

James Peebles: « La cosmologie avance dans le noir »

La cosmologie a progressé à pas de géant ces trente dernières années, tout en découvrant le gouffre qui s'ouvrait devant elle. Les observations suscitent sans cesse de nouvelles questions qui semblent parfois plus vastes que la théorie elle-même. Le modèle standard cosmologique peut-il résister aux assauts du réel ?

Philip James E. Peebles,

né en 1935 à Winnipeg (Canada), est professeur émérite à l'université de Princeton (New Jersey, États-Unis). C'est l'un des cosmologistes théoriciens les plus productifs. De 1981 à 2002, il a reçu six grands prix scientifiques aux États-Unis, ainsi que le prix Lemaître en Europe.

LA RECHERCHE : Quelle est la principale conquête de la cosmologie depuis trente ans ?

JAMES PEEBLES : Dans les années soixante, la cosmologie était une branche presque entièrement spéculative, fondée sur très peu d'éléments factuels. À cette époque, le débat faisait rage entre les tenants de l'Univers statique et les tenants du Big Bang. Aujourd'hui, les données fournies par l'observation ont littéralement explosé et nous ont permis de construire une théorie cohérente qui laisse moins de place à la spéculation. L'Univers statique a été définitivement disqualifié. Nous affirmons avec certitude que l'Univers a fortement évolué, au départ d'une situation où il était extrêmement chaud et dense et ne ressemblait en rien à ce que nous voyons aujourd'hui. Nous avons aussi de très bons indices quant à son évolution future qui, là encore, le rendra très différent. C'est un progrès considérable !

Est-on en droit de penser que l'histoire de l'Univers est désormais connue, à peu de chose près ?

JAMES PEEBLES : Il s'en faut malheureusement de beaucoup. La théorie standard a beau rendre compte d'un grand nombre d'observations, il reste des lacunes immenses. Par exemple, nous avons de bonnes raisons de croire que 95 % de la substance de l'Univers se trouve sous une forme non identifiée. Nous appelons provisoirement « matière noire » et « énergie sombre » des réalités qui nous échappent totalement. Autrement dit, nous prétendons avoir une théorie solidement établie, mais nous ne savons pas sur quoi elle porte, à part les 5 % que nous voyons. N'est-ce pas un scandale intellectuel ? Cela ne veut pas dire que nous sommes dans l'impasse. Les possibilités d'observation et



de calcul sont loin d'être épuisées. Mais rien ne garantit que nous pourrions répondre aux questions qui restent patentes, ni que nous pourrions le faire dans le cadre de la théorie standard.

Qu'est-ce qui nous oblige à admettre l'existence de la matière noire ?

JAMES PEEBLES : Le fait, connu depuis les années trente, que les amas de galaxies soient stables alors que leur masse visible est insuffisante pour expliquer cette stabilité. Il en va de même pour les galaxies elles-mêmes, qui devraient se disloquer. C'est Jeremiah Ostriker et moi-même qui ⇒

⇒ avons suggéré en 1974 que l'essentiel de la masse des galaxies ne se trouvait pas dans le disque galactique, mais dans un halo sombre qui l'entoure, sous forme de « matière noire », invisible aux télescopes [1]. Depuis lors, des dizaines de tentatives pour détecter cette masse manquante ont échoué. En tout cas, elle ne se trouve pas sous forme d'étoiles, de naines brunes, de planètes, de nuages de gaz ou de galaxies isolées. Il faut donc se tourner vers des possibilités plus exotiques.

Si la matière noire n'est pas de la matière ordinaire, de quoi est-elle composée ?

JAMES PEEBLES : Nous n'en avons aucune idée. Nous ne le saurons avec certitude que si nous mettons le doigt dessus, dans un accélérateur de particules, par exemple. Et il se peut très bien que cela ne se produise jamais. Mais cela ne nous empêche pas de continuer à chercher des arguments indirects. Il y a tant de mesures à faire en cosmologie, et de conséquences à en tirer ! Prenez les mirages gravitationnels, par exemple. Ils nous ouvrent les yeux sur la nature du monde physique. Au début, les images étaient très floues et difficiles à interpréter. Aujourd'hui, le Télescope spatial fait des prouesses, et que voyons-nous ? Au centre de l'image, un amas de galaxies à la distribution très inégale, et puis,

disposés sur un grand cercle autour de ces « grumeaux » de lumière, des arcs à la régularité parfaite. Ceux-ci constituent l'image d'une galaxie qui se trouve loin derrière l'amas et

dont les rayons lumineux sont déviés par la masse de l'amas, qui joue le rôle de lentille. C'est un mirage. Mais la question cruciale est : pourquoi les arcs sont-ils réguliers alors que la lentille est irrégulière ? Si toute la masse de l'amas était réellement dans les « grumeaux » visibles, elle ne pourrait pas provoquer une image fantôme aussi régulière. À proximité d'un gros grumeau, l'arc devrait s'incurver vers le centre. Or, ce n'est pas le cas. Pour moi, nous avons là une démonstration éclatante du fait que la masse est distribuée de façon homogène, même si la lumière ne l'est pas. Dans cet amas, nous voyons des grumeaux, mais la gravitation nous dit que la masse est homogène. Lumière et masse sont deux choses différentes, il ne faut pas prendre l'une pour l'autre. Et pour les réconcilier, il n'y a qu'une solution : la matière noire.

Non contents de nous dire que la matière visible ne représente qu'un dixième de la matière totale, les cosmologistes nous assurent aussi que l'ensemble de la matière (visible et noire) ne représente qu'un tiers de l'énergie totale contenue dans l'Univers. Le reste étant sous forme d'énergie sombre. D'où vient cette présomption ?

JAMES PEEBLES : À nouveau, l'idée n'est pas neuve. Einstein avait introduit dans ses équations une constante cosmologique. Il l'avait fait à la main pour contrebalancer la gravitation et assurer le caractère statique de l'Univers. Quand il fut prouvé que l'Univers était en expansion, la constante cosmologique est tombée en désuétude. Mais aujourd'hui on la remet à l'honneur parce qu'elle traduit un nouveau concept qui nous est suggéré par l'observation. Des mesures récentes des luminosités de certaines supernovae ont montré que les plus lointaines d'entre elles sont moins lumineuses que ce que prédit la théorie [2]. D'où l'on conclut qu'elles sont plus éloignées que prévu, et que l'Univers n'est pas seulement en expansion, mais en expansion accélérée. Ce sont des déductions particulièrement délicates, et il faudra encore les confirmer. Mais si c'est bien le cas, cela suppose l'existence d'une énergie « répulsive » qui remplit l'Univers. Nous n'avons pas détecté cette énergie sombre. Nous savons seulement que, si nos théories ne sont pas complètement fausses, elle doit exister. Je ne dirais pas pour autant qu'elle existe sûrement. Disons que c'est une présomption forte.

N'est-il pas particulièrement préoccupant de se dire que toute la cosmologie est fondée sur la petite pointe émergée d'un iceberg à 95 % inconnu ?

JAMES PEEBLES : Non seulement inconnu, mais incertain ! À ce jour, il n'y a de preuves de l'existence ni de la matière noire ni de l'énergie sombre, seulement des arguments. Et quand il faut argumenter une cause, c'est qu'elle n'est pas très solide. Pourquoi faut-il discuter à l'infini sur ces faibles indices ? Parce que nous n'avons rien d'autre pour l'instant. Il nous est impossible d'expérimenter, de voyager vers une autre galaxie ou de fabriquer un Big Bang. L'astronome est comme un enfant dans un magasin de porcelaine : il peut regarder, mais pas toucher. Il s'agit là d'un handicap très lourd, mais qui n'empêche pas d'avancer. Je suis très dubitatif sur la cosmologie prospective, qui prétend parler du destin futur de l'Univers, car nous n'avons pas assez d'éléments en main. En revanche, nous pouvons nous pencher sur l'histoire de l'Univers, car tout ce qui s'est produit dans le passé est susceptible d'avoir laissé des traces. À nous de les mettre au jour et de construire petit à petit un cadre capable de tout interpréter.

Qu'en est-il des débuts de l'Univers ? Le scénario est-il fixé ?

JAMES PEEBLES : Le début lui-même, le moment zéro de l'Univers, reste en dehors du champ de la physique et garde tout son mystère, simplement parce que nos théories ne fonctionnent pas lorsque la pression ou la température deviennent infinies. Nous ne pouvons rien en dire. Mais sur les tout premiers moments qui suivent, il y a une tendance au ralliement vers le scénario de l'inflation. L'inflation a cela de puissant qu'elle génère de façon naturelle les petites inhomogénéités qui sont nécessaires pour enclencher le processus de formation de structures sous l'effet de la gra-

Lumière et masse sont deux choses différentes. Pour les réconcilier, il n'y a qu'une seule solution : la matière noire

[1] J.P. Ostriker *et al.*, *ApJ Lett.*, 193, L1, 1974.

[2] S. Perlmutter *et al.*, *Nature*, 391, 51, 1998.

[3] E.M. Leitch *et al.*, *Nature*, 420, 763, 2002.

[4] J. Kowac *et al.*, *Nature*, 420, 772, 2002.



vitiation. Si vous voulez former une galaxie, il faut partir d'un petit défaut dans l'Univers primordial. L'inflation, cette phase d'expansion extrêmement rapide qu'aurait connue l'Univers une fraction de seconde après le Big Bang, produit ces imperfections, ou ces « germes », au départ de fluctuations quantiques. Le problème, c'est qu'elle le fait trop bien. C'est une théorie qui peut être ajustée pour produire les structures que nous voyons à partir de presque toutes les conditions initiales possibles. En ce sens, ce n'est pas vraiment une théorie, mais une histoire « sur mesure » puisqu'elle convient dans tous les cas. Il suffit de changer quelques paramètres. Certains de ses détracteurs accusent même l'inflation de ne pas être une théorie mathématiquement consistante. Il n'empêche que le mécanisme proposé est très élégant et très efficace. De toute façon, nous n'en avons pas de meilleur.

A-t-on des moyens expérimentaux de tester l'inflation ?

JAMES PEEBLES : Leur validité sera toujours contestable, puisque l'inflation peut « digérer » presque toutes les observations ! Mais l'étude des fluctuations du rayonnement de fond cosmologique nous a néanmoins apporté des élé-

ments troublants : les caractéristiques de ces fluctuations sont parfaitement compatibles avec la version de base de l'inflation, la plus simple et la première à prendre en considération. Vous prenez cette version « primitive », vous générez des inhomogénéités, et celles-ci doivent « s'inscrire » dans le rayonnement de fond sous forme de fluctuations qui sont exactement celles que nous observons.

Ce n'est pas une preuve, mais c'est un encouragement évident. Il y a d'autres tests en vue, notamment une signature sous forme de polarisation qui vient

d'être détectée dans le rayonnement de fond [3, 4], mais aucun ne sera décisif car un résultat négatif pourra toujours être contourné par un ajustement des paramètres. Ce qu'il faudra, c'est progresser dans notre compréhension de la physique fondamentale, afin que l'inflation émerge comme une conséquence de la théorie. Mais nous en sommes encore loin.



Ce qu'il faudra, c'est progresser dans notre compréhension de la physique fondamentale. Mais nous en sommes encore loin

⇒ Le modèle standard rend-il bien compte de l'évolution des galaxies ?

JAMES PEBBLES: Pas très bien, mais il faut savoir d'où nous venons ! Il y a trente ans, on ne savait même pas qu'une galaxie pouvait évoluer. Nos instruments ne nous permettaient pas de voir assez loin pour détecter des galaxies très jeunes (n'oubliez pas que plus vous regardez loin dans



Chaque fois que nous faisons une hypothèse, nous prenons la plus simple possible. Mais qu'est-ce qui oblige l'Univers à être simple ?

l'espace, plus vous regardez loin dans le temps, car la lumière a mis plus de temps pour vous parvenir), et elles nous semblaient toutes immuables. Aujourd'hui, l'évolution des galaxies est bien établie, à la fois d'un point de vue expérimental (nous voyons des galaxies naissantes, jeunes, adultes...) et d'un point de vue théorique. Nous avons un modèle qui part des hypothèses de la théorie standard actuelle (Big Bang, inflation, matière noire, énergie sombre qui agit comme une constante cosmologique...) et qui décrit assez bien cette évolution des structures du plus simple vers le plus complexe. Mais pas tout à fait bien. Et ce sont les détails qui me chiffonnent. Par exemple, la théorie dit que les galaxies elliptiques ne peuvent s'être formées qu'assez récemment. Mais l'observation montre des galaxies

elliptiques déjà anciennes. Où est l'erreur ? J'ai le sentiment que notre théorie est seulement une approximation grossière. Chaque fois que nous faisons une hypothèse – et il en faut beaucoup puisque nous avançons dans le noir –, nous prenons la plus simple possible, ce qui est raisonnable. Mais qu'est-ce qui oblige l'Univers à être simple ? Nous passons peut-être à côté d'une série de choses. Les conditions initiales ne sont peut-être pas celles que nous croyons. Les propriétés de la matière noire ne sont peut-être pas aussi simples. Ni celles de l'énergie sombre. Les modèles se raffinent au cours du temps, et le nôtre est encore trop rudimentaire.

Pensez-vous que l'on s'approche d'une vision globale cohérente, ou bien les grands points d'interrogation récemment apparus conduisent-ils à se demander, comme le fait l'Anglais Michael Disney [5], si « la cosmologie est vraiment une science » ?

JAMES PEBBLES: Disney choisit l'interprétation pessimiste. Il est vrai que nos théories reposent sur des hypothèses et que celles-ci peuvent parfois conduire à faire, avant terme, des extrapolations démesurées, et par là même gratuites, surtout s'il s'agit de prédire le destin de l'Univers. Et il faut reconnaître qu'il y a chez certains chercheurs une tendance à la spéculation qui prend le pas sur des questions plus humbles, qui seraient pourtant plus productives. On préférera par exemple théoriser sur les caractéristiques attendues des plus lointaines galaxies, non encore observables, plutôt que d'étudier en détail les galaxies voisines, qui seront pourtant très utiles comme base de comparaison. En ce sens, on peut reprocher à la cosmologie de se répandre au-delà de son territoire légitime. Encore qu'il ne soit pas du tout inutile de se poser des questions allant au-delà des moyens d'investigation. C'est parfois une idée neuve qui peut réorienter complètement la recherche. Mais il se fait que les moyens sont limités : le temps d'utilisation des télescopes, les budgets, etc. Et, entre deux projets, il vaudrait mieux choisir celui qui poursuit des indices matériels. Pour autant qu'on s'en tienne aux questions qui peuvent avoir un lien valide avec l'observation, le noyau dur de la cosmologie ne cesse de s'agrandir : hier l'évolution cosmique et les structures à grande échelle, aujourd'hui la matière noire, l'énergie sombre et l'inflation. Que le nombre d'hypothèses à tester semble se multiplier encore plus vite que les données disponibles n'est pas un argument de principe contre la cosmologie, il me semble, mais une invitation à redoubler nos efforts.

Pensez-vous que la théorie standard pourra intégrer les observations à venir, ou plutôt qu'elle devra céder la place à une nouvelle théorie ?

JAMES PEBBLES: Je dirais qu'elle tient le coup pour l'instant. Il y a des incohérences et des manques, mais qui se trouvent surtout dans les détails. Je serais surpris s'il fallait sacrifier le corps principal pour résoudre ces problèmes. Bien sûr, un coup de théâtre est toujours possible. Il se pourrait que nous nous soyons tout à fait trompés, que l'énergie sombre n'existe pas, ou autre chose du même acabit. Mais pour faire sauter l'édifice, il faudrait vraiment que ce soit un gros morceau ! Personnellement, je parierais à cinq contre un en faveur du modèle standard. ■■

Propos recueillis par Elisa Brune

Photos : Jérôme De Perlinghi

POUR EN SAVOIR PLUS

- Dossier matière noire, *La Recherche*, janvier 2001.
- J.-O. Baruch, « Et pourtant, il accélère », *La Recherche*, février 2003.
- H. Reeves, *Dernières Nouvelles du Cosmos*, Le Seuil, coll. « Points Sciences », 2002.

[5] M. Disney, *Gen. Rel. Grav.*, 32, 1125, 2000.