

## **Evolution... ou révolution? Les 30 dernières années du big bang**

A. Bouquet

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| Evolution et révolution .....       | 1  |
| Nucléosynthèse.....                 | 2  |
| Galaxies .....                      | 3  |
| Observations nouvelles.....         | 5  |
| Cosmologie des particules.....      | 6  |
| Matière noire.....                  | 8  |
| Où en sommes-nous aujourd'hui?..... | 11 |

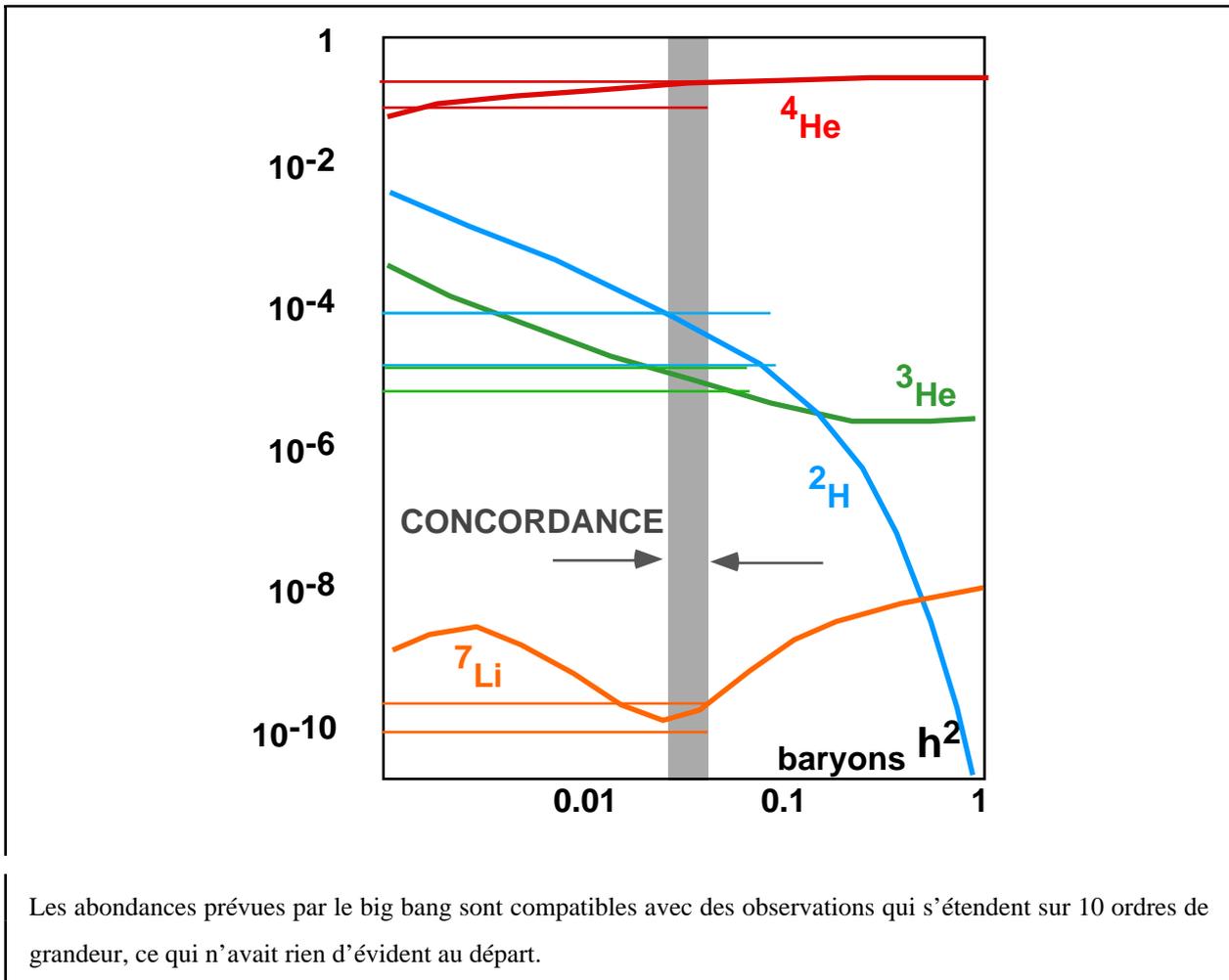
*Après son triomphe sur les théories rivales, les trente dernières années ont vu le big bang voler de succès en succès: on lui demandait des prédictions toujours plus détaillées, il les fournissait, et elles s'accordaient aux nouvelles observations nées des progrès technologiques (caméras électroniques, satellites). Plus récemment, les observations ont commencer à moins bien s'accorder aux prévisions, et certains aspects secondaires du big bang sont remis en cause. Une nouvelle époque s'ouvre.*

### **Evolution et révolution**

La découverte par Penzias et Wilson du rayonnement cosmologique de fond, le “3 K”, marqua la fin d’une époque et le début d’une nouvelle, la fin de la cosmologie de l’univers homogène et le début de la cosmologie de l’univers hétérogène. Jusque là, il était surtout question de savoir si le big bang avait eu lieu ou non et les controverses opposaient tenants du big bang et défenseurs de l’état stationnaire. Bien sûr, la réévaluation progressive de la constante de Hubble, tout comme la découverte par Ryle et ses collaborateurs que les radiosources étaient plus nombreuses dans le passé, laissaient bien présager une victoire du big bang, mais la découverte du “3 K” clôt le débat, en tout cas aux yeux de la plupart des participants. La question principale devint alors: de quelle *façon* s’est exactement déroulé le big bang? Il faut bien dire que, jusque là, on se contentait de la version des événements la plus simple, simpliste même diraient certains. Le big bang classique, celui de Friedman, de Lemaître, de Gamow, supposait en première approximation l’univers rempli d’un fluide parfait, homogène et isotrope. Oubliés les objets en tout genre qui le remplissent, des atomes aux galaxies! Non sans raison: cette réduction drastique se révèle à l’usage une étonnamment bonne approximation de l’univers réel, si on est assez myope pour ne distinguer aucun détail plus petit que quelques dizaines de millions d’années-lumière. Une broutille comparée aux quelques dizaines de *milliards* d’années-lumière de l’univers observable.

## Nucléosynthèse

Mais une fois le big bang remis en selle, les astrophysiciens cosmologistes se préoccupèrent d'aller plus loin que cette première approximation. Ils disposaient d'outils qui faisaient défaut à leurs prédécesseurs: une bien meilleure connaissance de la physique atomique et nucléaire, de la physique des gaz et des ondes de choc (autant de sous-produits des recherches militaires sur les bombes nucléaires), de même que les premiers ordinateurs qui permettaient de simuler des univers en laboratoire et de faire enfin de l'astrophysique une science expérimentale. Si nous comparons l'univers à une grande ville, le big bang classique prévoyait correctement (jusqu'à preuve du contraire) le plan de la ville à grande échelle, mais il ne nous apprenait rien sur le type de bâtiments dont elle est formée (les galaxies) et assez peu sur les matériaux dont ceux-ci sont construits (les différents éléments chimiques). Les premiers travaux qui suivirent la découverte de Penzias et Wilson s'intéressèrent précisément à la formation de ces éléments chimiques dans les premières secondes du big bang. P. James Peebles, un jeune physicien qui venait juste de rater la découverte du "3K", estima ainsi rapidement qu'un big bang chaud avait dû transformer en hélium environ le quart de la quantité initiale d'hydrogène, et que les trois quarts devaient subsister quasiment intacts. Il apprit que c'était effectivement l'ordre de grandeur observé autour de nous, il en fut très heureux, puis il se désintéressa de la question: il avait mieux à faire, et nous le retrouverons plus loin. Mais plusieurs groupes se penchèrent ensuite sur les équations, et ils constatèrent qu'elles nous en disaient bien plus: elles prévoyaient l'abondance relative de tous les éléments légers, hydrogène, deutérium, hélium 3 et 4, lithium 6 et 7. Certains de ces éléments n'étaient présents qu'à l'état de traces, des milliards de fois moins abondants que l'hydrogène, mais le nombre exact de ces milliards était prévu! Et les données les confirmèrent peu à peu, apportant un nouveau triomphe à la théorie du big bang. Il y eut bien sûr des hauts et des bas dans cette aventure, car la mesure de traces est extrêmement délicate et les causes de contamination multiples. Les observations se contredisaient parfois, et d'autre part il est souvent délicat de remonter des abondances actuelles aux abondances primordiales. D'où les discussions et les débats animés entre experts qui se poursuivent encore aujourd'hui.

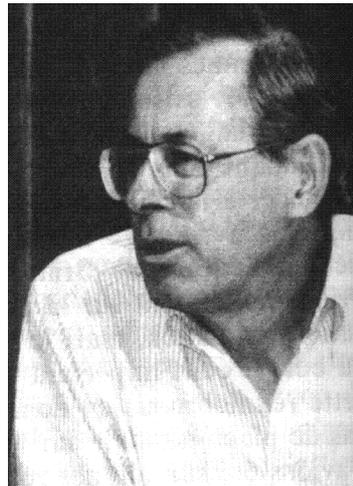


[LIEN À FAIRE AVEC L'ARTICLE "NUCLÉOSYNTHÈSE"?](#)

## Galaxies

Parallèlement, les cosmologistes devinrent de plus en plus intéressés par les *structures* que présente aujourd'hui l'univers réel: des étoiles aux galaxies et aux amas de galaxies, ils ne voulaient plus seulement savoir comment cela marchait, mais aussi comment elles s'étaient formées. Deux étoiles se levèrent à l'horizon de la cosmologie: Peebles, que nous avons déjà rencontré, et Yakov Borisovitch Zeldovitch. On n'aurait pu imaginer personnalités plus dissemblables: face au longiligne et flegmatique Peebles, qui essaima élèves et disciples dans le monde entier, le petit et bouillant Zeldovitch, maître d'œuvre de la bombe H soviétique, avait rassemblé sous sa poigne de fer la plus formidable équipe d'astrophysiciens que le monde ait connu. Tout naturellement, pourrait-on dire, ils défendirent des conceptions opposées quant à la formation des galaxies. Peebles soutint l'idée que les galaxies se forment du bas vers le haut, c'est à dire que dans une protogalaxie, les zones les plus denses se condensent les premières, puis fusionnent successivement

pour former des agglomérats de plus en plus gros, jusqu'à atteindre la taille d'une galaxie, puis les galaxies se rassemblent à leur tour en amas de plus en plus vastes, qui eux-mêmes forment ensuite des super-amas. Zeldovitch plaïda, avec des arguments tout aussi solides, que c'était l'inverse qui avait eu lieu, et que les galaxies se formaient du haut vers le bas: d'immenses nuages de gaz instables se contractaient en formant des sortes de gigantesques crêpes (blinis serait plus juste), qui se fragmentaient pour donner les amas de galaxies, qui se fragmentaient à leur tour en galaxies, et ainsi de suite en cascade.



Portraits de Peebles et de Zel'dovich

Comment départager ces deux conceptions opposées? La formation d'une galaxie est un phénomène extrêmement complexe car un nuage de gaz qui s'effondre n'est pas seulement soumis à sa propre gravité, mais il est aussi le siège de phénomènes physiques très variés, thermiques (le gaz se refroidit en émettant du rayonnement), magnétiques (le gaz ionisé est soumis au champ magnétique de la protogalaxie) ou cinétiques (il est traversé par des ondes de choc dues à sa contraction, ou à l'explosion de supernovae). Il est infiniment plus simple d'étudier la formation d'un amas de galaxies, car à cette échelle la gravité est largement dominante et on peut négliger toutes les complications magnétohydrodynamiques. Infiniment plus simple ne signifie pas facile pour autant, et il fallut une ingéniosité considérable aux théoriciens pour modéliser l'effondrement d'une masse de gaz sous son propre poids, avec hélas des approximations inévitables. Les premiers ordinateurs apportèrent une aide appréciable, mais aussi leur lot d'erreurs.

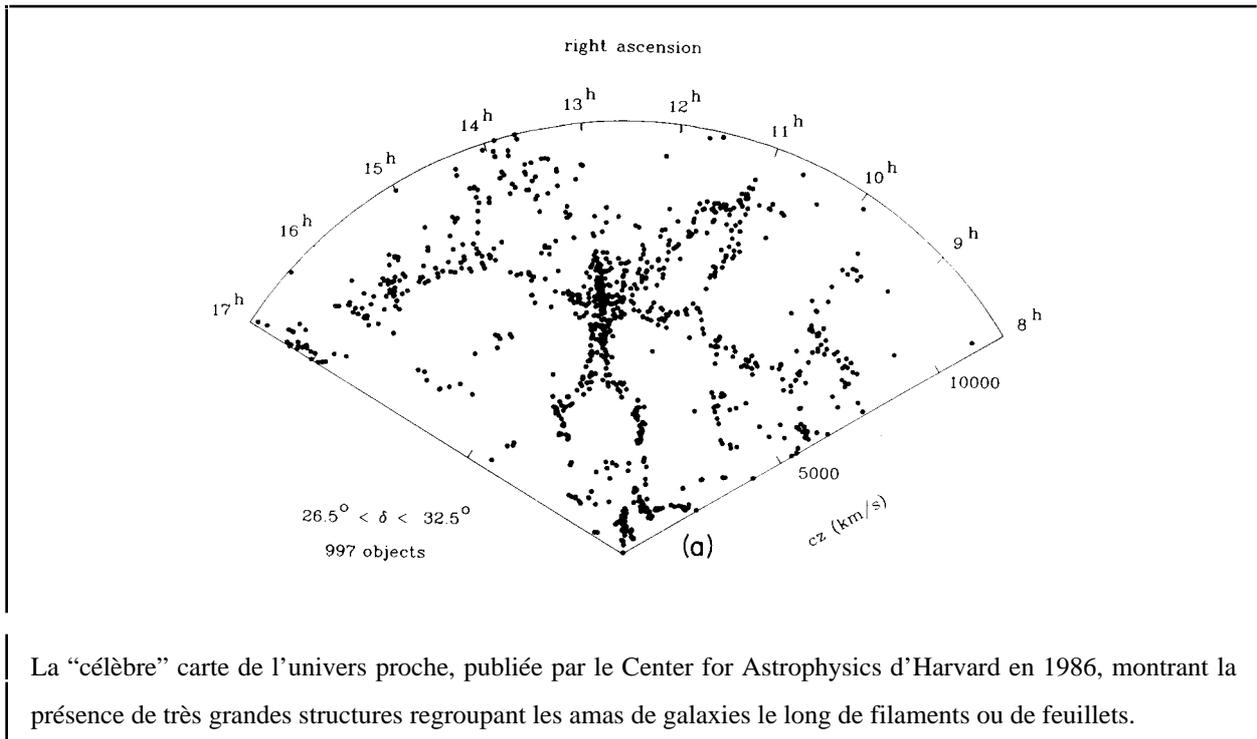
Mais avant tout, était-on sûr que les amas de galaxies existent bien? Certes, des catalogues d'amas avaient été établis dans les années 50, grâce aux images du ciel fournies par le grand télescope du Mont Palomar. Fritz Zwicky, l'enfant terrible de l'astrophysique, s'y était employé,

Gérard de Vaucouleurs affirmait que toutes les galaxies de notre voisinage se rassemblaient en une immense crêpe (cela vous rappelle-t-il quelque chose?) qu'il appelait le Superamas Local. Mais pouvait-on généraliser, était-on sûr de ne pas être victime d'une illusion d'optique: l'œil, et surtout le cerveau humain, sont remarquablement doués pour détecter des régularités, des structures, même si elles n'existent pas: par exemple les constellations dans le ciel! A la fin des années 60, Peebles importa en astronomie un outil courant des statisticiens, la fonction de corrélation, et il montra que les galaxies étaient *réellement* regroupées en amas: une galaxie a une probabilité significativement plus grande d'être proche d'une autre que loin d'elle. Cela ne résolvait pas tout, car si l'on était maintenant sûr qu'il existait des amas, la fonction de corrélation ne disait pas comment ceux-ci étaient construits ni comment ils étaient répartis. L'étude des amas en ne connaissant que les positions sur le fond du ciel (en deux dimensions) est une discipline frustrante et dangereuse, frustrante car on ne dispose que de peu d'informations et dangereuse car des galaxies qui n'appartiennent pas à l'amas étudié peuvent se superposer sur l'image et fausser complètement les résultats.

[LIEN À FAIRE AVEC LES ARTICLES "GALAXIES"?](#)

## Observations nouvelles

Pour progresser, il fallait donc absolument connaître la position des galaxies en trois dimensions, c'est à dire connaître aussi leur distance. La loi de Hubble, reliant la distance des galaxies à la valeur de leur décalage spectral vers le rouge, apportait cette information (et aussi de nouvelles sources d'erreurs), mais la mesure d'un décalage spectral nécessite évidemment que l'on prenne le spectre de la galaxie concerné, et cette opération était encore très longue et très délicate à la fin des années 60. Quelques centaines de décalages spectraux seulement avaient été établis, et d'une façon très peu systématique. La situation allait changer dans les années 70, avec la mise en service de nouveaux télescopes mais surtout avec la généralisation de détecteurs électroniques beaucoup plus sensibles que les traditionnelles plaques photographiques. Quelques francs-tireurs se lancèrent alors dans la mesure de milliers de décalages spectraux. En 1976, Marc Davis conçut à Harvard la z-machine (les décalages spectraux sont traditionnellement appelés z) et établit ainsi avec ses collaborateurs une première carte en trois dimensions de l'univers proche, dans un rayon de 100 millions d'années-lumière environ. Après le départ de Davis pour Berkeley, l'équipe de Harvard améliora la taille et la précision de cette carte, dont la publication en 1986 fut ressentie comme un coup de tonnerre: elle décrivait un univers très peu homogène dans lequel galaxies et amas se rassemblaient le long d'immenses structures, des murs, des filaments, séparés par des vides de taille colossale.



Pourquoi un tel choc, accompagné d’une certaine incrédulité? N’était-ce pas ce qu’avait toujours affirmé Zeldovitch? Oui et non. Les structures annoncées par l’équipe de Harvard, et par plusieurs autres groupes concurrents, étaient *beaucoup* plus vastes que ce qu’imaginait Zeldovitch. Et puis entre-temps les physiciens des particules étaient entrés dans le bal de la cosmologie, et à cette époque ils semblaient plutôt confirmer le point de vue de Peebles que celui de Zeldovitch, après avoir d’ailleurs fait le contraire quelques années plus tôt. En effet, si les années 70 et 80 furent le temps où l’univers inhomogène passa au centre des préoccupations des cosmologistes, ce furent également les années où l’ambition des théoriciens s’aiguïsa, et où ils prétendirent décrire par le menu les aventures de l’univers au cours du premier million d’années, puis au cours de la première année, de la première seconde, du premier millionième de seconde et finalement des premiers  $10^{-43}$  seconde. Nous n’évoquerons pas ici le serpent de mer de la gravité quantique (l’unification de la relativité générale avec la mécanique quantique) que poursuit Stephen Hawking comme de nombreux autres physiciens, et nous nous limiterons à la période suivant ces premiers  $10^{-43}$  seconde.

## Cosmologie des particules

La physique des particules fit d’immenses progrès au cours des années 70, les blocages des décennies précédentes sautant d’un seul coup. En calquant les recettes qui avaient fait le succès de l’électrodynamique quantique (la théorie quantique relativiste de l’interaction électromagnétique

entre particules), les physiciens étaient parvenus à décrire de façon mathématiquement cohérente les interactions nucléaires faibles et forte. La similarité de la structure mathématique de ces théories les conduisit à postuler une similarité de nature, et de fait l'interaction électromagnétique et l'interaction nucléaire faible furent unifiées avec un succès retentissant en une même interaction dite électrofaible. Il était naturel de continuer dans une voie aussi fructueuse, et les théories dites de grande unification apparurent, réunissant interaction nucléaire forte et interaction électrofaible. Seul léger problème, cette grande unification ne se manifesterait expérimentalement qu'à des énergies des milliards de fois supérieures à celles des plus gros accélérateurs envisageables, techniquement et financièrement.

Les physiciens des particules se tournèrent alors vers le big bang comme laboratoire ultime où tester ces nouvelles théories: seuls les premiers instants du big bang présentaient la densité d'énergie requise pour en étudier expérimentalement (si l'on peut dire) les conséquences. L'une d'entre elles avait d'ailleurs un intérêt cosmologique direct: l'origine de l'asymétrie observée dans l'univers entre matière et antimatière. Il semble bien que l'univers visible soit presque uniquement formé de matière alors que les théories de physique des particules prévoyaient, avant la grande unification, une parfaite symétrie entre matière et antimatière. Dès 1967, Andrei Sakharov avait établi les conditions dans lesquelles une théorie future pourrait rendre compte de l'asymétrie observée, conditions réalisées une dizaine d'années plus tard par les premières théories de grande unification. Il semble aujourd'hui que l'asymétrie entre matière et antimatière soit en fait plutôt due à l'interaction électrofaible, mais ceci est une autre histoire.

Une seconde conséquence des théories de grande unification va sceller l'union des cosmologistes et des physiciens des particules: l'inflation. En 1979, Alan Guth découvrit que certaines de ces théories conduisaient à une phase d'expansion ultra-rapide de l'univers, juste après le big bang, et que cette expansion inflationniste résolvait plusieurs paradoxes du big bang standard. On réalisa peu après que cette inflation engendre aussi des inhomogénéités dans l'univers, et que ces inhomogénéités ont exactement la distribution qui conduit à une répartition des galaxies et des amas de galaxies semblable à celle que l'on observe. Une activité fébrile de construction de galaxies en laboratoire s'ensuivit, et se poursuit encore. Entre temps, l'inflation avait coupé ses liens historiques avec la grande unification, les théoriciens des particules rivalisant d'imagination pour bâtir les modèles d'inflation les plus variés. Du point de vue cosmologique, tous ces modèles font à peu près les mêmes prédictions à quelques variantes près, les différences se trouvant dans leur plus ou moins grande élégance du point de vue de la physique des particules, ou leur caractère plus ou moins ad hoc.

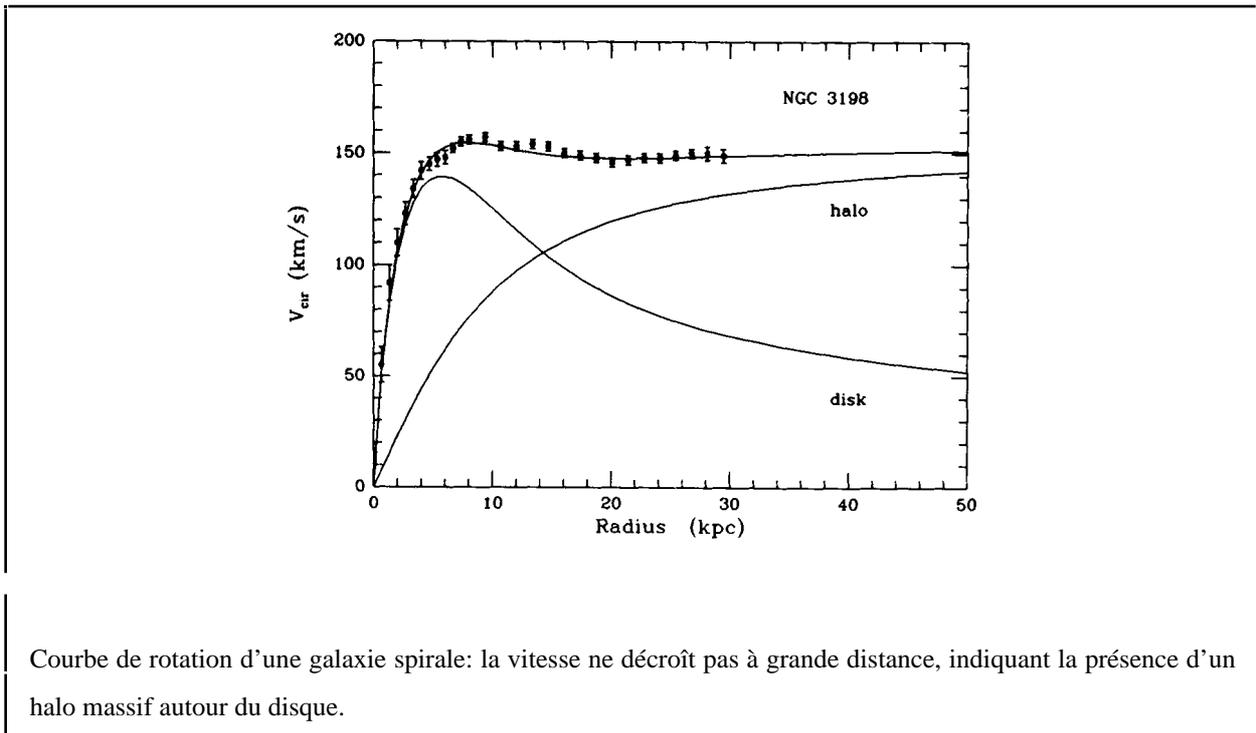
La conséquence observationnelle la plus spectaculaire de l'inflation, en dehors de prévoir la distribution correcte des inhomogénéités dans l'univers, est d'aboutir à un univers spatialement

plat, c'est à dire que la géométrie de l'espace est euclidienne (modulo l'expansion de l'univers). Cette géométrie plate impose une relation entre la vitesse d'expansion de l'univers (la constante de Hubble), sa densité de masse et la valeur d'une éventuelle constante cosmologique. En l'absence de cette dernière, absence tenue pour acquise jusque très récemment, la valeur de la constante de Hubble conduit à une densité moyenne de l'univers de 100 fois supérieure à la densité observée sous forme d'étoiles. Cela signifie-t-il que 99% de la masse de l'univers n'est pas lumineuse et que l'univers est surtout formé d'une matière noire inconnue, qu'il existe une constante cosmologique non négligeable, ou que l'inflation n'a jamais eu lieu? Chacune de ces conséquences est d'un immense intérêt (pour les astronomes, en tout cas).

## Matière noire

La question de la matière noire se posait en fait depuis très longtemps, depuis les années 30 en fait. A cette époque Zwicky, effectuant la première analyse de la dynamique des galaxies de l'amas de Coma, assurait que la vitesse excessivement élevée de ces galaxies ne pouvait s'expliquer que par une quantité totale de matière dans cette amas 400 fois supérieure à la masse totale des amas. Zwicky étant connu pour ses idées tantôt géniales tantôt farfelues, personne ne le prit vraiment au sérieux. La question revint au centre des préoccupations dans les années 70 quand Peebles (encore) et d'autres théoriciens assurèrent que les disques minces des galaxies spirales se désagrégeraient rapidement s'ils n'étaient pas enfouis dans un halo de matière (noire puisqu'invisible) qui les stabiliserait. Mais c'étaient des théoriciens aux conclusions desquels les vrais astronomes n'attachent qu'une confiance limitée. Mais à cette même époque Vera Rubin et Kent Ford utilisaient les premiers détecteurs électroniques pour mesurer la rotation des galaxies spirales au delà de la partie la plus lumineuse du disque, qui était seule accessible jusque là. Ils montrèrent que les étoiles à la périphérie de ces disques tournaient vite, trop vite. Cette vitesse excessive trahissait la présence d'une importante quantité de matière non lumineuse dans la galaxie, un halo sombre.

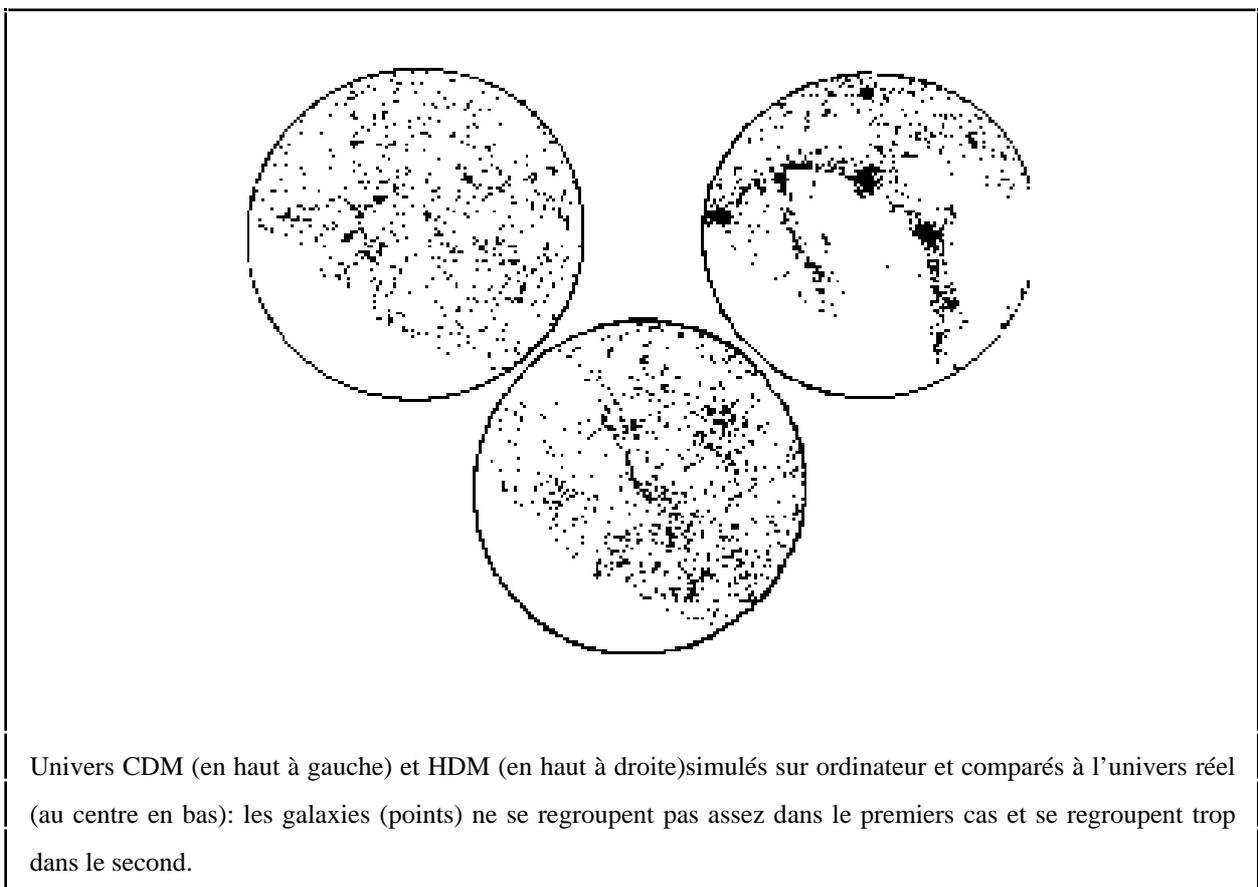
Les choses se précipitèrent ensuite. On découvrit de la matière noire partout. On en découvrit très loin du centre des galaxies grâce à des observations radioastronomiques. On en découvrit dans les amas de galaxies, d'abord par la technique de Zwicky rénovée, mais aussi en utilisant l'émission en rayons X du gaz chaud diffus qui remplit l'espace entre les galaxies, et également grâce aux distorsions gravitationnelles imposées à la lumière venant d'astres lointains (galaxies ou quasars) par la matière des amas située le long de la ligne de visée: ces arcs lumineux spectaculaires permettent de reconstituer la distribution de masse responsable et confirment la présence d'une importante quantité de matière noire dans les amas de galaxies.



Aucune de ces observations ne conduit toutefois à des quantités de matière noire aussi élevées que le prévoit l'inflation, et d'autres explications des observations restent possibles sans faire appel à la matière noire (bien qu'elles deviennent de plus en plus intenable au fil des observations). Mais c'est là que nous revenons à la controverse entre Peebles et Zeldovitch. Il ne suffit pas d'avoir des germes de galaxies, tels qu'en fabrique l'inflation par exemple, il faut encore que ces germes croissent, et croissent suffisamment vite pour que les galaxies soient formées à l'époque où nous observons les plus anciennes (les plus lointaines). Très vite il s'avéra qu'un univers dense était beaucoup plus favorable à la croissance de ces germes, et que si l'essentiel de la matière était sous forme "exotique", des neutrinos par exemple ou des particules nouvelles plutôt que des particules banales comme les électrons ou les protons, la croissance commencerait beaucoup plus tôt et pourrait donc durer plus de temps. Or les observations de plus en plus précises du fond de rayonnement cosmologique au cours des années 70 et 80 ne montraient aucune empreinte de ces germes. Il fallait donc que ces germes soient très petits, nécessitant alors une longue période de croissance. La matière noire exotique devenait un ingrédient indispensable aux scénarios de formation des galaxies.

Zeldovitch s'intéressait depuis longtemps aux conséquences cosmologiques des neutrinos, et il avait montré qu'ils pourraient conduire à la formation de ces immenses blinis, dont la fragmentation ultérieure formerait des amas de galaxies. Quand on annonça en 1980 qu'une expérience avait mesuré la masse des neutrinos, et qu'elle était précisément ce qu'il fallait pour rendre compte de la matière noire, la question sembla réglée: la masse du neutrino jointe aux

modèles d'inflation conduisait aux structures immenses observées dans le ciel, et Zeldovitch triomphait. Mais la très délicate expérience de mesure de la masse des neutrinos était fautive, et les mesures ultérieures placèrent une limite sensiblement plus basse sur une masse possible du neutrino. Par ailleurs, ce modèle dit HDM (hot dark matter, matière noire chaude car les neutrinos sont très rapides, donc "chauds", au moment où se forment les galaxies) se heurta rapidement à un autre écueil: il prévoyait un univers trop structuré en fait, avec des galaxies trop regroupées en amas trop denses. Pour corriger ce défaut, il fallait des particules beaucoup plus lentes, "froides", et les fabricants d'univers commencèrent à explorer des modèles de matière noire froide (cold dark matter, CDM) qui régnèrent en maître au cours des années 80.



Mais les modèles CDM conduisaient à un univers trop peu structuré, à des galaxies regroupées de manière trop lâche. Les critiques commencèrent à s'élever, et de correction en addition le modèle perdit sa belle simplicité. Les mesures tant attendues des fluctuations du fond de rayonnement cosmologique, publiées en 1992 par les responsables du satellite COBE, ne clarifièrent pas le débat. Le meilleur accord entre théorie et observation ne s'obtenait que pour des modèles hybrides où, par exemple, une pincée de neutrinos corrigeaient les défauts du modèle CDM sans lui ôter ses qualités.

[RENOI À L'ARTICLE CORRESPONDANT?](#)

## **Où en sommes-nous aujourd'hui?**

Cela est raconté dans les pages suivantes.

[COMPLÉTER AU VU DES PAGES EN QUESTION.](#)

Attention à une confusion trop fréquente: la théorie actuelle du big bang inclut en fait des hypothèses ou des éléments qui complètent en fait la théorie du big bang proprement dite, mais n'en dépendent pas logiquement. Par exemple, les modèles de formation des galaxies ajoutent au big bang (au sens de description d'un univers en expansion qui se refroidit) des hypothèses sur les inhomogénéités qui seraient germes de galaxies et des hypothèses sur le rôle essentiel que la gravitation y jouerait de bout en bout. Un échec de ces modèles ne remettrait nullement en cause la théorie centrale du big bang. Par contre, une démonstration que le décalage vers le rouge n'est pas cosmologique, que le rayonnement à 3K n'est pas cosmologique, que les abondances des éléments légers sont différentes de celles que prévoit la théorie, ou que l'univers est beaucoup plus âgé que le prétend le big bang remettrait ce dernier en cause.