

Une cosmologie
bousculée

Page 38



Le big bang face
à ses contradictions

Page 42



L'Univers
en chantier

Page 44

La théorie du big bang n'est plus ce qu'elle était. Largement acceptée par les cosmologistes depuis 1965 pour décrire l'évolution de l'Univers, elle a subi de nombreux amendements. Aujourd'hui, à la lumière des dernières avancées en cosmologie et en physique, ces "améliorations" ressemblent de plus en plus à des "épicycles" destinés à sauver un modèle imparfait.

BIG BANG

Pourquoi il va exploser

Dossier réalisé par
Jean-Marc Bonnet-Bidaud

NOUS vivons une période historique. Jamais il n'a été aussi perceptible que notre conception de l'Univers était au bord d'un bouleversement radical. Aujourd'hui, malgré des informations de plus en plus nombreuses sur le passé de l'Univers, notre vision s'est considérablement brouillée : il n'y a ainsi plus aucune ressemblance entre l'idée originelle de la théorie du big bang et notre description actuelle de

l'Univers. La matière "ordinaire" est devenue un détail infime du cosmos, perdue dans un espace vide, gonflé d'une problématique énergie sombre et constellé d'une matière noire invisible. Autrement dit, nous baignons dans un océan d'inconnu. De la beauté confondante d'une théorie simple, basée sur les galaxies observables, nous sommes passés à l'ordonnement de choses toutes hypothétiques. A-t-on

perdu le contrôle d'un Univers fantôme ? Une théorie qui remplace le connu par l'inconnu est-elle une théorie en progrès ?

Ce sont toutes ces questions qui amènent aujourd'hui à une remise en cause totale. Devant ces difficultés, les physiciens ont choisi désormais de questionner la loi de la gravitation et, avec elle, la théorie de la relativité d'Einstein. Symbolisant à elle seule toute la démarche classique, la relativité, qui réaffirme le concept d'espace à trois dimensions tout en lui adjoignant un concept idéal de temps unique, a fait du même coup de la gravitation une force

Une remise en cause profonde qui passe par la gravitation quantique

singulière et isolée de la physique. Par son élégance, elle a subjugué pendant près d'un siècle, alors même que tout démontre qu'elle est incompatible avec l'autre physique, la physique quantique, jeux de probabilités et d'incertitudes qui est la base de toute notre connaissance actuelle de la matière et des particules. Aujourd'hui pourtant, tous les travaux récents semblent bien montrer que la meilleure piste pour repenser l'Univers passe par une nouvelle gravitation quantique. Einstein qui, par son *"Dieu ne joue pas aux dés"*, a combattu toute sa vie la face noire de cette autre physique est sans aucun doute l'auteur d'un désastre. Si l'évolution actuelle se confirme, il aura sans doute retardé par son influence une prise de conscience qui se fait de plus en plus inévitable.

Pour comprendre l'ampleur de l'enjeu, nous allons tout d'abord revenir sur l'histoire récente de la cosmologie, marquée par une série de dates phares. Puis, nous examinerons les manques et les contradictions, en pointant les observations qui mettent en difficulté les prévisions les plus simples. Enfin, nous verrons s'il est possible, dans ce climat préévolutionnaire, d'imaginer de nouveaux horizons, de nouvelles visions au carrefour de la physique moderne. ■

La vérification du big bang s'étend sur plus d'un demi-siècle. Avec des résultats encourageants, mais aussi des surprises et des interrogations persistantes. Retour sur les cinq dates clés de cette théorie.

Une cosmologie bousculée

1965

La découverte du 3K

Dès le départ, le big bang est un modèle cosmologique rescapé. Née de l'application des équations de la relativité d'Einstein, cette théorie de l'expansion est en effet condamnée dès les premières mesures. La vitesse d'expansion des galaxies, déterminée pour la première fois par Edwin Hubble en 1930, est tellement surévaluée qu'elle aboutit à un Univers dont l'âge est inférieur à celui de la Terre ! Dans le modèle du big bang, l'âge de l'Univers est le temps mesuré depuis le présent jusqu'au moment dans le passé où l'Univers est infiniment dense, et cet âge est donc directement lié à la vitesse des galaxies. À cause de cette discordance d'âge, l'idée d'une expansion générale de l'Univers depuis un état très dense est abandonnée

dès le début. À sa place germe en 1948 une théorie beaucoup plus générale dite de "l'Univers stationnaire", dans laquelle l'Univers se régénère en permanence par une création continue de matière qui entretient un mouvement local d'expansion. Par opposition au big bang, sans début ni fin, l'Univers stationnaire n'a ni âge, ni phase dense.

La première révolution cosmologique intervient en 1965 lorsqu'est découvert l'existence d'un rayonnement uniforme d'une température très faible, tout juste 3 degrés au-dessus du zéro absolu, emplissant l'Univers dans toutes les directions. Ce "fond diffus cosmologique" va ressusciter le big bang. Il peut en effet s'interpréter comme l'écho lumineux de la phase initiale dense et très chaude, lentement refroidi par les milliards d'années d'expansion, alors qu'il ne peut s'expliquer aussi facilement dans la théorie stationnaire. Le big bang devient le modèle cosmologique de référence et, à l'époque, l'espoir est dans la mesure de l'expansion et un inventaire complet de la matière qui devait très vite livrer tous les secrets de l'Univers.

1981

Inflation et matière noire

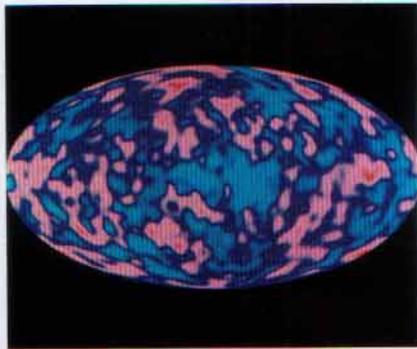
Les premières failles apparaissent pourtant rapidement. D'après le fond diffus cosmologique, l'Univers est beaucoup trop homogène et uniforme. Ses différentes parties, séparées par l'expansion et n'ayant pas pu communiquer entre elles, ne devraient pas être aussi semblables. Deux physiciens,



En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson détectent à l'aide d'un radiotélescope un rayonnement micro-ondes en provenance de toutes les régions du ciel. Ils viennent de découvrir le fond diffus appelé "3 K", véritable lumière fossile du big bang.



Pour faire cadrer les mesures du fond diffus (le 3 K) avec la théorie, Alan Guth et Andrei Linde émettent l'hypothèse d'une période d'expansion accélérée baptisée inflation qui aurait eu lieu peu de temps après le big bang (représentée sur le schéma ci-dessus).



Cette carte du ciel montre le fond diffus cosmologique tel qu'il a été mesuré en 1992 par le satellite Cobe. Révélation : le 3 K est encore plus homogène que prévu. L'inflation ne suffit plus ; il faut faire appel à une quantité importante de matière noire pour expliquer l'Univers actuel.

l'Américain Alan Guth, puis le Russe Andrei Linde, ont alors l'idée d'un petit raffinement qu'ils nomment "inflation", une expansion précoce et fulgurante de l'Univers au cours de laquelle la taille de l'Univers observable est multipliée en une fraction de seconde par un facteur plus grand que celui existant entre la taille de l'Univers actuel et le rayon d'un noyau d'atome. L'ensemble est alors homogène car issu d'une toute petite région.

Le moteur de cette super-expansion, une obscure transition du vide quantique, est pourtant hypothétique, ce qui pour les cosmologistes rend l'idée très discutable. D'autant que l'inflation ne fonctionne que si l'Univers a une densité élevée, ce qui implique l'existence d'une grande quantité de matière invisible. Dès cette époque, les astronomes vont pourtant se mettre à la recherche de cette matière "noire". Gaz froid, petites étoiles, trous noirs, particules en grand nombre, les candidats ne manquent pas mais beaucoup hésitent encore à inviter cette matière "fantôme", inutile complication dans le destin de l'Univers.

1992

Les irrégularités du fond cosmique

Presque trente ans après sa découverte, un premier coup de projecteur est donné sur le fond cosmologique : le satellite Cobe⁽¹⁾ produit une carte d'ensemble de ce rayonnement diffus. Attendue depuis longtemps, celle-ci révèle une énorme

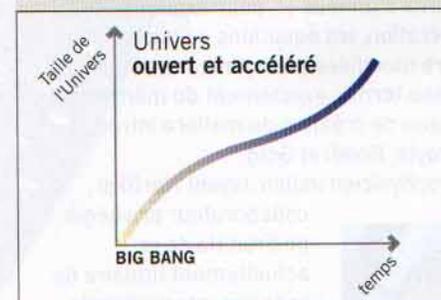
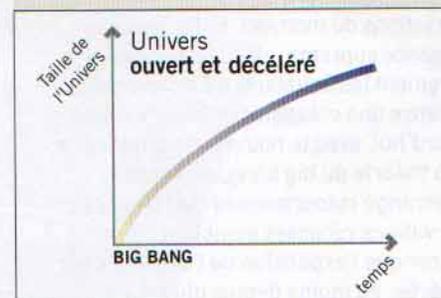
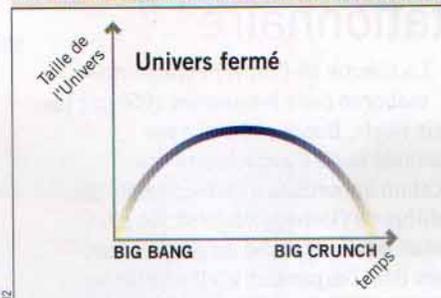
surprise. L'Univers est encore plus homogène qu'on ne le prévoyait. Au début du big bang, c'est un gaz chaud en expansion. La matière y est répartie de façon diffuse comme la vapeur d'eau dans un ciel clair. Mais il faut bien qu'elle se condense et forme les nuages qui deviendront les galaxies, énormes masses concentrées en certaines régions de l'espace, séparées par des océans de vide. Or, contrairement à toutes les prévisions, les germes présents au départ sont beaucoup trop petits. Panique pour les modèles de formation de galaxies. Cette fois, le coup de pouce de la matière noire devient indispensable. Il faut en parsemer l'Univers pour arriver à le faire coaguler en galaxies. Voilà la matière noire intronisée reine de l'Univers, à une lourde majorité de 90 % par rapport à la matière "ordinaire". D'un seul coup, neuf dixièmes de l'Univers s'obscurcit dans l'inconnu et les recherches de matière noire s'intensifient sans aucun succès.

1998

L'énergie sombre

C'est dans ce contexte qu'intervient une difficulté supplémentaire. En 1998, une nouvelle méthode de mesure de l'expansion est mise au point. Elle utilise l'explosion d'étoiles lointaines comme étalon ou chandelle standard, à la manière des géomètres au bord des routes qui calculent les distances en mesurant la dimension apparente d'un bâton de longueur fixe. Surprise lors de la publication des premiers résul-

DES MODÈLES D'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS



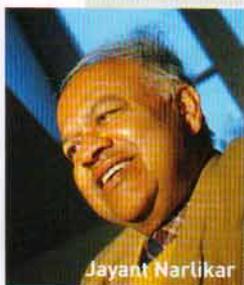
En fonction de sa densité, l'Univers ne doit pas avoir le même destin. S'il contient beaucoup de matière, l'expansion va s'arrêter puis s'inverser jusqu'à un effondrement final, le big crunch (en haut). S'il atteint une masse critique, l'expansion va se ralentir sans jamais s'arrêter (au centre). En 1998, de nouvelles mesures suggèrent qu'à cause de l'énergie sombre, l'accélération est en train de s'accroître de nouveau (en bas).

tats : les explosions les plus lointaines sont systématiquement trop faibles. Tout se passe comme si elles étaient en réalité beaucoup plus loin que ne le prévoit une expansion régulière. Plus loin, donc soumises à une expansion accélérée, et non régulière. L'expansion balbutie : le big bang à deux vitesses est né. Comme pour l'inflation, il faut encore un moteur pour cette accélération supplémentaire que les physiciens iront chercher dans une constante oubliée des équations d'Einstein, "la constante cosmologique". Seul problème : cet être mathématique n'a jamais pu trouver de signification "physique". C'est d'ailleurs pourquoi on l'avait oubliée. De nouveau, les physiciens des particules sont

Le retour de l'idée "stationnaire" ?

↘ La théorie de l'Univers stationnaire, élaborée dans les années 1950 par les Anglais Hoyle, Bondi et Gold, a été condamnée faute d'avoir fourni une explication immédiate à la découverte du fond diffus de l'Univers en 1965. De plus, il lui était aussi reproché de produire un Univers dont l'expansion était accélérée, en contradiction formelle avec les observations du moment. Enfin, manque d'élégance suprême, elle devait modifier légèrement les équations d'Einstein pour permettre une création continue de matière. Aujourd'hui, avec le nouveau tournant pris par la théorie du big bang, on assiste à un étrange retournement des faits. Les observations récentes semblent bien montrer que l'expansion de l'Univers s'est accélérée, au moins depuis plusieurs milliards d'années et, pour expliquer cette accélération, les équations du big bang ont du être modifiées pour y inclure un nouveau terme, exactement du même type que celui de création de matière introduit par Hoyle, Bondi et Gold.

L'astrophysicien indien Jayant Narlikar, collaborateur privilégié de Fred Hoyle et actuellement titulaire de la chaire internationale du Collège de France, à Paris, a beau jeu de souligner que tout était présent depuis le début dans la théorie "stationnaire", sans attendre les

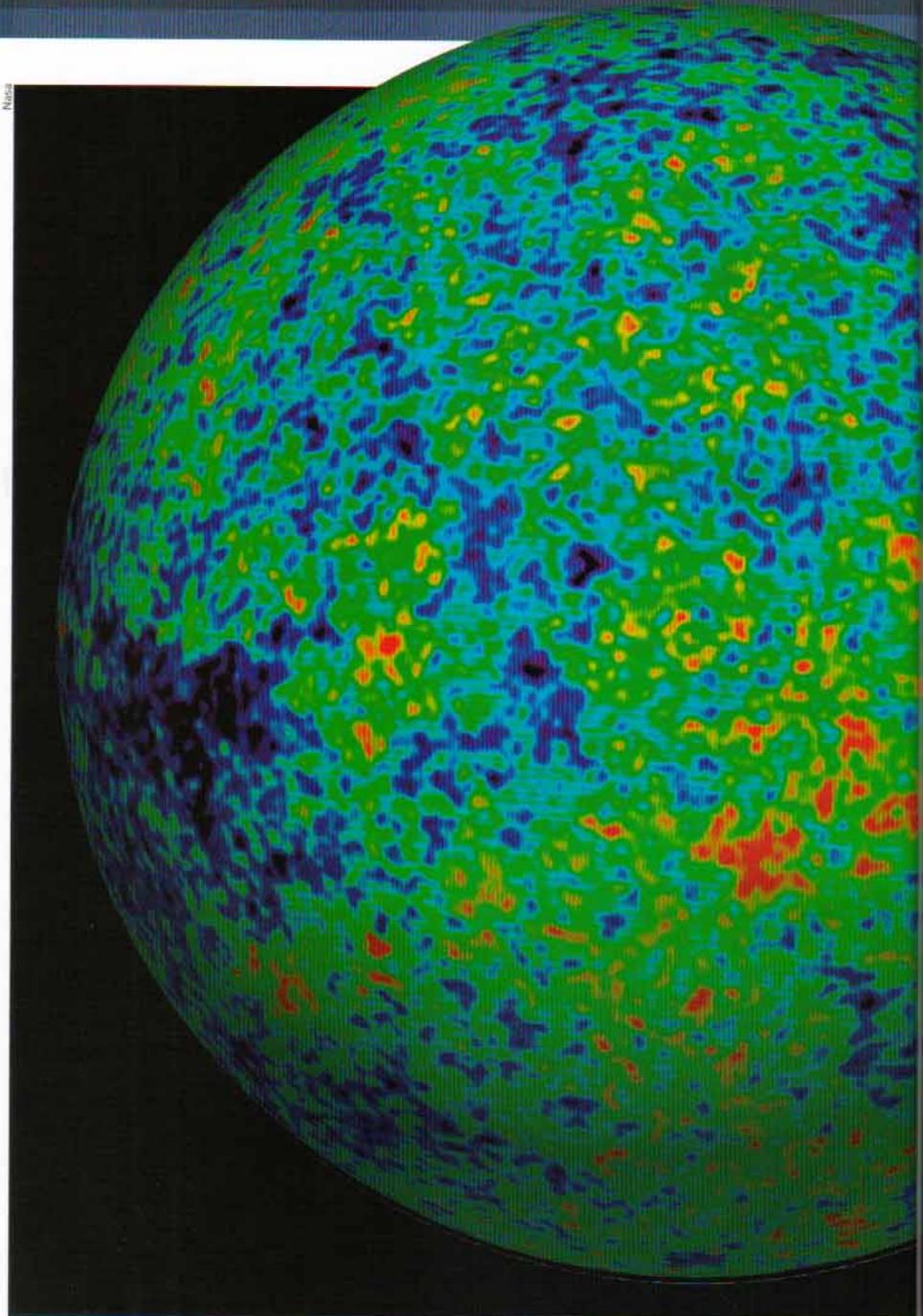


Jayant Narlikar

G. Lebedevsky

"ajustements" beaucoup plus opportunistes du big bang. Restait le fameux fond diffus que la théorie stationnaire s'est efforcée d'expliquer par une diffusion de lumière produite par des aiguilles de poussière. Or, des observations récentes semblent bien montrer l'existence de ce type de poussières. Verra-t-on un jour la revanche de la théorie éclipsée ?

Ce qui départagera aujourd'hui définitivement les deux théories seront les objets qui vont bientôt être découverts à très grande distance. Pour la théorie stationnaire, sans évolution, ils devraient être en tout point similaires à ceux qui nous entourent, tandis que pour le big bang ils devraient au contraire être radicalement différents.



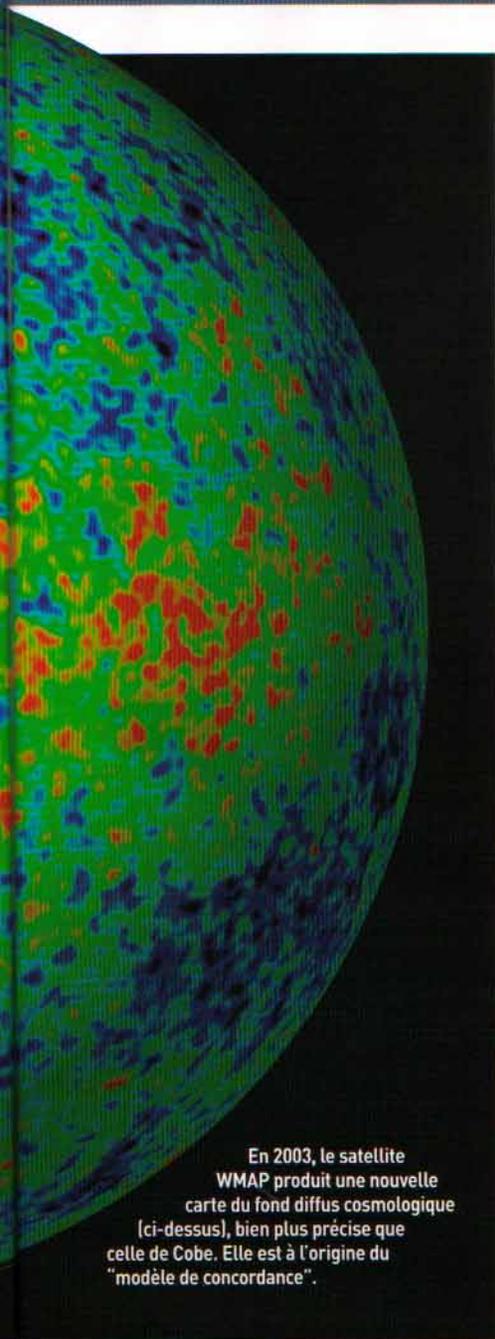
mis à contribution. De leur boîte à outils théoriques, ils fournissent bientôt une quantité magique, "l'énergie sombre" : un réservoir quasi infini d'énergie qui, de plus, augmente avec le volume de l'Univers.

2003

Le modèle de concordance

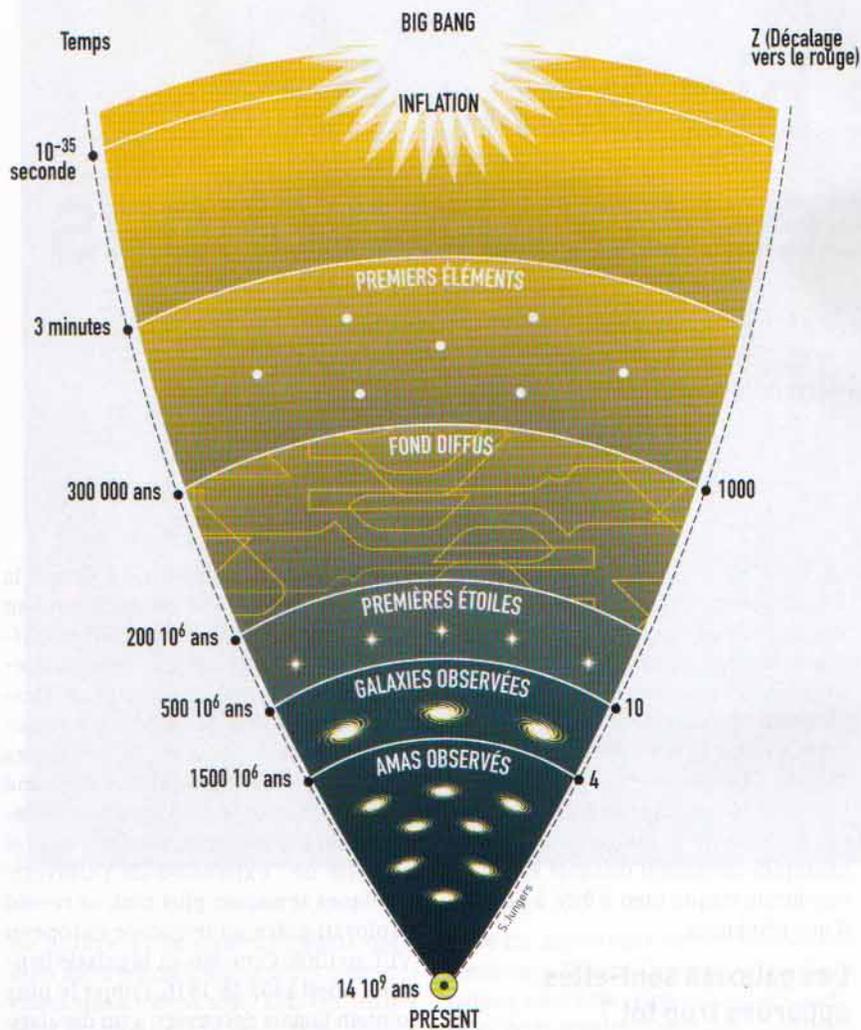
Le point d'orgue est arrivé en février 2003 avec la nouvelle version de la carte du rayonnement diffus, due au satellite WMAP⁽²⁾. Cette fois-ci, la carte est somptueuse de détails et les cosmologistes

s'acharnent à en extraire jusqu'à la dernière goutte d'information. La lecture est complexe, réservée à une poignée d'hypermécialistes car, pour retrouver la lumière de fond, il faut d'abord soustraire les contributions de tous les objets d'avant-plan situés sur toute la profondeur de l'Univers. Il faut ensuite comparer les petites inhomogénéités observées avec celles probables, présentes au début de l'expansion. Une démarche hautement hasardeuse. Pourtant, le verdict tombe, sans appel : l'Univers est désormais chiffré dans ses moindres détails et un tableau d'ensemble est présenté comme le nouveau big bang.



En 2003, le satellite WMAP produit une nouvelle carte du fond diffus cosmologique (ci-dessus), bien plus précise que celle de Cobe. Elle est à l'origine du "modèle de concordance".

Dans cette nouvelle version, appelée aujourd'hui "modèle de concordance", tout est déterminé à quelques pour cent près. L'âge de l'Univers est ainsi fixé à 13,7 milliards d'années, avec une erreur de seulement 200 millions d'années. Pour beaucoup de cosmologistes, la cause est entendue. Nous sommes définitivement entrés dans l'ère nouvelle de la cosmologie de précision et tout n'est plus qu'une affaire de décimales. "C'est un pas de géant pour la crédibilité de la cosmologie, qui est désormais devenue une vraie science dure", affirme l'Américain Max Tegmark. L'Anglais Martin Rees, l'un des nombreux défenseurs de cette nouvelle cosmologie, dresse



Ce schéma montre l'évolution de l'Univers admise dans le cadre de la théorie du big bang. Actuellement, les astronomes ne peuvent rien observer de la période antérieure à l'émission du fond diffus, soit 300 000 ans après le big bang car l'Univers était alors opaque et ne laissait s'échapper aucun rayonnement.

lui un bilan aussi précis que définitif : "Les cosmologistes peuvent maintenant proclamer avec confiance (mais avec surprise aussi) qu'en chiffres ronds notre Univers est constitué de 5 % de baryons (matière "ordinaire"), de 25 % de matière noire et de 70 % d'énergie sombre." Mais son constat se teinte aussi de doute lorsqu'il est obligé d'ajouter : "Il est néanmoins embarrassant que 95 % de l'Univers soit inconnu, car la matière noire est de nature très incertaine et l'énergie sombre un complet mystère."

À partir de là, le débat commence. Peut-on accorder crédit à un modèle d'Univers qui, en l'absence de ces deux inconnues majeures, serait en complète contradiction avec les observations ? James Peebles, un des ténors de la discipline, annonce haut et fort que "la cosmologie avance dans le noir". En inventant de l'in-

connu, les cosmologistes se placent dans la même situation qu'un climatologue qui voudrait prévoir le temps sans connaître la pluie et les nuages. La situation présente rappelle la fin du XIX^e siècle, lorsque le physicien Lord Kelvin affirmait, péremptoire, que "la physique avait fourni une description cohérente et a priori complète de l'Univers" et que seule manquait la mesure de quelques décimales supplémentaires. C'était juste avant la révolution de la relativité et de la mécanique quantique, qui bouleversa toutes nos connaissances ! Ce sont ce climat d'incertitude et les dernières difficultés apparues récemment qui laissent aujourd'hui présager une révolution imminente.

(1) Cobe : Cosmic Background Explorer.

(2) WMAP : Wilkinson Microwave Anisotropy Probe ; voir C&E n° 395, avril 2003.

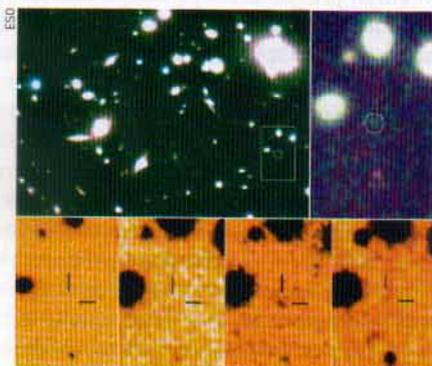
Le big bang face à ses contradictions

Les observations les plus récentes malmènent l'hypothèse du big bang. L'Univers primordial semble sensiblement différent de celui prévu par la théorie...

AUJOURD'HUI, grâce aux grands télescopes et à leurs détecteurs performants, les astrophysiciens disposent d'une description de l'Univers physique inégalée. Problème : elle se heurte de plein fouet à l'idée originelle de la théorie du big bang. Trois points posent problème : l'âge des premières galaxies, la composition chimique de l'Univers jeune et l'énigme de la matière noire. Trois exemples fortement discutés et dont la résolution risque bien d'être à l'origine d'une révolution.

Les galaxies sont-elles apparues trop tôt ?

Deux découvertes récentes sont venues bouleverser l'image des débuts de l'Univers. Il y a encore quelques dizaines d'années, la plupart des cosmologistes devaient apparaître au moins quelques milliards d'années après le début de l'ex-



Ce n'est qu'un point minuscule sur les images du télescope spatial Hubble et du VLT mais cette galaxie observée telle qu'elle était seulement 470 millions d'années après le big bang pose un problème : comment a-t-elle eu le temps de se former ?

pansion, le temps nécessaire pour que la faible force de gravité puisse lentement rassembler la matière, initialement diffuse. Or, en février 2004, à l'aide du télescope Keck (Hawaï), une équipe de l'Institut technologique de Californie a découvert, derrière l'amas de galaxies Abell 2218, une vraie galaxie dans une tranche d'Univers dont l'âge est de seulement 750 millions d'années, selon la loi actuelle de l'expansion de l'Univers. Quelques semaines plus tard, ce record explosait grâce au télescope européen VLT, au Chili. Cette fois-ci, la galaxie baptisée Abell 1835 IR 1916, l'objet le plus lointain jamais découvert, a un décalage vers le rouge (**Zoom**) qui atteint le chiffre fatidique de 10 — ce qui la place dans une région d'Univers n'ayant que 470 millions d'années d'existence, soit moins de 3 % de son âge actuel. La galaxie est petite, moins d'un dixième de notre Voie lactée, mais déjà en plein boom de formation d'étoiles. Comment des objets aussi complexes, faits de gaz et d'étoiles, peuvent-ils se forger en un laps de temps si court à partir de l'Univers homogène ? La question est sur la table de travail de ceux qui tentent de reproduire par le calcul l'évolution des phases très précoces de l'Univers. Leurs simulations restent rudimentaires car il est encore impossible de savoir exactement quand et comment sont apparues les premières étoiles ⁽¹⁾. Pour l'instant, les simulations se font donc "en aveugle", notamment sans tenir compte des phénomènes

explosifs qui ralentissent la formation des étoiles. Avec toutes ces approximations et même avec l'appoint de l'énorme masse de l'hypothétique matière noire, censée accélérer la formation des premiers objets, ces galaxies précoces sont à l'extrême limite des prédictions théoriques. Plus inquiétant encore : en janvier dernier, les premiers résultats d'une équipe canadienne utilisant le télescope géant Gemini (Hawaï) ont révélé, dans des tranches d'Univers d'âges entre 3 et 6 milliards d'années, plus de 300 galaxies massives évoluées, des galaxies elliptiques considérées comme devant n'apparaître que beaucoup plus tard, par fusion d'autres galaxies. À ces époques, ces galaxies tardives apparaissent aussi incongrues que des chênes centenaires dans une pépinière. Ainsi, la physionomie de l'Univers très jeune ne semble guère en accord avec les prévisions les plus simples.

Y a-t-il une évolution dans l'Univers ?

Dans la théorie cosmologique standard de l'expansion, la composition de l'Univers évolue au cours du temps. Les premiers éléments, l'hydrogène, l'hélium et quelques traces d'éléments légers, apparaissent très tôt au sein du gaz dense initial, moins de 3 minutes après le début de l'expansion. Après cette première étape, baptisée "nucléosynthèse primordiale", tous les autres éléments sont produits beaucoup plus tard, lorsque se forment les étoiles et qu'elles explosent en rejetant les éléments chimiques qu'elles ont fabriqués. Au fil des différentes générations stellaires, la composition chimique de l'Univers s'enrichit donc progressivement. Est-ce vraiment cette évolution que nous décrivent les observations ? Rien

n'est moins sûr car une série de résultats récents est pour le moins troublante.

Tout d'abord, le programme Sloan de détection d'objets lointains, entrepris au mont Apache (Nouveau-Mexique), vient de fournir un catalogue de 32 quasars, noyaux ultralumineux de galaxies, situés dans des tranches d'Univers jeune d'âges échelonnés entre 1 et 4 milliards d'années. Or la quantité d'élé-

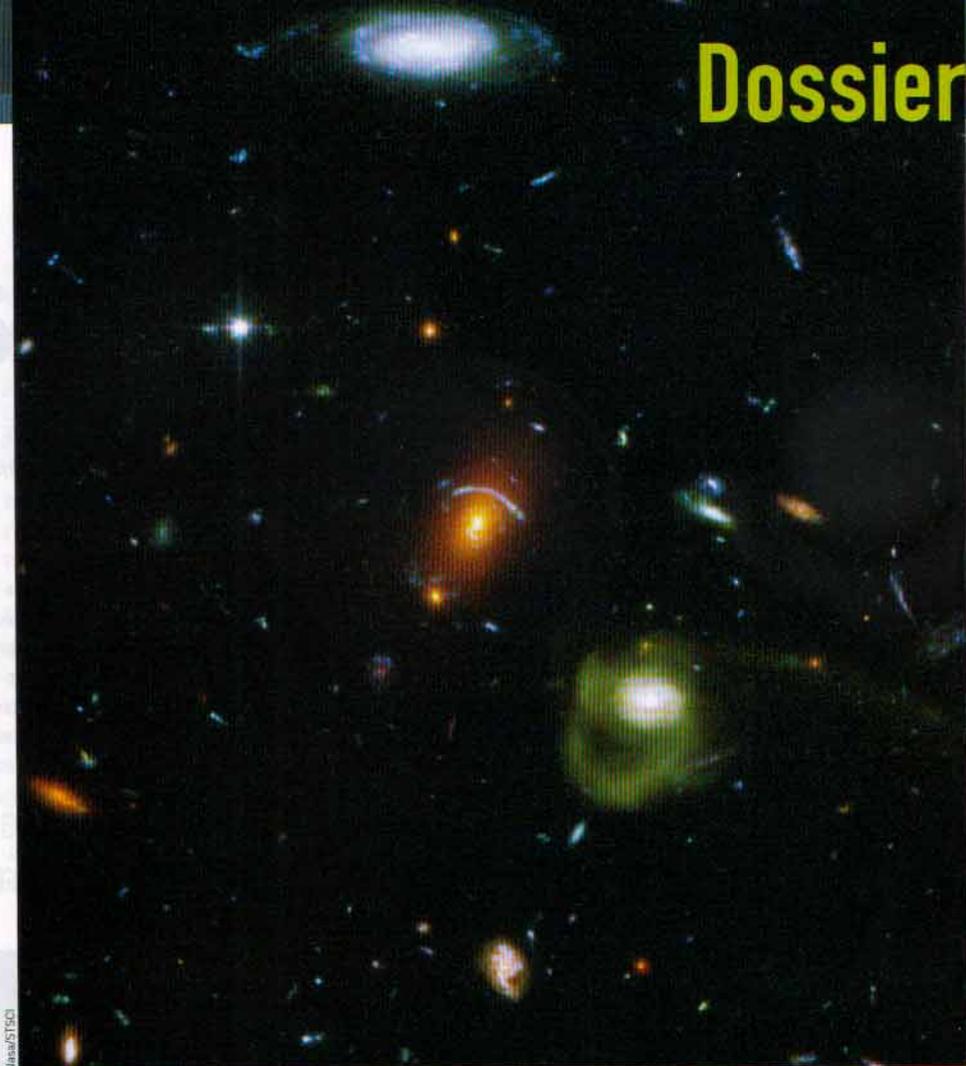
→ Zoom

En raison de l'expansion cosmique, plus une galaxie est distante, plus elle s'éloigne de nous à grande vitesse, et plus sa lumière est décalée vers le rouge. Sa vitesse d'éloignement peut être mesurée par le décalage vers le rouge, noté z . Si la loi d'expansion de l'Univers est connue, z est donc une mesure de la distance, qui s'exprime souvent en temps mis par la lumière pour nous parvenir.



Les quasars lointains (ci-dessus, la flèche indique l'un d'eux), considérés comme les ancêtres des galaxies actuelles, contiennent trop fer. Comment cet élément, le plus lourd qui soit, a-t-il pu être répandu aussi tôt dans l'évolution de l'Univers ?

Tout indique que de la matière invisible se trouve dans les amas de galaxies. Les arcs gravitationnels (au centre de l'image) permettent même de peser cette masse cachée... Sauf que celle-ci échappe toujours à la moindre détection directe.



ments chimiques, en particulier le carbone, mesurée en direction de ces différents objets semble être assez rigoureusement identique. Contrairement aux prédictions, tout se passe comme si l'Univers était enrichi très tôt en éléments, non produits au début de l'expansion, pour ne plus évoluer que faiblement par la suite.

Cette conclusion s'est vue confirmée par la découverte grâce au satellite XMM d'une quantité importante de fer, équivalant à celle observée dans l'Univers actuel, en direction d'un quasar lointain situé dans un passé où l'Univers n'avait encore que 1,5 milliard d'années⁽¹⁾.

Comment résoudre ces contradictions ? La solution invoquée aujourd'hui est de faire appel à une première génération d'étoiles très massives et de brève durée de vie, qui auraient inséminé le monde en moins de 200 millions d'années. Mais ces étoiles sont encore hypothétiques et rien

ne prouve qu'en un temps aussi court elles aient pu disséminer leurs éléments chimiques à travers tout l'Univers. Un des tests fondamentaux reste donc encore une fois repoussé vers l'inconnu.

Où est la matière noire ?

Un des composants majeurs du big bang manque à l'appel. Trente ans après le début des recherches, la matière noire est toujours introuvable et dorénavant les astrophysiciens ne sont plus d'accord sur la quantité à chercher.

Pour eux, la matière noire ne se manifeste que par sa gravité. Elle est aujourd'hui l'agent essentiel qui permet par son attraction de former des galaxies malgré l'extrême homogénéité de l'Univers primordial et l'expansion qui contrarie la condensation de la matière.

Pourtant, personne ne l'a jamais vue. Comme elle devrait être partout, intimement mêlée avec l'autre matière, une bat-

terie de détecteurs terrestres ont été construits. Devant l'énigme totale de sa nature, c'est vers d'hypothétiques particules de la physique qu'il faut se tourner. On a longtemps pensé à une particule connue, le neutrino, mais finalement celle-ci s'est révélée trop légère. Les recherches s'orientent aujourd'hui vers des superparticules comme le neutralino, prévu par la supersymétrie, une extension de l'actuel modèle standard des particules. Cachées sous de hautes montagnes pour se protéger de toute influence parasite, des expériences comme Edelweiss, dans le tunnel du Fréjus, Dama sous le Gran Sasso, près de Rome, ou CDMS, dans une mine du Minnesota (États-Unis), ont commencé leur chasse mais elles attendent toujours vainement une faible interaction de particules dont le flot devrait pourtant atteindre un milliard par mètre carré et par seconde !

L'absence de cette matière noire donne aujourd'hui un élan nouveau à ceux qui remettent en cause la loi de la gravitation à la base de ces effets.

(1) Voir C&E n° 408, mai 2004.

(2) Voir C&E n° 398, juillet 2003.

Les galaxies les plus lointaines se montrent bien trop évoluées

L'Univers en chantier

Si les objections au big bang devaient l'emporter, que proposer à sa place ?

Certains scientifiques explorent de nouvelles voies qu'il faudra confronter à des observations.

Il y a des indices qui ne trompent pas. Lors du colloque "Physique et interrogations fondamentales", tenu à Paris à la rentrée 2003, une brillante scientifique, avec l'assurance que donnent plus de trente ans d'expérience, propose avec un exposé sur "Les quatre dimensions du réel" de revenir une fois encore sur les fondements de la physique dite "classique". Un peu plus tard, dans la même salle, les deux exposés les plus novateurs sont le fait de jeunes chercheurs de talent, Pierre Binétruy et Jean-Philippe Uzan, qui s'attaquent le premier aux "Nouvelles dimensions de l'Univers" et le second aux "Variations des constantes fondamentales". Une opposition frontale. D'un côté, les tenants d'une physique qui tente de raffermir les concepts de temps, d'espace, de particules, tout droit issus des philosophes grecs. De l'autre, un contingent grossissant de scientifiques, qui voient déjà les bienfaits qu'ils peuvent tirer à se libérer d'un carcan d'idées désormais trop étroites pour affronter le réel.

Le divorce est patent et il rappelle les années 1930, lors de la naissance de la mécanique quantique. Cette physique "hors-la-loi" qui, empruntant des chemins interdits, aboutira finalement à la révolution des technologies modernes n'était, à ses débuts, défendue que par une poignée de physiciens. Aujourd'hui, ce sont la relativité et les constantes fondamentales qui sont en ligne de mire car, devant l'importance des problèmes actuels, la cosmologie se tourne en effet vers deux voies de remise en cause fondamentales.

La première voie est celle du divorce avec la relativité et la recherche d'une nouvelle théorie quantique de la gravitation. Après beaucoup de tentatives, la révolution est finalement venue d'une modification radicale du concept classique de particules que les physiciens ont baptisée "théorie des cordes". Dans cette nouvelle théorie, les particules ne sont plus des objets ponctuels parfaits mais des "cordes", des

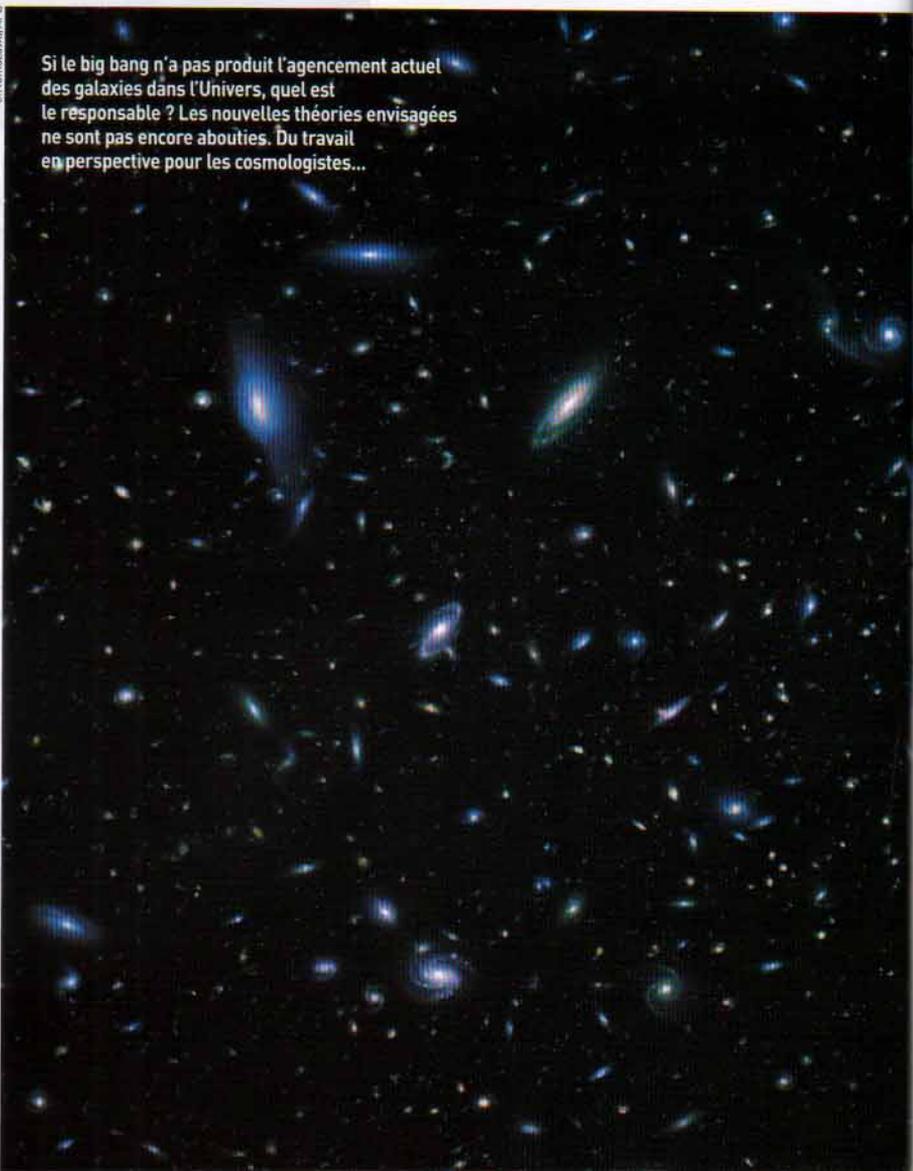
objets doués de dimensions supplémentaires. L'espace acquiert alors non plus trois dimensions, mais dix. Les dimensions supplémentaires sont minuscules, enroulées sur elles-mêmes, de telle sorte qu'elles sont invisibles. Les conséquences de cette théorie sont très complexes mais une de ses plus spectaculaires réussites est de prédire l'existence d'un "graviton", particule capable de transmettre la gravitation. Celle-ci redevient alors une force

comme les autres. La théorie est loin d'être aboutie mais elle a l'immense mérite de résoudre le problème des "infinis". En raison de ces dimensions supplémentaires, particules et matière ne peuvent jamais être réduites à un volume infiniment petit comme c'était le cas auparavant en physique classique, au cœur des trous noirs et au début du big bang.

Cette théorie est aujourd'hui en chantier. Ses plus grandes limites sont nos outils

Si le big bang n'a pas produit l'agencement actuel des galaxies dans l'Univers, quel est le responsable ? Les nouvelles théories envisagées ne sont pas encore abouties. Du travail en perspective pour les cosmologistes...

S. HERNANDEZ/ARF



mathématiques car elle est si complexe que tout ne peut encore être calculé. L'un de ses plus grands promoteurs, Edward Witten, souvent cité comme le nouvel Einstein confiait pourtant récemment : *"J'ai l'impression que nous sommes si près du but avec la théorie des cordes que... la forme finale de la théorie pourrait tomber du ciel dans les mains de quelqu'un."* Certains tests astronomiques ont déjà été entrepris. Ainsi, les "gravitons" peuvent être produits en grande quantité lors d'explosions stellaires et rester en orbite autour de l'étoile à neutrons résultant de l'explosion. En se désintégrant lentement, ils peuvent produire des rayons gamma. C'est en comparant le flux mesuré par le

satellite Compton avec celui attendu des étoiles à neutrons du centre de la Galaxie, qu'une équipe française du CEA vient de montrer qu'on pouvait calculer des limites précises sur les dimensions supplémentaires. Personne ne sait encore apprécier les conséquences de ce changement radical de concept. La nouvelle gravité englobera bien sûr les résultats antérieurs de la relativité, mais elle apportera aussi des modifications qui, à l'échelle de l'Univers, auront une importance capitale. La deuxième remise en cause vient d'une question essentielle : les lois physiques que nous mesurons dans nos laboratoires sont-elles partout les mêmes dans l'Univers ? Jusqu'ici, la réponse était affirma-

tive, moins par véritable démonstration que par souci de simplification, selon le principe copernicien suivant lequel nous sommes supposés vivre dans une région similaire à toutes les autres.

Or, notre exploration de l'Univers lointain est peut-être en train de nous indiquer le contraire. Depuis 1999, une série d'observations de quasars, noyaux lumineux de galaxies visibles à grande distance, semblent en effet montrer qu'une des constantes fondamentales — la constante de "structure fine", qui régit l'interaction électromagnétique — n'est pas vraiment constante mais légèrement plus faible à grande distance. L'effet est minime, et le résultat a été mis en cause par des observations européennes. Mais le débat n'est pas clos et il ouvre des horizons nouveaux. Par effet "domino", même une très faible variation d'une des constantes physiques devrait entraîner une cascade d'effets sur les autres. L'ensemble des lois pourrait donc être variable selon les régions de l'Univers. De telles variations, déjà envisagées par Paul Dirac en 1930, reviennent en force aujourd'hui. Parmi toutes les hypothèses envisagées figure bien sûr une remise en cause de la plus célèbre des constantes, celle de la vitesse de la lumière. L'équipe anglaise de John Barrow et Joao Magueijo a récemment démontré que, dans l'Univers primordial, une vitesse de la lumière plus grande qu'à présent permettrait de résoudre le problème d'homogénéité de l'Univers sans avoir à recourir à la discutabile "inflation".

Contrairement à tous ceux qui prétendent avoir déjà en main la solution, la cosmologie est donc tout naturellement appelée à aller vers d'autres complexités. Même si on n'a jamais vraiment accepté que les cercles des planètes soient des ellipses, il a bien fallu l'admettre car la nature n'est pas comme on la rêve. Nous vivons dans l'enfance de l'astronomie et, comme des enfants, croyons encore en un monde simple. Mais il faudra bien un jour lâcher la rampe et, à la lumière des découvertes de demain, les résultats d'aujourd'hui apparaîtront dérisoires. La cosmologie n'a jamais été aussi bien décrite que par le célèbre Edwin Hubble, qui affirmait : *"D'ici, nous mesurons des ombres et nous recherchons parmi les fantômes de nos erreurs (de mesure) des points de repère qui sont à peine plus substantiels."* ■

La quête des gravitons et des "constantes variables" a déjà commencé

