

Énergie so

Matière noire

# MOND

Une nouvelle thé

Inflation

**La théorie du big bang** est face à un dilemme. Ses équations semblent parfaites, mais les "ingrédients" auxquels celles-ci font appel demeurent pour l'instant totalement hypothétiques... Ils ont pour nom "matière noire" et "énergie noire", et ne représenteraient pas moins de 95 % de l'Univers. Dans cette situation de "crise", une théorie, élaborée en 1983, revient sur le devant de la scène. Il s'agit de Mond, une modification de la gravitation imaginée par l'Israélien Mordehai Milgrom, qui élimine au moins une partie de ces ingrédients de nature inconnue. Même si elle doit encore être validée par des observations, sa résurrection symbolise le besoin, pour les cosmologistes, de trouver de nouvelles voies pour décrire l'Univers.

Dossier réalisé par  
Jean-Marc Bonnet-Bidaud,  
astrophysicien au CEA

## L'Univers simplifié

Page 48

## La matière noire reste introuvable

Page 50

## Une mystérieuse énergie sombre complique le jeu

Page 54

# orie de l'Univers

## Les cosmologistes en quête d'alternatives

Page 56

### CE SUJET VOUS INTÉRESSE ?

Retrouvez **Philippe Henarejos**, rédacteur en chef de *Ciel & Espace* avec **Christian Sotty** et **Jean-Yves Casgha** dans l'émission **MICROMÉGA** sur RFI (89 FM) le 2 décembre à 11 h 10 TU.





J. Schelder

Les étoiles des galaxies spirales, comme ici M82, tournent trop vite par rapport au champ gravitationnel de toute la matière visible. C'est ainsi que les astronomes ont soupçonné l'existence d'une matière noire, invisible.

de très loin du point de vue théorique, Mond est désormais prise très au sérieux", note ainsi le physicien James Binney de l'université d'Oxford. Et si finalement, la matière noire n'existait pas ?

L'idée d'une telle matière est apparue en 1932, quand l'Américain Fritz Zwicky constate que la vitesse des galaxies dans les grands amas de galaxies est beaucoup trop forte. Si élevée, en fait, qu'en toute logique, les galaxies devraient s'échapper de ces amas. Pour les maintenir, il faut donc imaginer une source de gravitation plus puissante, une masse plus importante que la seule matière visible, d'où le concept de "matière noire".

# L'Univers simplifié

**Et si la matière noire** n'existait pas ? Tel est le postulat de départ de la théorie Mond, qui tente de décrire l'Univers tel que nous l'observons. Après plus de vingt ans de gestation, force est de reconnaître qu'elle le fait avec succès.

**"** L n'y a aucun besoin de matière noire dans l'Univers" et si beaucoup d'experts continuent à y croire, c'est parce que "c'est leur gagne-pain, leur revendication à la célébrité. Ils ne changeront jamais d'avis". Depuis le début des années 1980, l'astrophysicien israélien Mordehai Milgrom n'en démord pas : l'Univers est bien tel qu'on le voit, c'est-à-dire constitué de grands espaces vides ponctués par des amas de galaxies. Et sans aucune masse invisible, la "matière noire" !

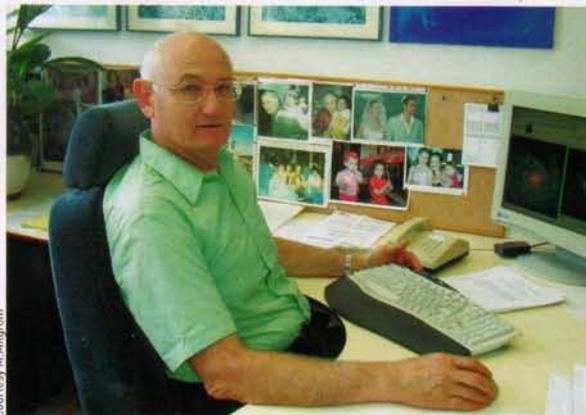
Cette conviction, il l'acquiert dès 1983 lorsqu'il découvre qu'une toute petite modification de la loi de la gravité de Newton suffit à résoudre l'un des problèmes fondamentaux de la cosmologie : la rotation trop rapide des étoiles et des galaxies. Si les vastes spirales scrutées par les grands télescopes tournent aussi vite, ce n'est pas parce qu'elles sont sous l'emprise d'une masse indétectable, mais bien parce que la loi de la gravitation universelle n'est pas celle que l'on croit ! D'un seul coup, grâce à sa théorie, qu'il baptise

Mond (pour Modified Newton Dynamics, ou Dynamique de Newton modifiée), il parvient à éliminer tout recours à la matière noire.

Bien que séduisante, Mond a connu une longue éclipse en raison de ses difficultés à expliquer certaines observations astronomiques. Mais aujourd'hui elle revient en force, et la floraison de publications récentes est là pour en témoigner. "Partie

## Étoiles en excès de vitesse

Le problème devient encore plus criant à partir de 1978. L'accumulation des observations révèle alors que le même "syndrome" affecte le mouvement des étoiles au sein d'une galaxie. Les centaines de milliards d'étoiles qui constituent le disque d'une galaxie ne sont pas immobiles. Comme dans un gigantesque carrousel, elles tournent autour du centre galactique. Ainsi, le Soleil met environ 250 millions d'années pour faire un tour complet de la Voie lactée. Or, ce que montrent les observations est surprenant : plus on s'éloigne du centre, plus les étoiles tournent vite. Avec la force centrifuge, elles devraient donc être éjectées, tout comme un objet posé sur un plateau tournant est projeté vers l'extérieur quand la rotation s'accélère. La seule force qui retient les étoiles est la gravité : elle agit comme un



Pour résoudre le problème de la matière noire, dès 1983, l'Israélien Mordehai Milgrom pose une question essentielle : et si la variation de la gravitation en fonction de la distance était différente de ce que croyait Newton ? Car si c'est le cas, sa théorie, Mond, expliquerait efficacement l'Univers observable.

## UN SIÈCLE DE THÉORIES

L'observation de la fuite des galaxies confirme l'expansion de l'Univers.

1920  
1930  
1940  
1950  
1960  
1970  
1980  
1990  
2000  
2010

L'existence de matière noire est soupçonnée par Fritz Zwicky.

Georges Lemaître propose son idée de l'atome primitif.

Einstein publie la théorie de la relativité générale.  
La relativité générale indique un Univers en expansion.

Fred Hoyle appelle ironiquement "big bang" la théorie de Lemaître.

Fred Hoyle propose le modèle de l'Univers stationnaire.

George Gamov prédit l'existence du fond cosmologique micro-ondes.

Alan Guth propose l'inflation pour expliquer l'aspect du fond diffus cosmologique.

Mordehai Milgrom propose la théorie Mond.

Le fond cosmologique est détecté par hasard.

L'idée d'une énergie sombre responsable de l'expansion accélérée est largement acceptée.

Le satellite Cobe mesure les fluctuations du fond cosmologique et confirme le big bang.

Observations qui suggèrent une expansion accélérée de l'Univers.

Le satellite WMAP mesure le fond cosmologique plus précisément que Cobe.

THÉORIE

OBSERVATION

## Petit glossaire de cosmologie

## → Énergie sombre

Force inconnue responsable d'une accélération de l'expansion de l'Univers depuis environ 5 milliards d'années. Son existence semble démontrée par la distance de certaines explosions d'étoiles, les supernovae. L'énergie sombre augmente avec le volume de l'Univers et, si son action perdure, elle sera responsable d'un éloignement de plus en plus rapide des galaxies.

## → Expansion

Mouvement d'ensemble de l'Univers qui conduit les galaxies et les amas de galaxies à s'éloigner les uns des autres depuis le big bang. Les astronomes l'ont

découvert à la fin des années 1920 grâce aux observations menées par l'Américain Edwin Hubble.

## → Fond diffus cosmologique

Rayonnement de fond de l'Univers, témoin de la première lumière. La carte de ce rayonnement nous renseigne sur la distribution de matière, il y a plus de 13 milliards d'années, avant la formation des étoiles et des galaxies.

## → Inflation

L'inflation est une période très brève d'expansion ultrarapide de l'Univers intervenue tout juste une minuscule fraction de seconde après le début de l'expansion. Cette hypothèse, introduite en

1980 par l'Américain Alan Guth, est nécessaire pour expliquer la géométrie et la très grande homogénéité de l'Univers dans des régions qui n'ont pu communiquer entre elles. À la source de cette fulgurante dilatation, une énorme "énergie sombre", qui pourrait être l'énergie du vide quantique.

## → Matière noire

Matière inconnue totalement différente de celle que nous connaissons, qui n'émet aucune lumière et n'interagit avec la matière des atomes que par la gravitation. Dans la théorie du big bang, son existence est indispensable pour expliquer la formation des galaxies.

## → Modèle de concordance

Version actuelle de la théorie du big bang combinant l'inflation, la matière noire et l'énergie noire afin d'expliquer l'émergence des galaxies et des étoiles, et la géométrie presque "plate" de l'Univers.

## → Théorie des cordes

Nouvelle théorie physique qui invente un concept inédit où les constituants des particules de matière ne sont pas des points mais des "cordes" ou des "membranes". Cette innovation donne l'espoir d'unifier dans une même description toutes les forces fondamentales.

élastique qui se tend afin d'empêcher leur éjection. Plus la vitesse est élevée, plus l'élastique doit être fort pour résister. La gravité doit donc augmenter vers l'extérieur d'une galaxie. Or, selon Newton, la gravité augmente avec la masse. Conclusion : la masse d'une galaxie doit s'accroître à mesure que l'on s'éloigne de son centre. Problème : toutes les observations disent le contraire. Il y a de moins en moins de matière, gaz ou étoiles, visible vers l'extérieur d'une galaxie. L'écart avec la quantité attendue est énorme : plus de 90 % de la matière manquerait à l'appel. Là encore, la matière noire vient combler ce manque...

Les astronomes ont alors tenté de détecter cette mystérieuse composante clandestine. Mais, en presque trente ans, ils ont fait chou blanc ! (lire page 51) C'est cet échec qui a poussé Milgrom à s'interroger sur la validité même de la loi de la gravitation. D'autant que la gravitation est la moins bien connue des forces fondamentales. La fameuse "constante de gravitation", celle qui règle l'intensité de l'attraction entre deux corps, n'est en effet déterminée qu'à quelques pour cent près. Une véritable anomalie, comparé aux autres constantes de la physique, dont la précision est bien meilleure. De plus, la gravité est une force si faible qu'elle n'a pas encore pu être testée à très courte distance, ni aux très longues distances habituelles en astronomie.

### Et si Newton s'était trompé ?

Milgrom s'est donc essayé audacieusement à faire une toute petite entorse à la sacro-sainte loi de Newton. Au lieu de laisser la force d'attraction entre deux corps décroître comme le carré de leur distance, il imagine qu'au-delà d'une certaine distance, la gravitation diminue beaucoup moins rapidement — seulement comme l'inverse de la distance. Surprise ! tout rentre alors dans l'ordre : les étoiles de la périphérie des galaxies tournent bien à la vitesse prescrite. La recette fait miracle. Mais ses détracteurs gardent un argument de poids. La véritable théorie de la gravitation est celle donnée par la relativité d'Einstein ; la loi de Newton n'en est qu'une simplification. Puisqu'on la

**Isaac Newton (ci-contre), mais aussi Albert Einstein, dans leurs travaux sur la gravitation, ont-ils pris en compte tous les paramètres ? La théorie Mond suppose que non.**



Grâce à son télescope de 1,5 m, le satellite Planck, de l'ESA, devrait à partir de l'été 2007, observer très précisément le rayonnement de fond cosmologique. De quoi vérifier Mond.

change, il faut aussi modifier la relativité. La tâche semble surhumaine, et on croit Mond enterrée sans rémission.

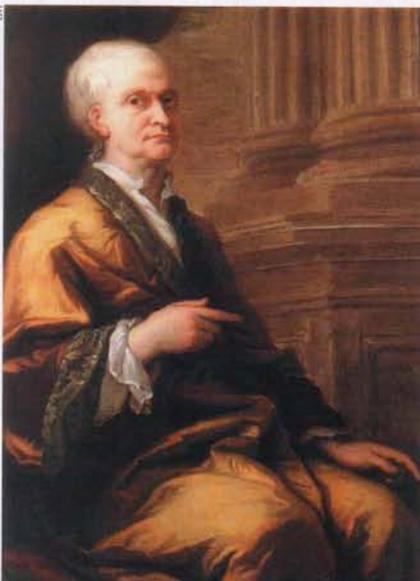
Le récent renouveau de la théorie vient d'un autre chercheur israélien, Jacob Bekenstein. Pendant plus de vingt ans, il tente d'insérer Mond dans la relativité... et trouve finalement la solution en 2004. Au prix d'une modification un peu plus complexe et de l'introduction de trois nouveaux paramètres, il montre que Mond reste en accord avec Einstein. Sa publication dans la *Physical Review* en octobre 2004 fait aujourd'hui référence, et sa démonstration n'a pas trouvé de contradicteurs. Dans la foulée, de plus en plus de scientifiques<sup>(1)</sup> considèrent maintenant Mond comme une théorie alternative viable, même si la majorité doute encore qu'elle puisse résoudre tous les problèmes. Le débat est très vif, mais il faut reconnaître que Mond a marqué des points.

Premier succès pour la gravité modifiée : elle parvient désormais à expliquer les

"mirages gravitationnels", c'est-à-dire le fait que la lumière soit déviée lorsqu'elle passe à proximité immédiate d'une galaxie massive. Jusqu'ici, la déviation mesurée était beaucoup trop importante par rapport à la masse visible de la galaxie, et il fallait invoquer une énorme quantité de matière noire. Mond en fait l'économie car, pour une masse plus faible, son attraction et donc sa déviation sont plus fortes.

### Mond marque des points

Deuxième succès, encore plus emblématique : la nouvelle théorie peut reproduire assez fidèlement les inhomogénéités du fond diffus cosmologique mesurées par le satellite WMAP (voir p. 53). En mai 2005, l'équipe de Constantinos Skordis, de l'université d'Oxford, a calculé l'action de la "nouvelle gravité" sur les petites condensations produites 300 000 ans après le big bang. L'accord avec l'image de WMAP est presque parfait. Là aussi, en l'absence de Mond, pour produire ces inhomogénéités, il faut ajouter... la matière noire. Un prochain test est encore à venir. Pour l'instant, WMAP n'a pas pu mesurer les plus fins "grumeaux". Or, si la matière noire existe, ils devraient être de plus grande amplitude que ceux formés par Mond. Le satellite Planck, dont le lancement est prévu en 2007, devrait apporter son verdict. En attendant, la nouvelle théorie tient toujours. "Mond a été testée avec succès dans un très grand nombre de cas et si l'idée de matière noire n'était pas aussi ancrée dans l'esprit des astronomes, il y aurait peu de doute aujourd'hui sur sa capacité à décrire l'Univers", affirme Riccardo Scarpa, de



L'Observatoire européen austral (ESO), qui a défendu Mond en 2005 au Portugal, lors d'un congrès intitulé "Première crise en cosmologie". *De nos jours, le problème n'est plus de savoir si Mond marche, mais plutôt que Mond et la matière noire donnent deux conceptions différentes mais équivalentes des phénomènes cosmiques.*"

Sur une idée simple, une modification presque "cosmétique" de la gravitation, la théorie de Milgrom est donc devenue étonnamment productive. L'avenir dira si c'était l'idée du siècle. La détection directe d'une seule particule de matière noire signifierait son arrêt de mort. Mais, à l'heure actuelle, les physiciens s'activent

pour déceler les conséquences infimes de la gravité modifiée dans le laboratoire grandeur nature qu'est le Système solaire. L'accélération anormale constatée pour la sonde Pioneer (voir C&E n° 438, p. 68) pourrait être l'un de ses effets. ■

(1) Robert Sanders de l'Institut Kapteyn de Groningen, S. McGaugh de l'université du Maryland, Riccardo Scarpa de l'ESO et James Binney d'Oxford.

## La matière noire reste introuvable

LE RETOUR en force de la théorie Mond aujourd'hui tient en grande partie à un fait tenace : à ce jour, toutes les recherches directes de la matière noire ont échoué. Les astronomes ont tout d'abord voulu vérifier si une partie de cette masse invisible ne pouvait pas être tout simplement des étoiles lointaines tellement faibles qu'elles en devenaient indétectables. De grands programmes ont été lancés pour déceler ces astres obscurs grâce à la déviation (et l'amplification) de la lumière qu'ils pouvaient produire, mais le verdict est désormais définitif. Les résultats de l'expérience française Éros 2, publiés en juillet 2006, sont venus clore une polémique avec l'équipe concurrente américaine Machos. Alors que Machos maintenait une proportion possible de ces étoiles, Éros 2 n'a détecté aucun phénomène de déviation en surveillant plus de dix millions d'étoiles, limitant ainsi la proportion de petites étoiles dans le halo de la Galaxie à moins de 7%. Si la matière noire existe, il faut donc admettre qu'elle n'est pas "ordinaire" — sa nature diffère de celle de la matière connue. En dehors de la gravitation, elle n'interagit pas (ou

peu) avec celle-ci. Or les physiciens inventent sans cesse de nouvelles particules qui pourraient faire office de candidates. Baptisées Wimps (particules massives faiblement interactives), celles-ci n'ont pour l'instant jamais été observées.

### La détection de nouvelles particules pourrait signer l'arrêt de mort de Mond

Comment les détecter ? En disposant au fond de puits des bolomètres, qui ne sont autres que des thermomètres ultrasensibles capables de mesurer un très faible souffle d'énergie. Comme celui qui dégagerait le passage d'une Wimp. Le reste est affaire de patience. Depuis 2003, au fond d'une mine du Minnesota (États-Unis), à 780 m de profondeur, veille une batterie de douze bolomètres, refroidis à 50 milli-degrés au-dessus du zéro absolu (50 mK). En France, c'est à Modane, dans le tunnel du Fréjus, sous 1700 m de roche que sont tapis les huit bolomètres de l'expérience Edelweiss 2<sup>(1)</sup>. Mais pour le moment, ces pièges à particules exotiques n'ont attrapé aucune proie. Bien que les candidates soient très rares, les physiciens escomptaient tout de même plusieurs captures par an... Il est prévu de multiplier les chances en ajoutant des

détecteurs, 28 d'abord, puis peut-être 120, pour Edelweiss d'ici plusieurs années. Mais ces résultats négatifs exacerbent le débat. La matière noire existe-t-elle vraiment, et sous quelle forme ? Pourquoi ne voit-on pas de particules noires, planètes noires ou astres noirs ?

On attend beaucoup maintenant du LHC (Grand Collisionneur de hadrons), un accélérateur surpuissant, mis en service début 2007 à Genève. Il pourrait produire incidemment une de ces particules rares. Néanmoins, plus le temps avance, plus le doute s'installe... Et plus les théories alternatives à la matière noire, comme Mond, se renforcent. ■

(1) Mise en service en janvier 2006, elle succède à Edelweiss 1, débutée en 2002.

Les astronomes supposent l'existence de la matière noire en raison des mirages gravitationnels provoqués par des amas de galaxies (à gauche), mais elle leur échappe toujours. Les physiciens auront-ils plus de chance en saisissant le passage d'une Wimp grâce aux détecteurs placés sous les montagnes (ci-contre, les bolomètres d'Edelweiss) ?



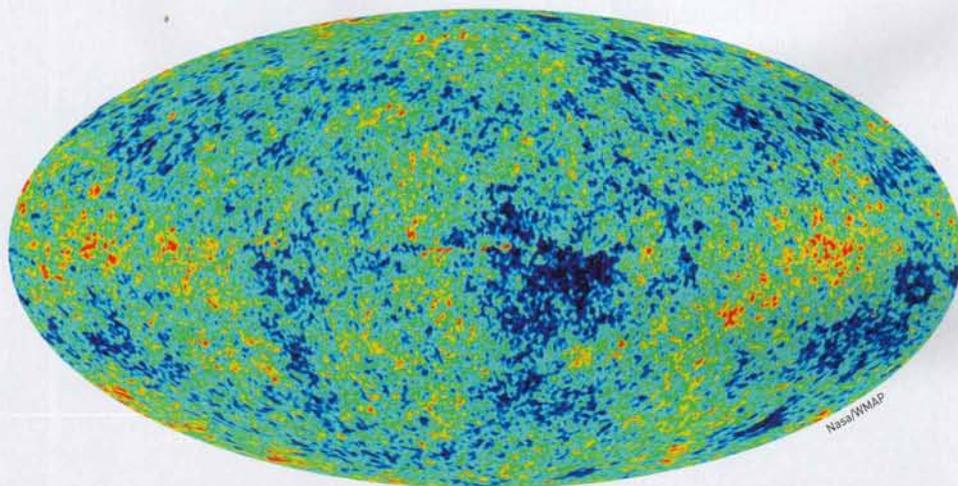
# Une mystérieuse énergie sombre complique le jeu

**Les difficultés de la cosmologie** ne s'arrêtent pas à l'introuvable matière noire. Il existerait aussi une énergie sombre qui pèserait de tout son poids dans le destin de l'Univers.

**L**a toute première image de l'Univers a livré son verdict. Selon les récentes observations du satellite WMAP <sup>(1)</sup>, publiées en mars 2006, en plus de la matière noire, près des trois quarts de l'Univers seraient constitués par une force mystérieuse, assimilable à une "antigravitation" que, faute de mieux, les astrophysiciens appellent l'énergie sombre. C'est ce bilan, résumé à l'extrême, qui est aujourd'hui au centre de toutes les discussions.

Lancé en 2001, le télescope spatial WMAP est à l'origine des données les plus précises sur la prime jeunesse de l'Univers. Pendant des années, cet instrument a mesuré patiemment la première lumière du cosmos — ce rayonnement émis voici plus de 13 milliards d'années (environ 300 000 ans après le début de l'expansion de l'Univers), lorsque la densité a suffisamment diminué pour que les photons puissent circuler librement entre les particules de matière et s'échapper. Ce fut le premier matin du monde. De cette aube, les astronomes ne perçoivent aujourd'hui qu'une infime lueur venant de toutes les directions du ciel. Ce rayonnement fossile, ou "fond diffus cosmologique", est en quelque sorte la toile de fond du cosmos, la plus ancienne information que puisse nous apporter la lumière sur l'histoire précoce de l'Univers.

Que révèle WMAP sur cette époque ? Une carte très précise, et pas n'importe laquelle : celle des infimes différences de températures du rayonnement de fond cosmologique sur l'ensemble de la sphère céleste. Or, ces variations sont essentielles pour reconstituer la densité et la distribution de matière initiale. À l'époque de la première lumière, il existait des "grumeaux primordiaux", c'est-à-dire des condensations de matière, issus d'une dilatation antérieure et fulgurante de l'Univers, nommée "inflation" (voir glos-

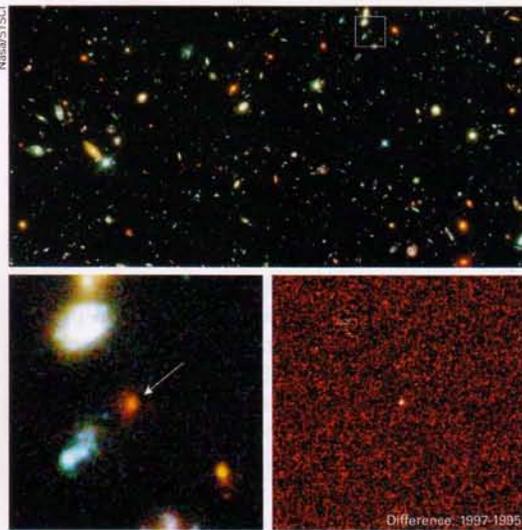


Cette carte, établie par le satellite WMAP, est celle du rayonnement de fond cosmologique. L'amplitude et la taille des petites inhomogénéités qui apparaissent indiquent aux astrophysiciens les proportions des différents types de matière contenus dans l'Univers. Environ 72 % seraient attribués à l'énergie sombre.

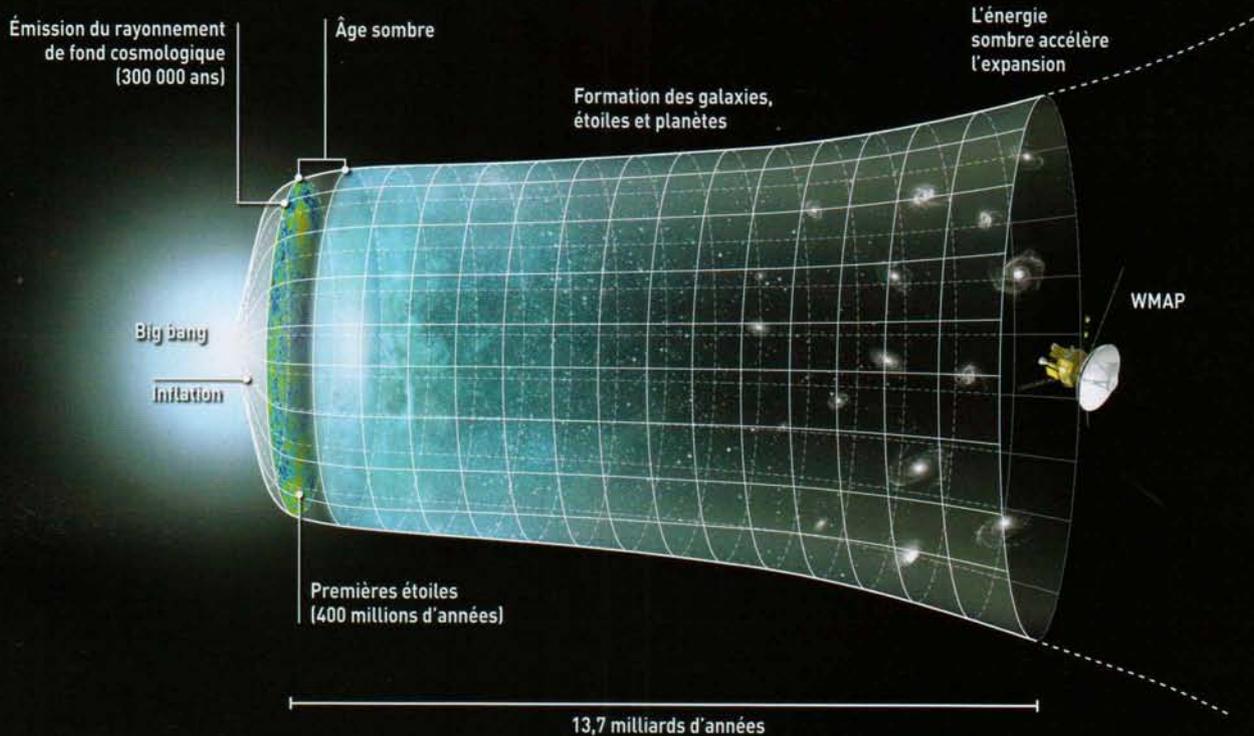
saire p. 49 et schéma p. 54). Plus ces grumeaux sont denses, plus ils sont chauds. WMAP montre qu'ils ont une dimension typique de l'ordre de 0,5 degré carré sur le ciel. C'est de cette mesure que les astrophysiciens ont pu déduire que l'Univers ne contenait que 28 % de matière, 4 % de matière ordinaire et 24 % de matière noire. Sans ce dernier ingrédient amplificateur invisible, la théorie du big bang ne pourrait notamment pas expliquer la formation des galaxies avec la loi de la gravitation classique. Seules des gravitations modifiées comme Mond arrivent à l'éliminer. Et le reste de la densité ? Les données de WMAP ne suffisent plus pour la décrire car son action n'est en effet directement sensible que sur la vitesse de l'expansion de l'Univers. Pour la déterminer, il faut par exemple mesurer l'éclat d'astres

**L'existence d'une énergie sombre a été largement acceptée par les astronomes à partir de 1998, à la suite de l'observation de plusieurs dizaines de supernovae lointaines (comme ci-contre sur un cliché du télescope CFH) indiquant que l'expansion de l'Univers est en train d'accélérer.**

visibles jusqu'à de très grandes distances. Depuis 1998, deux équipes indépendantes ont étudié des supernovae, explosions d'étoiles observées jusqu'à des distances d'environ 8 milliards d'années-lumière. Elles ont découvert un affaiblissement de leur luminosité bien plus important



## ÉNERGIE SOMBRE, INFLATION ET EXPANSION ACCÉLÉRÉE



Ce schéma représente l'expansion de l'Univers. Celle-ci a subi un "coup d'accélérateur" brutal, appelé inflation, lors des premières fractions de seconde après le big bang. Ensuite, elle s'est poursuivie à un rythme à peu

près constant. Aujourd'hui, elle s'accélère à nouveau, mais infiniment moins vite qu'au cours de l'inflation. Pour certains physiciens, ces deux épisodes d'accélération seraient une conséquence de l'énergie sombre.

que ne le laisse supposer une expansion régulière de l'Univers. Une seule explication évidente : l'expansion de l'Univers est beaucoup plus rapide que prévu. Elle s'accélère, et ceci sous l'effet d'une quantité inconnue, une énergie "noire" constamment injectée dans l'Univers. Le reste de la densité de l'Univers est donc constitué de cette énergie. C'est la conclusion actuelle des cosmologistes. "Beaucoup hésitaient à adopter l'idée bizarre d'énergie sombre, constate Charles Bennett, de l'équipe WMAP. Les derniers doutes ont été dissipés quand WMAP a pris l'image la plus détaillée jamais obtenue du fond diffus et démontré sans ambiguïté que l'énergie sombre doit exister."

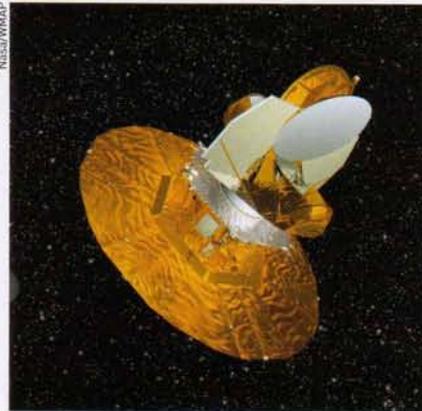
Pourtant, toutes les incertitudes ne sont pas levées. Tout d'abord, trop peu de supernovae ont encore été observées (environ 70) et le doute subsiste quant au fait que, pour servir "d'étalons" et mesurer valablement l'expansion, elles aient toujours le même éclat absolu. En janvier 2006, l'annonce faite par Bradley Schaefer, de l'université de Louisiane, est venue ren-

forcer ces hésitations. En utilisant d'autres types d'explosions encore plus puissantes et visibles jusqu'aux confins de l'Univers, les sursauts gamma, Schaefer est parvenu à reconstituer l'histoire complète de l'expansion. Et surprise, selon lui, l'accélération n'a pas toujours existé. Au contraire, la force invisible semble au départ, dans les premiers milliards d'années, avoir plutôt ralenti l'expansion. Il faut probablement adopter la même prudence avec les sursauts gamma, avant de pouvoir les considérer comme "étalons". Mais dans ce cas, il semble bien que l'énergie noire puisse être variable. Cette confusion rend pour l'instant la réalité de l'énergie sombre toujours incertaine.

Le débat devra être tranché par de futures observations. La Nasa a tout de suite saisi l'enjeu. Elle a constitué une Dark

Energy Task Force, sorte de cellule de crise afin de définir la meilleure stratégie. À la clé, le projet d'un satellite de 600 M€, JDEM (Joint Dark Energy Mission), qui devrait mesurer le plus de supernovae possible pour retracer l'expansion avec le maximum de détails... s'il parvient à décoller (lire article p. 34).

(1) WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) est le successeur de l'observatoire Cobe, dont les responsables J. Mather et G. Smoot viennent de recevoir le prix Nobel.



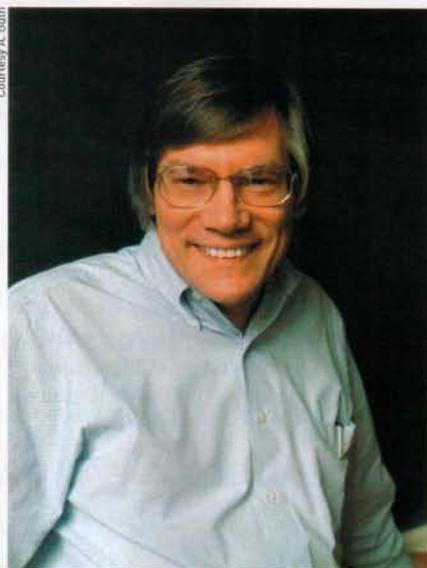
# Les cosmologistes en quête d'alternatives

**L'existence** de l'énergie sombre est soupçonnée depuis 1998. Mais certains astrophysiciens discutent encore de la validité des observations qui l'ont suggérée. Plus que jamais, la voie reste ouverte à des explications alternatives.

**L'**UNIVERS a une face sombre. Comme dans le symbole taoïste du yin et du yang, le noir fait face au blanc, l'ombre à la lumière. Mais dans le cas de l'Univers, l'harmonie n'est pas respectée, le sombre domine largement. Alors que dans l'expansion l'action modératrice de la gravitation va en se diluant graduellement, l'énergie noire resterait au contraire constante et son effet se démultiplierait avec le volume croissant de l'Univers. À l'image d'un ballon qui, au lieu de résister à la dilatation, enflerait de plus en plus vite en se gonflant, elle propulserait l'espace-temps à une vitesse de plus en plus grande. Le problème actuel est qu'aucune théorie physique ne prédit l'existence d'une telle force !

Dans le cadre du big bang, la seule piste que peuvent suivre les astronomes pour l'expliquer, c'est se référer à un épisode

bien plus ancien qui a vu déjà l'Univers gonfler démesurément : l'inflation. C'était juste quelques fractions de seconde après le début de l'expansion. En seulement un éclair, l'Univers a vu sa taille décupler de façon phénoménale. C'est du moins



Courtesy A. Guth

Les grandes structures de l'Univers et les galaxies qu'elles contiennent (ici visibles dans une simulation) n'ont pu se former que grâce à un équilibre délicat entre la matière noire et l'énergie sombre.

ce que les scientifiques supposent pour justifier l'homogénéité presque parfaite du cosmos à ses débuts. L'énergie à la base de cette immense déflagration ? L'énergie quantique du vide, un faux vide peuplé de particules virtuelles. S'agit-il alors de la même explication dans le cas de l'énergie noire ?

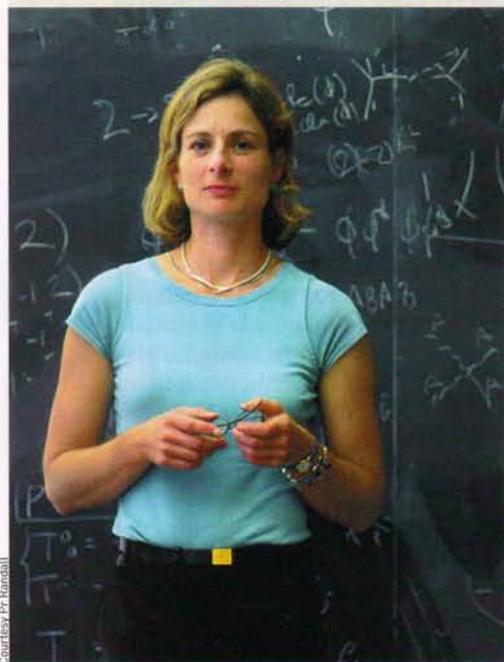
Seul problème : il n'y a aucune commune mesure entre les deux épisodes. L'amplitude de l'inflation était gigantesque. L'accélération actuelle agit, elle, en sourdine, à doses homéopathiques. Elle représente une fraction minuscule de la valeur de l'inflation, au niveau de la 120<sup>e</sup> décimale ! Comment est-on passé de l'une à l'autre ? Expliquer cette coïncidence n'est pas chose facile car, si l'accélération avait été légèrement différente, les galaxies et les étoiles n'auraient pas pu se former et nous ne serions pas là pour les observer. Faut-il en déduire que nous vivons dans un Univers tout juste "calculé" pour permettre notre existence ? Cette conclusion, que l'on nomme parfois "principe anthropique", répugne aux scientifiques qui, plus que de constater passivement une coïncidence, préfèrent trouver la cause. Et les pistes alternatives ne sont pas nombreuses.

Une des plus prisées actuellement est centrée sur la théorie des cordes<sup>(1)</sup>, une recherche en plein chantier destinée à unifier la gravité avec les autres forces. La particularité de cette théorie révolutionnaire est d'offrir une multitude de solutions à ses équations, chacune représentant du même coup un état possible de l'Univers. De cette potentialité surgit une nouvelle cosmologie, où une multitude d'univers différents pourraient tous être réalisés en différents endroits, le nôtre n'en étant qu'une des variantes, justement "réglée" pour permettre notre existence et celle des étoiles. Nous serions environnés d'univers multiples — plutôt que d'univers (unique), on parle alors de *multi-vers*

Alan Guth est l'artisan de l'inflation, nécessaire pour expliquer l'aspect du rayonnement de fond cosmologique. Il fut l'un des premiers, en 1980, à avancer l'idée qu'il devait exister une énergie associée au vide, très similaire à celle désormais qualifiée de sombre.

## Lisa Randall, la nouvelle égérie des cordes

↳ Le physicien théoricien le plus connu actuellement est une femme, Lisa Randall, de l'université de Harvard. Elle vient de décrocher un rare brevet de célébrité : elle est la scientifique la plus citée pour ses travaux au cours des cinq dernières années. Cette jeune chercheuse explore pourtant un des domaines les plus ardues de la physique contemporaine : celui de la théorie des cordes, un concept révolutionnaire où les particules ne sont plus des points mais des "cordes" ou des "membranes" et où l'espace n'a plus trois, mais neuf ou dix dimensions. En 1999, dans un article retentissant, elle explique notamment pourquoi les dimensions supplémentaires de l'espace ne sont pas visibles dans le monde ordinaire. Sa popularité a atteint des sommets en 2005 lorsqu'elle publie un livre grand public, *Passages tortueux : la révélation des dimensions cachées de l'Univers* (non encore traduit en français). "Je voulais montrer pourquoi les physiciens imaginent des choses comme des dimensions supplémentaires, et comment ils peuvent les relier à des phénomènes 'réels' observables", déclare-t-elle alors. Le succès a été immédiat, et Lisa Randall pourrait bien être un jour le "nouvel Einstein" que tout le monde attend.



Lisa Randall, de Harvard, fait partie des astrophysiciens qui cherchent l'origine de l'énergie sombre.



L'Univers visible, constitué de galaxies comme celles du Triplet du Lion, serait-il juxtaposé à d'autres univers ? C'est l'hypothèse envisagée par les nouvelles dimensions de la théorie des cordes.

(multiples). Ces multiréalisations éliminent l'effet de coïncidence. "Bien que, dans certains contextes, le principe anthropique puisse paraître manifestement religieux, l'association de la cosmologie inflationnaire et de la théorie des cordes donne à ce principe un cadre scientifique viable", note ainsi Alan Guth, le premier "inventeur" de l'inflation en 1980.

Mais cette façon élégante de se débarrasser du principe anthropique n'est pas satisfaisante pour tous. Lisa Randall, la référence actuelle en matière de théorie des cordes (voir encadré ci-contre), est beaucoup plus prudente : "Il est très probable que les univers multiples existent et que ce sont des régions de l'espace avec lesquelles nous ne pouvons pas interagir directement. Mais cela ne veut pas dire nécessairement que le principe anthropique est la seule explication de l'énergie sombre. Comme nous ne pouvons pas le savoir, il est important de chercher aussi des solutions alternatives."

Une autre voie est celle proposée par Paul Steinhardt et Neil Turok, de l'université américaine de Princeton. Ils suggèrent d'abandonner l'idée d'une expansion unique et de revenir à un Univers cyclique, succession de big bangs et big crunches sur des centaines de milliards d'années.

L'inflation initiale brutale aurait alors eu le temps au cours des cycles successifs de diminuer peu à peu, pour atteindre le faible souffle observé à présent.

Enfin, d'autres scientifiques, comme Marie-Noëlle Célérier, de l'observatoire de Paris, font remarquer depuis plusieurs années, sans être beaucoup entendus, que l'accélération récente de l'expansion ne pourrait être qu'un effet apparent dû aux inhomogénéités de l'Univers. La plupart des cosmologies considèrent en effet, par simplification, un Univers totalement homogène, identique en ses différents points, mais cette hypothèse n'a pas pu encore être véritablement démontrée.

Paradoxalement, si l'énergie sombre existe, les interrogations des cosmologistes du futur risquent d'être différentes. L'accélération de l'expansion conduit en effet à une situation inédite. Plus l'Univers évolue, moins on peut le connaître car les galaxies vont s'éloigner tellement vite qu'elles vont sortir de notre "horizon". Dans quelques milliards d'années, les habitants de la Voie lactée n'auront plus aucune galaxie dans leur ciel, mis à part peut-être la galaxie d'Andromède. Il est curieux alors d'imaginer quelle image de l'Univers ils construiront.

(1) Voir Ciel & Espace n°432, mai 2006.