétiques. Pour autant que l'on sache, elle ne réfléchit ni ne diffuse la lumière, ce qui explique qu'il soit si difficile de la voir directement. La matière noire ne semble pas non plus être soumise aux interactions nucléaires forte ou faible.

Donc, à moins d'un nouveau type d'interaction restant à découvrir, la matière noire n'interagit pas avec nous, nos télescopes ou détecteurs par un moyen classique. Ce qui la rend très difficile à étudier.



Sur les quatre façons fondamentales d'interagir, la seule qui s'applique de façon certaine à la matière noire est la gravité. Voilà d'où vient la « matière » qui est dans la matière noire. Il y a quelque chose en elle. Elle a une masse, et c'est la raison pour laquelle elle est soumise à la gravité.

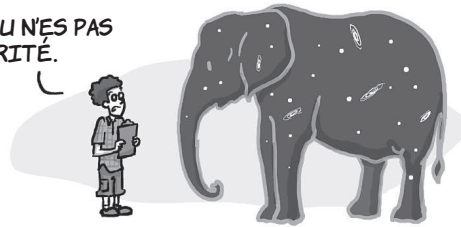
Comment pouvons-nous étudier la matière noire ?

Nous espérons vous avoir convaincu que la matière noire est bien réelle. Il y a sûrement quelque chose qui empêche les étoiles de s'échapper dans l'espace, qui courbe la lumière des galaxies, et qui s'éloigne des gigantesques collisions cosmiques à la manière des héros laissant derrière eux leur voiture en flammes (sans regarder derrière eux). La matière noire est de ce type.

Une interrogation demeure toutefois : mais de quoi est-elle faite ? On ne peut prétendre répondre à la grande question de quoi est fait l'Univers si l'on ne se contente d'en étudier que 5 %. On ne peut ignorer les 27 % de matière noire. Une réponse rapide est que nous n'avons encore qu'une mince idée de sa nature. On sait qu'elle est là, combien il y en a, et en gros où elle se trouve, mais on ignore quel type de particules la constitue, ou même si elle est faite de particules. Rappelez-vous qu'il faut faire attention de ne pas extrapoler un type inhabituel de matière à l'ensemble de l'Univers ¹. Il importe de garder un esprit ouvert pour faire le genre de découverte capable de changer notre manière de penser l'Univers et la place que nous y occupons.

Pour avancer, il nous faut considérer une poignée d'idées précises, explorer leurs conséquences et concevoir des expériences pour les tester. Il se pourrait que la matière noire soit faite d'éléphants roses cosmiques qui dansent, eux-mêmes constitués d'une nouvelle particule bizarre et indétectable, mais comme cette théorie est difficile à tester, nous n'en ferons pas une priorité. ²

DÉSOLÉ, TU N'ES PAS
UNE PRIORITÉ.



Il existe une conception simple et concrète de ce que peut être la matière noire : elle serait faite d'un nouveau type de particule utilisant un nouveau type de force pour interagir très, très faiblement avec la matière normale. Pourquoi envisager une seule nouvelle particule ? Parce que c'est l'idée la plus simple, donc la première à considérer. Il est tout à fait possible que la matière noire

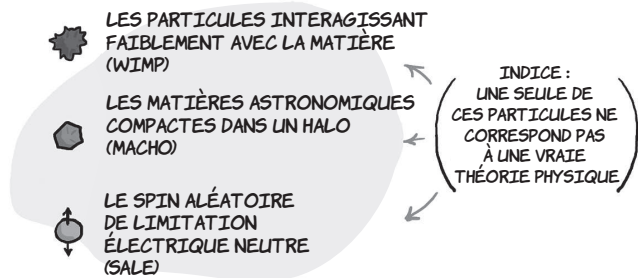
1. Si vous avez un sandwich au jambon pour déjeuner aujourd'hui, cela ne veut pas dire que tous les déjeuners comporteront un sandwich au jambon.

2. Au moment où nous écrivons, le financement de la science reste quelque chose d'imprédictible.

relève de plusieurs types de particules comme la matière classique. Ces particules noires auraient alors toutes sortes d'interactions intéressantes, avec pour résultat une chimie noire, peut-être une biologie noire, une vie noire et des dindes noires (ce qui fait plutôt peur).

Cette particule candidate est connue sous l'acronyme de WIMP, pour Weakly Interacting Massive Particle (c'est-à-dire quelque chose avec une masse interagissant faiblement avec la matière normale). On suppose qu'elle pourrait se servir d'une nouvelle force hypothétique pour interagir avec la matière que nous connaissons qui serait à peu près du même niveau que les neutrinos, soit très, très faible. Pendant un moment, on a envisagé d'autres possibilités, comme des masses énormes de matière classique de la taille de Jupiter. Pour les distinguer des WIMPs, on leur a donné le petit nom de MACHO (pour Massive Astrophysical Compact Halo Object).

LES PARTICULES CANDIDATES À LA MATIÈRE NOIRE



Comment savons-nous que les particules de matière noire interagissent avec la matière usuelle autrement que par la force de gravité ? Nous n'en savons rien. On l'espère, parce qu'elles seraient bien plus simples à détecter. Nous allons d'abord essayer les expériences très difficiles avant de nous lancer dans celles qui sont presque impossibles.

Les physiciens ont effectué des expériences qui visaient à détecter d'hypothétiques particules de matière noire. Une stratégie classique consiste à remplir un réservoir d'un gaz noble comprimé et refroidi, puis de l'entourer de détecteurs émettant un signal dès qu'un seul

atome de ce gaz est frappé par de la matière noire. Jusqu'à présent, cette technique n'a rien donné mais ces dispositifs deviennent maintenant suffisamment grands et sensibles pour pouvoir espérer déceler la matière noire.

Une autre approche est d'essayer de créer de la matière noire à l'aide d'un collisionneur de particules à haute énergie qui entraîne des protons ou des électrons à des vitesses incroyables avant de les faire s'écraser les uns sur les autres. C'est très impressionnant en soi, et donne en plus un moyen pour chercher de nouvelles particules de l'Univers. Cela est dû au fait que ces collisions peuvent transformer un type de matière en un autre. Lorsque des particules se percutent, elles ne font pas que se réarranger dans une nouvelle configuration. De l'ancienne matière est annihilée tandis qu'une nouvelle est fabriquée. C'est comme de l'alchimie (nous ne blaguons pas !) au niveau subatomique. Cela signifie que dans certaines limites, vous pouvez presque induire la formation de n'importe quel type de particule existante sans savoir à l'avance ce que vous allez trouver. Les scientifiques scrutent ces collisions à la recherche d'indices montrant qu'elles pourraient permettre la création de particules de matière noire.

Une troisième approche est de pointer nos télescopes là où nous pensons qu'il existe de fortes concentrations de matière noire. L'endroit le plus proche se trouve au centre de notre galaxie, qui semble en avoir une très grosse masse. L'idée serait que deux particules de matière noire entrent en collision et s'annihilent l'une l'autre. Si la matière noire a un moyen d'interagir avec elle-même, alors deux de ses particules pourraient en se rencontrant se transformer en particules de matière normale, tout comme deux particules de matière normale peuvent créer de la matière noire en se percutant¹. Si cela se produit assez souvent, une partie des particules de matière produites se trouvera répartie d'une manière suffisamment spécifique pour être décelable au télescope. Pour comprendre cela, il nous faut cependant en savoir beaucoup plus sur ce qui se passe au centre de la galaxie, ce qui nous renvoie à un autre ensemble de mystères.

1. Si deux particules de matière normale peuvent se transformer en deux de matière noire, l'inverse est également vrai.

Pourquoi cette matière compte

La matière noire nous donne une bonne idée de l'obscurité dans laquelle nous nous trouvons concernant la nature de l'Univers malgré toutes nos découvertes et avancées. Sur le plan de la compréhension, nous en sommes encore à la préhistoire. La matière noire ne fait même pas partie des modèles mathématiques ou physiques actuels de l'Univers. Une immense matière nous attire en silence et nous ne savons même pas ce que c'est. Comment prétendre expliquer notre Univers si l'on ne comprend pas cette part gigantesque ?

Et si, avant de commencer à nous méfier de cette sombre matière qui flotte mystérieusement autour de nous, nous commençons par nous demander si ce n'était pas finalement quelque chose de fantastique ?

La matière noire est faite de quelque chose dont on n'a aucune expérience directe. Un truc jamais vu jusqu'à présent, et qui pourrait se comporter d'une manière qui dépasse notre imagination.

Pensez à l'incroyable potentiel qu'elle pourrait recéler.



Et si elle était constituée d'un nouveau type de particule que l'on peut produire et maîtriser dans les collisionneurs de haute énergie ? Et si, en découvrant sa véritable nature, on comprenait un truc encore totalement inconnu des lois de la physique, comme un autre type d'interaction ou une manière d'agir inédite des forces d'interaction actuellement répertoriées ? Et si cette découverte nous permettait de manipuler la matière classique d'une nouvelle façon ?

Imaginez que vous avez joué à un jeu toute votre vie et que soudain vous réalisez que vous pouvez aussi faire appel à des règles

particulières ou à de nouveaux éléments. Quelles nouvelles techniques ou compréhension pourraient jaillir de la connaissance de ce qu'est la matière noire et de sa façon d'agir ?

Nous ne pouvons pas rester éternellement dans le noir. Ce n'est pas parce que c'est obscur que c'est une matière sans intérêt.



3

QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE NOIRE ?

Où notre esprit est dépassé par l'Univers en expansion

Vous êtes peut-être encore sous le choc : presque tout ce que vous pensiez savoir sur l'Univers ne correspondrait qu'à 5 % à peine des préoccupations d'une espèce intelligente d'extraterrestre de passage. Soyons honnêtes, vos chances de suivre les cours d'une université extraterrestre sont probablement assez faibles¹. Pour



1. C'est peut-être mieux ainsi, la nourriture de leur cantine est assez bizarre.

récapituler ce que nous savons, nous les humains, voici une représentation en colonne de l'Univers (désolé, nous sommes à court de types de graphique) :

Imaginez que toute votre vie, vous avez pensé posséder un appartement spacieux et merveilleux correspondant à tout ce que pouvait vous apporter l'existence. Puis un jour, vous découvrez qu'il ne s'agit que de cinq étages sur cent dans un immeuble de luxe. Soudain, votre vie devient plus compliquée. Vingt-sept autres étages correspondent à quelque chose de lourd mais invisible, que nous appelons matière noire. Des voisins sans doute bizarres ou géniaux, mais on ne sait pourquoi, qui vous évitent dans les couloirs.

Et tous les autres étages sont aussi un mystère quasi complet. Ils représentent ce que les physiciens appellent « l'énergie noire ». C'est le plus gros morceau de la réalité et nous n'avons pas la moindre idée, ou presque, de ce que c'est.

Tout d'abord, vous pourriez vous demander pourquoi elle s'appelle énergie noire. En fait, on aurait pu lui donner n'importe quel nom¹. Pourquoi ? Parce que l'on ne sait presque rien d'elle, mis à part le fait qu'elle pousse l'Univers à se dilater très rapidement.

La seconde question que vous pourriez vous poser est : « Mais comment savons-nous qu'elle est là ? » Et la réponse est : par un pur accident. Ce fut une surprise totale pour les chercheurs alors qu'ils tentaient de répondre à une tout autre question. Ils voulaient mesurer de combien l'expansion de l'Univers ralentissait, et ils ont eu la surprise de trouver que, bien au contraire, il s'étendait de plus en plus vite ! Bon, il est grand temps de prendre les escaliers et d'aller voir ce qu'il y a aux autres étages.



1. Ou presque. Le « Côté obscur » était déjà pris.

Notre Univers en expansion

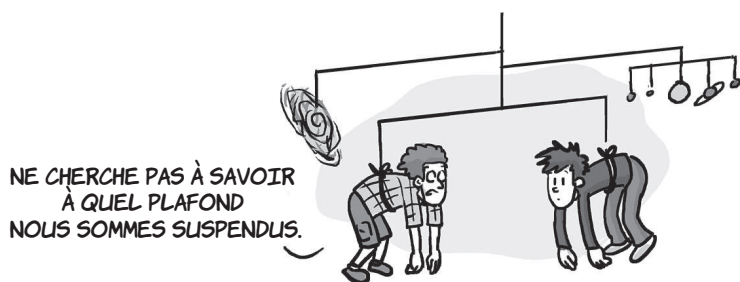
Pour comprendre combien il est fou que plus des deux tiers du budget énergétique de l'Univers aient été mis au jour en cherchant autre chose, revenons à la question initiale qui a permis de s'en apercevoir :

Est-ce que notre Univers a un commencement, ou bien a-t-il toujours existé sous sa forme actuelle ?

Une question simple, et qui pourtant est très profonde. Il y a encore à peine un siècle, tout scientifique sensé était convaincu que l'Univers avait toujours existé tel qu'il est aujourd'hui et qu'il resterait ainsi pour l'éternité. La plupart des gens ne s'étaient même pas aperçus que notre Univers changeait. Pour eux, toutes les étoiles et les planètes existaient dans un état de mouvement perpétuel, comme des hochets suspendus au-dessus d'un berceau ou une pièce remplie d'horloges en marche permanente.

Mais, un jour, des astronomes ont commencé à remarquer quelque chose d'étrange. En mesurant la lumière venant des étoiles et des galaxies environnantes, ils en ont déduit que toutes les choses de l'Univers s'éloignaient les unes des autres. L'Univers ne se tenait pas juste là les bras ballants : non, il était en expansion.

Et si l'Univers avait toujours été en expansion, cela signifiait... qu'il est plus grand maintenant qu'avant ! En poursuivant ce raisonnement, c'est-à-dire en remontant dans le passé, on s'est dit qu'il a dû être très petit à un moment donné.



Bien des chercheurs ont pensé que cette théorie était ridicule et l'ont appelée par dérision la théorie du *Big Bang* (ou « Grand Boum »). S'ils étaient encore vivants aujourd'hui, les inventeurs de ce terme l'utiliseraient sûrement de manière terriblement ironique,

traçant des guillemets dans les airs et levant les yeux au ciel. Mais l'expression, d'abord inventée pour se moquer de cette théorie, a fini par rentrer dans le langage courant. Retenez ceci : quand les physiciens se mettent à ricaner, vous savez que quelque chose a fondamentalement changé la compréhension de l'Univers.



L'UNIVERS EST EN TRAIN D'EXPLOSER.

C'est ainsi qu'en 1931, les astronomes ont découvert que l'Univers était en expansion, ce qui signifie qu'il grandissait continûment depuis un point initial très, très dense¹ (notez que ce point ne flottait pas dans un espace, il était lui-même tout l'espace. Nous en dirons plus sur cette nouvelle manière un peu dingue de penser l'espace au chapitre 7). Certes, il y avait encore quelques théories d'un Univers sans Big Bang compatibles avec la découverte de l'expansion, mais elles demandaient une génération permanente de nouvelle matière pour conserver l'Univers à la même densité.

Si l'Univers a un commencement, alors il est permis de se demander s'il aura une fin. Qu'est-ce qui pourrait mettre un point final à cet espace énorme, majestueux et si étrange ? Et, plus important encore, aurez-vous le temps de finir ce roman sur lequel vous travaillez depuis si longtemps ?

Qu'est-ce qui pourrait entraîner la fin de l'Univers ? La réponse est dans notre vieille amie la gravité.

Rappelez-vous : alors que toute la matière est projetée dans l'Univers suite à l'explosion cosmique du Big Bang, la gravité, elle, agit dans l'autre direction. La moindre parcelle de matière subit la gravité, celle-ci faisant de son mieux pour à l'inverse condenser l'Univers à son échelle. Qu'est-ce que cela nous dit sur les destinées probables de l'Univers ? On a plusieurs idées à ce sujet (voir la page suivante).

Et c'est là que les choses se mettent à décoiffer. Car la vraie réponse est encore ailleurs ! La vérité, aussi étrange que cela puisse paraître, est une quatrième option secrète que seuls quelques scientifiques ont envisagée (parce qu'elle paraît complètement dingue) :

1. On ne peut ajouter assez de « très » ici pour traduire combien ce point était dense. L'Univers entier était compris dans un seul point.