

CÉDRIC VILLANI, MATHÉMATICIEN

“LA MATIÈRE NOIRE ET L'ÉNERGIE SOMBRE, JE N'Y CROIS PAS”



L'astronomie a joué un grand rôle dans le développement des mathématiques, constate Cédric Villani, médaille Fields en 2010. C'est une discipline rêvée pour populariser la science. Même si, ajoute-t-il, les astrophysiciens se laissent parfois emporter par leur imagination, inventant des concepts qui sont juste *“des constats de non-compréhension”*.

Propos recueillis par David Fossé

CÉDRIC Villani est l'un des plus brillants mathématiciens de sa génération. Âgé de 39 ans, lauréat de la prestigieuse médaille Fields en 2010, il dirige l'Institut Henri Poincaré depuis 2009 et a publié l'année dernière *Théorème vivant*. Dans cet ouvrage passionnant, où le récit se mêle aux équations, où les notices biographiques côtoient les échanges de mails, il raconte la gestation chaotique d'un théorème consacré à l'amortissement Landau (un phénomène découvert dans les années 1940 qui décrit la stabilisation spontanée des plasmas, mais qui a bien d'autres applications, notam-

ment en astrophysique). Sous l'œil de la chanteuse Catherine Ribeiro et du mathématicien Henri Poincaré — deux de ses héros figurant en bonne place dans son bureau —, il a accepté de nous recevoir pour évoquer son rapport à l'astronomie. Une science passionnante et fertile, estime-t-il, mais dans laquelle l'imagination prend parfois le pas sur la cohérence.

Ciel & Espace : Vous êtes mathématicien, mais vous parlez souvent d'astronomie dans vos conférences grand public. Pour quelle raison ?

Cédric Villani : Parce que les gens s'y intéressent, ça les accroche ! Lorsque l'on veut parler de science, l'astronomie est un point d'entrée évident car sa part d'inconnu fascine. J'utilise aussi l'astronomie pour parler du statut de la mathématique. Pour faire sentir à quel point il est miraculeux qu'avec une feuille de papier et un crayon, nous puissions décrire le mouvement d'étoiles sur lesquels aucun de nous n'ira jamais. C'est tout de même dément ! Et il y a une troisième raison : historiquement, l'astronomie a souvent été à l'origine de développements mathématiques. Cela remonte à loin, au moins aux calendriers des Babyloniens. La vision classique selon laquelle les développements mathématiques précèdent les avancées en physique, laquelle n'en serait donc qu'une application, c'est du pipeau ! L'histoire nous montre qu'il y a toujours eu des allers-retours entre les disciplines.

Pouvez-vous nous donner un exemple de problème d'astronomie ayant ouvert des pistes pour les mathématiques ?

C. V. : Bien sûr. Prenez la question de la stabilité du Système solaire. Au départ, Kepler, avec ses orbites elliptiques, le conçoit comme éternellement stable. Puis Newton montre qu'il y a un souci : si on prend en compte l'attraction des planètes les unes sur les autres, le système devient rapidement instable ! Comme ça l'embête, il introduit la puissance divine pour stabiliser tout ça... Mais au passage il a quand même fondé la mécanique moderne, c'est énorme !

Euler et Lagrange se frottent ensuite au problème, puis Laplace, qui le premier parvient à démontrer la stabilité du Système solaire sur un temps de l'ordre du million d'années. Le résultat de Laplace est extraordinaire, historique. Pour la première fois, un homme est capable de faire des prédictions sur des temps supérieurs à la durée de l'humanité elle-même. Mais là encore, pour y parvenir, il a fallu qu'il invente de nouvelles techniques mathématiques⁽¹⁾.

Et ce n'est pas fini. En 1885, le roi de Suède et de Norvège Oscar II décide d'accorder un prix à quiconque fera une découverte importante en science mathématique à propos de quatre problèmes importants de l'époque, dont justement la question de la stabilité du Système solaire. Poincaré s'y attelle et parvient à démontrer que le Système solaire est stable bien au-delà du million d'an-

nées. Splendide résultat, le prix va lui être attribué... sauf que son manuscrit est entaché d'une grosse erreur ! Il s'en rend compte *in extremis*, fait rappeler les imprimés de son article et reprend le problème en profondeur... pour arriver à la conclusion inverse. Il réalise que le Système solaire est chaotique et découvre ce que l'on appelle les intersections homoclines⁽²⁾. Poincaré, en s'intéressant au Système solaire, amorce toute la théorie moderne des systèmes dynamiques.

Y a-t-il eu d'autres avancées depuis ?

C. V. : Oui. Dans les années 1950, l'opinion sur la stabilité du Système solaire a basculé de nouveau avec les travaux de Kolmogorov, qui montre que celui-ci est stable avec une forte probabilité (ce qui, en réalité, n'est pas en contradiction avec le résultat de Poincaré). Ce travail a donné naissance à la théorie KAM⁽³⁾, qui s'applique bien au-delà des questions de mécanique céleste.

Enfin, il y a eu une nouvelle volte-face à la fin des années 1980, quand Jacques Laskar a montré grâce à des preuves numériques que le Système solaire était foncièrement chaotique. Jacques Laskar est l'un des grands noms de l'astronomie moderne. Est-il d'abord un mathématicien ? Un astrophysicien ? On voit bien que les deux sont intimement liés.

DATES CLÉS

1973 Cédric Villani naît le 5 octobre à Brive-la-Gaillarde.

1998 Thèse consacrée à la théorie mathématique de l'équation de Boltzmann, sous la direction de Pierre-Louis Lions.

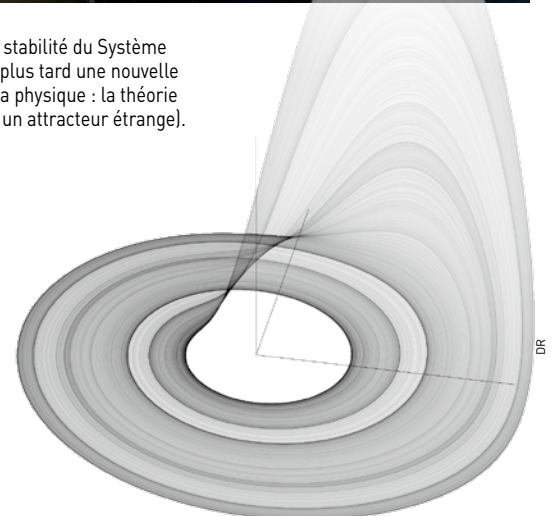
2009 Devient directeur de l'Institut Henri Poincaré, qui promeut des rencontres entre mathématiciens et physiciens théoriciens.

2010 Reçoit la médaille Fields pour ses travaux sur l'équation de Boltzmann et l'amortissement Landau.

2012 Publie *Théorème vivant* chez Grasset et Fasquelle.



Les travaux d'Henri Poincaré sur la stabilité du Système solaire annoncent ce qui deviendra plus tard une nouvelle branche des mathématiques et de la physique : la théorie du chaos (symbolisée ci-contre par un attracteur étrange).



“Prétendre décrire l’origine de l’Univers me paraît vraiment très ambitieux”

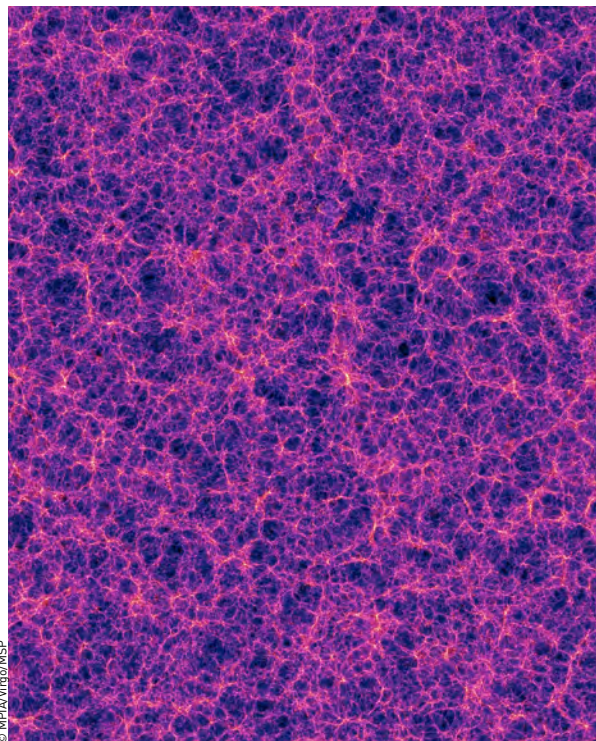
L’astronomie vous intéresse, mais vous n’hésitez pas à lui lancer quelques piques. Dans l’un de vos textes, vous citez une phrase cruelle du génial physicien russe Lev Landau : “Les astronomes sont souvent dans l’erreur, jamais dans le doute.” Vous partagez ce point de vue ?

C. V. : Un peu, oui. En astronomie, on est souvent dans l’inconnu. On comprend très peu de choses. Mais les astrophysiciens ont une imagination débordante ! Comme ils ne peuvent pas faire d’expérience, ils peuvent à peu près inventer tout ce qu’ils veulent. La matière noire et l’énergie sombre, par exemple... Personnellement, je n’y crois pas. Jusqu’à preuve du contraire, ce sont simplement des constats de “non-compréhension”. La théorie qui décrit l’évolution de l’Univers flanche, c’est un fait, mais a-t-on vraiment besoin d’énergie sombre et de matière noire ?

J’ai des collègues plus virulents encore. Pour eux, l’astrophysique est le seul domaine où l’on transforme en découvertes scientifiques de simples constats d’erreur : “Mince, ma théorie ne fonctionne pas, on dirait qu’il manque de la masse. Bon... c’est parce qu’il y a une nouvelle particule en plus. Je ne sais pas ce que c’est, je ne l’ai jamais vue, mais je vais l’appeler la matière noire.” Et c’est quoi la matière noire ? “Ce qui explique qu’il manque de la masse.” On tourne en rond, là ! En plus, il y a ce problème de biais : la matière noire n’est pas exactement concentrée là où est la matière visible, elle forme un halo, mais pas complètement... Bref, on peut dire ce que l’on veut.

En ajoutant des ingrédients à leur recette de l’Univers, les astrophysiciens feraient donc preuve de flemme intellectuelle ?

C. V. : Non, ce n’est pas de la flemme. Il y a un grand travail derrière tout ça. Simplement, l’imagination prend le pas sur la cohérence. Il y a un vrai problème de réflexion sur les modèles, sur leur construction, la simplicité. Bref, sur ce que



© MPA/INTEGRAL/MSF

l’on veut faire. Comme disait Poincaré, la science ce n’est pas un empilement de concepts, c’est une construction ⁽⁴⁾. Il faut construire sa maison en prenant le temps de réfléchir, pour qu’elle tienne bien, pour que son architecture soit élégante. Si on ajoute un concept à chaque fois qu’on a un problème, on est mal parti... Il y a tellement d’inconnues lorsqu’on parle de l’Univers.

Est-ce que cela signifie qu’il y a pour vous des questions d’astronomie qui sont hors de portée, que l’on devrait laisser de côté ? Par exemple, êtes-vous de ceux qui pensent que la prétention de certains cosmologistes à vouloir décrire l’origine du cosmos est excessive ?

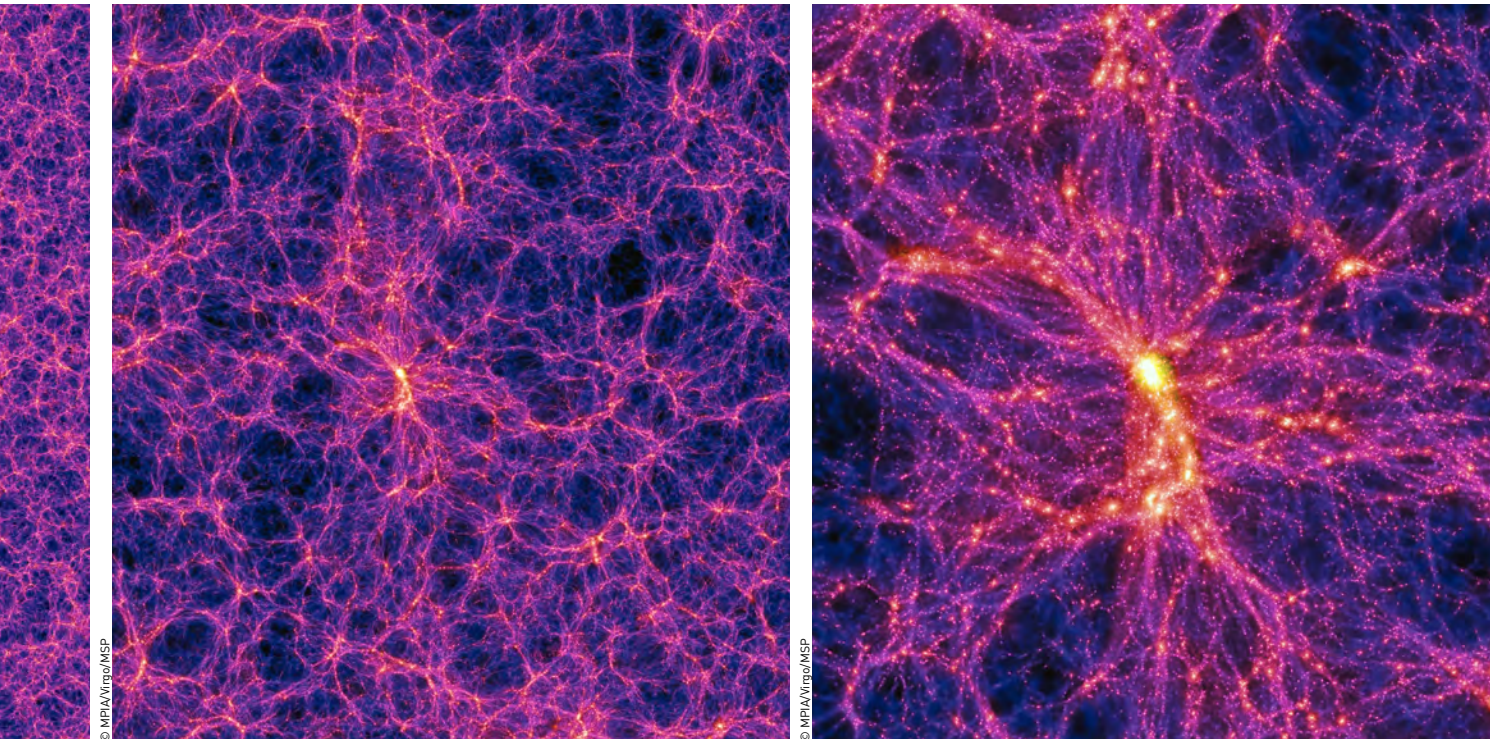
C. V. : Il ne s’agit pas de mettre des problèmes de côté. En science, il faut se colleter avec des problèmes difficiles. Mais il faut avoir un peu de recul. Ne pas présenter les choses avec trop de certitudes. Il est parfaitement légitime de parler d’énergie sombre et de matière noire tant qu’on livre ça comme des hypothèses, avec des limitations, des points d’interrogation. Mais il faut se souvenir que la base de l’édifice est bien ténue ! C’est pourquoi je n’ai pas grande confiance, par exemple, dans les simulations numériques du genre de Millennium, où l’on essaie de reproduire l’évolution de l’Univers avec des ingrédients, comme la matière noire, dont on ne connaît même pas la nature.

Prétendre, dans ces conditions, décrire l’origine de l’Univers me paraît monstrueusement ambitieux. Il me semble que l’on ne comprend même pas comment une galaxie se forme, alors l’Univers... En plus, il ne faut pas oublier que lorsqu’on remonte dans le passé, on se retrouve dans des

Dans son bureau de l’IHP (Institut Henri Poincaré), qu’il dirige, Cédric Villani travaille sous les regards croisés de la chanteuse Catherine Ribeiro et du mathématicien Henri Poincaré.



© D. Fossé/C&E Photos



conditions pour lesquelles les lois de la physique changent peut-être radicalement.

Dans *Théorème vivant*, vous décrivez votre découverte de l'ouvrage *Galactic Dynamics*, la bible des astronomes sur la structure et la dynamique des galaxies. "Les galaxies spiralées, les amas globulaires, tout ça, je trouvais assez joli, oui, oui, pas mal... Mais maintenant que j'ai une clef mathématique pour y pénétrer, c'est tout bonnement passionnant", écrivez-vous. L'astronomie peut donc encore être une source d'inspiration pour un mathématicien...

C. V. : Bien sûr ! À l'adolescence, je me suis désintéressé de l'astronomie car je pensais que c'était une discipline assez pauvre sur le plan mathématique. Depuis, j'ai réalisé qu'elle était autre chose que les belles images des livres de mon enfance. Le monde des galaxies et des étoiles est encore rempli de mystères. Le fait de ne pas comprendre comment se forme une galaxie, c'est tout de même marquant ! Autre exemple de problème fascinant : les supernovae. Comment expliquer le contraste entre le temps extrêmement long d'évolution d'une étoile, et la rapidité avec laquelle elle finit sa vie ? Je pourrais aussi citer le travail de Jacques Féjoz ou d'Alain Chenciner [*portant également sur la stabilité du Système solaire, NDLR*], directement inspiré par la mécanique céleste. En fait, tout est à creuser en astronomie.

Iriez-vous jusqu'à orienter vos propres recherches vers des problèmes d'astrophysique ?

C. V. : Eh bien, l'équation de Vlasov et l'amortissement Landau, ça s'applique à l'astrophysique ! Au départ, ces équations concernent la physique statistique. Il s'agit de décrire l'évolution de la répar-

tition des électrons dans un plasma. Mais dans les années 1960, l'astrophysicien Donald Lynden-Bell a eu l'idée de les transposer à son domaine de prédilection [*dans ces équations, il a remplacé les électrons par des étoiles, et le champ électrique dans un plasma par le champ gravitationnel dans une galaxie, NDLR*]. Ce n'était pas gratuit : il cherchait à expliquer comment une galaxie parvenait si vite à passer d'un état chaotique, celui de sa naissance, à un état d'équilibre stable. Sans l'amortissement Landau, le temps de stabilisation d'une galaxie serait largement plus long que l'âge de l'Univers.

Pour finir, parlons de la nuit. Vous l'évoquez à plusieurs reprises dans *Théorème vivant*. Vous écrivez même : "Ça n'a pas de prix, un chemin sans éclairage !" Qu'est-ce qu'elle représente pour vous ?

C. V. : D'abord, c'est un changement physiologique. La nuit, notre état mental et sensitif n'est pas le même. Notre cerveau ne fonctionne pas pareil. Nous sommes différents. Je ne recherche pas spécialement la nuit, mais quand elle est là, je l'apprécie. C'est comme l'hiver : on ne le recherche pas, mais quand il neige, on est bien content ! C'est pourquoi je trouve qu'il y a beaucoup trop de lumière dans nos villes. Tout cet éclairage, cette débauche d'énergie qui gâche les étoiles, cela n'a pas de sens. ●

(1) *Les méthodes perturbatives, largement utilisées aujourd'hui, qui consistent à chercher la solution approchée d'une équation impossible à résoudre.*

(2) *Les intersections homoclines sont une variété d'orbites périodiques. Leur configuration particulière implique une dynamique compliquée.*

(3) *Du nom d'Andrei Kolmogorov, Vladimir Arnold et Jürgen Moser.*

(4) "Le savant doit ordonner ; on fait la science avec des faits comme une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison." in La science et l'hypothèse, 1901.

Peut-on reproduire, dans des ordinateurs, l'évolution de l'Univers sous l'effet conjoint de la matière noire et de l'énergie sombre ?

C'est l'objectif des simulations numériques comme Millenium. Mais pour Cédric Villani, c'est aller un peu vite en besogne.

ALLER PLUS LOIN

À LIRE

Théorème vivant, éditions Grasset et Fasquelle, 2012.

À VOIR

Conférence "La meilleure et la pire des erreurs de Poincaré" : <http://goo.gl/2ws7q>

Conférence "Des particules, des étoiles et des probabilités" (avec Real Player) : rtsp://video.cpm.upmc.fr/video/cpm/2010/sciences_a_coeur_s_3/01_sac3_rencontre_autour_des_mathematiques_cedric_villani_25_11_2010.rm

Les recherches sur l'origine et le destin de l'Univers donnent-elles trop de place à la pure spéculation ? Nous avons demandé à trois chercheurs connus pour leur hauteur de vue, un physicien et deux cosmologistes, de réagir aux propos de Cédric Villani. Le débat sur l'évolution de la cosmologie, toujours passionnant, n'est pas près de se refermer !

David Fossé

LA COSMOLOGIE EMPORTÉE PAR L'IMAGINATION ?

TROIS CHERCHEURS RÉAGISSENT

Marc Lachièze-Rey

“Des hypothèses qui nous éloignent des réponses véritables”

J'ai commencé mon travail de chercheur il y a quarante ans à l'Institut Henri Poincaré, et mes premiers travaux portaient sur le rôle de l'amortissement Landau en cosmologie. Comme Cédric Villani, j'apprécie les liens irréductibles de l'astronomie et de la cosmologie avec les mathématiques et les réflexions les plus fondamentales. J'y vois un élément de leur intérêt et de leur beauté.

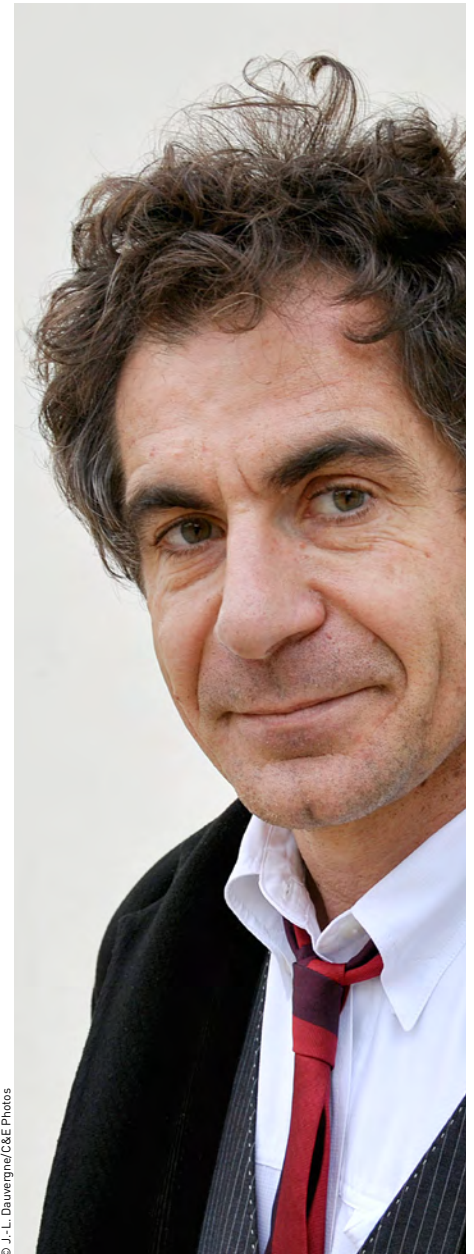
Cela me conduit à déplorer un penchant actuel de la discipline, à mes yeux disproportionné, envers les hypothèses certes respectables de masse cachée et d'énergie noire. Elles ne sont à mes yeux que des tentatives mal justifiées pour répondre à des questions fondamentales. Elles me rappellent les épicycles, la vertu dormitive de l'opium, ou encore l'introduction de l'éther... qui éloignent le physicien de la recherche de réponses véritables. Je voudrais voir préservés la rigueur et le recul qui donnent ses titres de noblesse à cette discipline extraordinaire qu'est la cosmologie.

Marc Lachièze-Rey
CNRS, laboratoire Astroparticule et cosmologie

Marc Lachièze-Rey, Étienne Klein et Jean-Philippe Uzan (de gauche à droite) sont tous trois des théoriciens de la physique, par ailleurs versés en philosophie des sciences.



© D. Fossé/C&E Photos



© J.-L. Dauvergne/C&E Photos

Étienne Klein

“Aucune hypothèse ne peut être écartée a priori”

Je suis pleinement d'accord avec ce que Cédric Villani dit de l'origine de l'Univers, dont l'évocation a le don de faire céder nos dignes intellectuelles : emportés par leur élan, certains discours nous surviennent des prolongements métaphysiques qui vont bien au-delà de ce qu'offrent les théories elles-mêmes.

Ses propos sur la matière noire me semblent mériter un contrepoint. Lorsque le résultat d'une observation constitue une “anomalie” au sens où il contredit les prédictions d'une théorie par ailleurs solide-

ment éprouvée, deux sortes d'hypothèses peuvent être simultanément envisagées :

1. Il existe une “substance” non encore découverte dont l'existence permettrait d'annuler le désaccord entre la théorie et la mesure. C'est un tel raisonnement qui a conduit à l'hypothèse de la matière noire.

2. Les lois physiques sur lesquelles s'étaient appuyées les prédictions ne sont pas aussi exactes qu'on l'avait cru. Dans ce cas, la solution du problème est de nature législative : il faut corriger les lois physiques, peut-être même bâtir une nouvelle théorie.

Aucun de ces deux types d'hypothèse ne peut être écarté *a priori*. L'histoire de la physique montre en effet qu'il n'existe pas de recette systématique : des crises ont été résolues de façon législative, d'autres par des ajouts ontologiques.

Étienne Klein
CEA, Laboratoire des recherches
sur les sciences de la matière



Une seconde après le big bang, les conditions physiques dans l'Univers correspondent à des énergies testées très finement en laboratoire

Jean-Philippe Uzan

“Nombre d'observations ne peuvent être expliquées sans la matière noire ou l'énergie sombre”

Y a-t-il un manque de réflexion sur le modèle cosmologique ? Je ne partage pas ce point de vue. La décennie passée a démontré que ses hypothèses (principe copernicien, relativité générale...) ont été testées et repensées. Nous savons aujourd'hui que de nombreuses observations indépendantes ne peuvent pas être expliquées sans avoir recours à la matière noire et l'énergie sombre. Il n'y a bien sûr pas encore de preuves directes mais bien un faisceau cohérent, observationnel et théorique, ainsi qu'une réflexion de fond sur la nature du secteur sombre.

Certes, nous n'avons pas de théorie complète de la formation des galaxies. Cependant, rappelons que l'on peut comprendre et décrire un phénomène dans un domaine de validité contrôlé sans être affecté par des inconnues en dehors de ce domaine. Ainsi, il n'est pas nécessaire de connaître les détails de la physique nucléaire pour faire de la chimie. De nombreux faits de la cosmologie ne sont pas

affectés par le détail du mécanisme de formation des galaxies.

Il est vrai que, de fait, nous devons extrapoler les lois de la nature vers le passé. Rappelons cependant qu'une seconde après le big bang, les conditions physiques dans l'Univers correspondent à des énergies testées très finement en laboratoire. La physique sur laquelle reposent les phénomènes observationnels en cosmologie est complètement sous contrôle.

Je laisserai, pour finir, Richard Feynman répondre à Lev Landau. “La question n'est pas de savoir si [une] théorie est agréable du point de vue philosophique [...] ou si elle est acceptable du point de vue du sens commun. [...] J'espère que vous accepterez la nature telle qu'elle est : absurde.”

Jean-Philippe Uzan
CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris