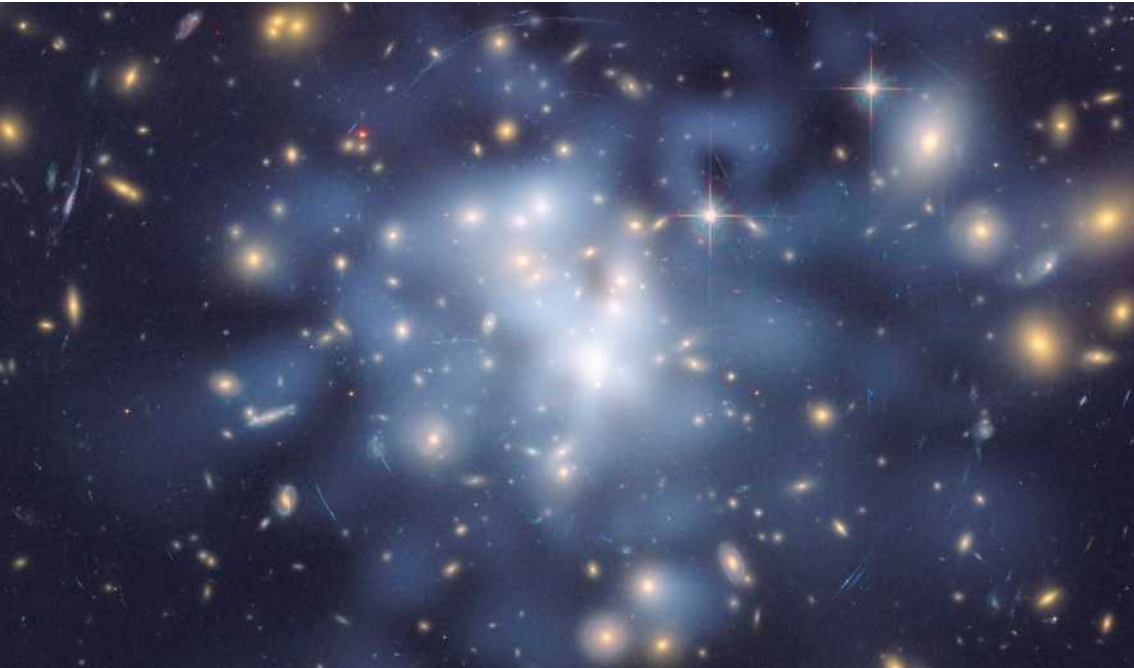


Françoise Combes

# La matière noire

## Clé de l'Univers ?



Vuibert



# Table des matières

---

<b>Introduction</b> .....	VII
---------------------------	-----

## Chapitre 1

<b>Historique de la découverte</b> .....	1
Première évidence d'une masse manquante .....	1
L'existence de matière noire fait son chemin .....	3
La matière noire se réduit comme peau de chagrin .....	9
L'existence de matière noire est vraiment établie .....	11
La matière noire devient exotique.....	14

## Chapitre 2

<b>Les observations</b> .....	21
Les courbes de rotation des spirales .....	21
La dynamique des galaxies elliptiques .....	28
Les amas de galaxies .....	34

## Chapitre 3

<b>La matière noire : clé de la formation des galaxies</b> .....	41
Les grandes structures .....	42
Principe de formation des structures .....	44
Inflation et spectre de puissance des fluctuations.....	50
Modification du spectre des fluctuations. Comparaison avec les observations .....	53

## Chapitre 4

<b>Recensement des baryons</b> .....	61
Le milieu intergalactique .....	62
La recherche des MACHOS .....	63
Le gaz froid moléculaire .....	66
Les relations d'échelle.....	70
Les baryons sont éjectés des galaxies.....	74

## Chapitre 5

<b>Candidats pour la matière noire</b> .....	79
La nature de la matière noire.....	79
Le nombre de particules par unité de volume peut-il crever le plafond ?.....	83
Les mauviettes (WIMP = <i>Weakly Interacting Massive Particle</i> ) .....	85
Autres candidats, nouvelle physique ?.....	88
Recherches directes : traquer la matière noire.....	91
Recherche indirecte : quand la matière noire s'annihile .....	94
Le LHC à la rencontre de SUSY .....	100
Conclusion .....	102

## Chapitre 6

<b>Problèmes à l'échelle des galaxies : les simulations numériques</b> .....	103
Les simulations de matière noire.....	103
La difficulté d'introduire le gaz.....	108
Approche semi-analytique .....	113
Profils de matière noire : cœur ou cuspide ?.....	116
Matière noire et galaxies : quelles structures ?.....	118
La prise en compte des processus baryoniques.....	120
Les problèmes qui restent .....	122

## Chapitre 7

### Scénarios possibles et solutions

<b>à l'échelle des galaxies</b> .....	123
Les profils de densité.....	124
SIDM ( <i>Self-Interacting Dark Matter</i> ).....	126
Autre solution : la matière noire tiède ?.....	128
Le problème du moment angulaire.....	131
Fréquence des galaxies sans bulbe.....	134
Problème des satellites manquants.....	135
Alternatives au modèle CDM.....	138

## Chapitre 8

### Physique des galaxies en gravité modifiée.....

De nombreuses théories.....	142
Accord (et désaccord) avec les observations.....	147
MOND et la dynamique des galaxies.....	151
Interactions et fusions de galaxies.....	155
Simulations cosmologiques avec MOND.....	159

## Chapitre 9

### Perspectives, futurs instruments.....

De grands observatoires.....	164
Lentilles pour distinguer matière froide ou tiède.....	171
Collisions d'amas, type « Boulet ».....	174
Nouvelle génération de flot de données.....	175
Conclusion et perspectives.....	177

### Références bibliographiques.....

179

Retrouvez sur le site [www.vuibert.fr](http://www.vuibert.fr), à la page du livre,  
l'ensemble des illustrations en couleurs



# Introduction

---

La matière noire constitue plus de 80 % de celle présente dans l'Univers. Sa nature constitue un des plus grands mystères qui hantent les astronomes depuis des dizaines d'années. D'énormes progrès ont été accomplis à la fin du xx<sup>e</sup> et au début du xxi<sup>e</sup> siècle, mais le mystère s'est encore épaissi avec la découverte de l'énergie noire, laquelle correspond à 70 % du contenu de l'Univers. Bien que celle-ci soit établie maintenant à quelques pour-cent près, les astrophysiciens ne connaissent que très peu de chose de ce secteur noir, à savoir la matière noire et l'énergie noire réunies, qui représente pourtant 95 % du contenu de l'Univers ! Comment en est-on arrivé là ?

La notion de matière noire, détectée indirectement par son action gravitationnelle, mais qui ne rayonne pas, remonte à l'astronome suisse Fritz Zwicky, qui observait des amas de galaxies aux monts Wilson et Palomar en Californie dans les années 1930. Pour évaluer la masse totale d'un amas de galaxies comme celui de Coma, il jugea que les amas étaient assez denses et concentrés pour présenter un équilibre entre mouvements désordonnés (énergie cinétique) et forces gravitationnelles (énergie potentielle), et donna une estimation de la masse totale à partir des vitesses Doppler mesurées. Il trouva une masse plus de cent fois supérieure à la masse visible des galaxies.

Zwicky avait avancé plusieurs hypothèses pour expliquer la masse manquante dans Coma : celle-ci était soit dans les galaxies soit dans l'espace intergalactique, ou alors la masse visible était obscurcie par de la poussière intergalactique, ou bien encore la loi de Newton de la gravitation devait être modifiée à grande échelle. Parmi les candidats à la masse manquante, il pouvait s'agir d'objets compacts – comme des astres morts – ou bien de poussière ou de gaz. L'astronome hollandais Jan Oort, dans les années 1930, avait aussi pensé à ce type de matière

manquante pour expliquer l'équilibre vertical du plan de notre galaxie, au voisinage du Soleil.

Ce n'était pas la première fois qu'une modification de la loi de la gravitation était avancée pour résoudre un problème de masse manquante. Au siècle précédent, l'astronome français Urbain Le Verrier découvrit Neptune, grâce aux perturbations causées par sa gravité sur les orbites des autres planètes. En revanche, la précession du périhélie de Mercure n'est pas due à de la matière supplémentaire. Einstein a résolu le problème avec une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale.

L'évidence d'une masse manquante apparaît aussi autour des galaxies spirales, qui sont des disques d'étoiles et de gaz en rotation. La vitesse de rotation des étoiles ne décroît pas avec la distance au centre, comme attendu lorsqu'il n'y a presque plus de masse visible. Encore incertain avec les mesures optiques, le problème s'est précisé après la découverte en ondes radio de disques étendus d'hydrogène atomique grâce à sa raie à 21 cm de longueur d'onde. Il a alors été établi solidement que la vitesse de rotation ne diminuait pas et que les galaxies baignaient toutes dans leur halo de matière noire.

Vers la fin des années 1980, le phénomène de lentilles gravitationnelles, prédit par la relativité générale depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, a été découvert dans les amas de galaxies. Leurs observations ont permis de tracer la matière noire dans les amas, comme le prévoyait Zwicky. Aujourd'hui, il est ainsi possible de cartographier la matière noire sur la ligne de visée en observant de façon statistique les déformations faibles de milliers de galaxies de fond, qui s'alignent comme de la limaille de fer pour donner une image globale du potentiel gravitationnel.

En 1980, plus de quarante ans après les premières découvertes de Zwicky, l'existence de la matière noire a fait consensus. Mais on ne parlait encore que de matière ordinaire, faite de baryons (neutrons, protons). Dans la décennie suivante émergea l'idée d'une matière noire exotique, non baryonique. Le changement de paradigme en 1984 est issu de plusieurs avancées en cosmologie survenues dans les années précédentes. Tout d'abord, la découverte du fond cosmologique micro-onde par Penzias et Wilson en 1965 a confirmé la théorie du Big Bang pour les premières phases de l'Univers. La nucléosynthèse d'éléments comme l'hélium et le deutérium dans les premières minutes de l'Univers donne alors des contraintes sur la densité de protons et de neutrons présents.



En 1975, la mesure précise des abondances de ces éléments établit alors que la matière ordinaire ne peut pas dépasser 5 % du contenu total de l'Univers.

Au début de l'Univers, la température dépassait les dix mille degrés et les protons sont restés piégés avec les photons du fond cosmologique jusqu'à leur recombinaison en atomes d'hydrogène, qui est survenue environ 400 000 ans après le Big Bang. Dans le fond micro-onde, qui est un vestige de cette époque, on devrait voir les fluctuations de densité qui ont donné lieu ensuite aux grandes structures et aux galaxies. Pourtant ces fluctuations sont extrêmement faibles, et dans les années 1980 on se rend compte que s'il faut attendre la recombinaison des atomes d'hydrogène, alors les galaxies n'ont pas le temps de se former. Il est donc nécessaire de faire appel à une matière noire qui n'interagit pas avec les photons et peut s'effondrer sous sa propre gravitation avant la recombinaison. L'existence d'une matière noire exotique, faite de particules encore inconnues, s'impose alors.

Les premiers candidats, entre autres, pour ces particules ont été les neutrinos, dont on venait d'apprendre qu'ils possédaient une masse. Mais ils furent très vite éliminés par les simulations cosmologiques, car les neutrinos sont une matière noire chaude, c'est-à-dire qu'ils possèdent une vitesse relativiste au départ. Ces particules rapides créent une pression qui empêche la matière de s'effondrer. N'auraient pu se former que de très grandes structures, qui ensuite se seraient fragmentées. Ce scénario n'est pas compatible avec les observations. La matière noire froide (CDM pour *Cold Dark Matter*) est alors devenue le modèle privilégié, le modèle standard. Les particules de matière noire candidates y sont supposées n'interagir entre elles que par l'interaction faible, et ont été nommées les WIMPs (pour *Weakly Interactive Massive Particles*).

Dès 1985, les physiciens et les astronomes ont entrepris la détection directe de ces particules WIMPs, qui peuvent traverser la Terre, mais parfois être diffusées par un noyau. Des détecteurs ont été construits dans des tunnels (Modane, Grand Sasso, Mont Blanc, etc.) afin de filtrer les signaux des rayons cosmiques. Toutefois, rien n'a été détecté depuis trente ans, que ce soit de façon directe ou même indirecte par les rayons gamma provenant de l'annihilation de ces particules. De son côté, l'accélérateur LHC du CERN n'a pas encore mis en évidence les particules exotiques recherchées.

Par conséquent, le problème reste aujourd'hui très ouvert, et il est possible que sa solution soit découverte en empruntant des pistes originales, très éloignées du « modèle standard ». Ainsi, en 2010, l'astrophysicien Avi Loeb a décrit les investissements possibles pour les jeunes chercheurs comme un portefeuille d'actions en bourse. Alors qu'un bon père de famille choisit un placement sûr de 80 % en obligations, de 15 % d'actions et de 5 % de capital-risque, les jeunes devraient quitter les sentiers battus et toujours consacrer une fraction plus importante (20 % ?) de leur portefeuille universitaire au capital-risque, c'est-à-dire à des projets innovants et risqués mais potentiellement très rentables. Le modèle standard CDM et ses raffinements dans la formation des étoiles et des trous noirs, pouvant influencer sur la formation des galaxies par leurs rétroactions, sont des obligations sûres. Des voies de recherche dans la quintessence, l'équation d'état de l'énergie noire, l'annihilation des particules exotiques, l'inflation correspondraient à des actions plus risquées. Au-delà, le capital-risque serait de s'engager sur les voies de la gravité modifiée, de modèles d'Univers cyclique, ou de la variation des constantes fondamentales de l'Univers.

Dans ce livre, je décris quelques-unes des pistes explorées par les astrophysiciens non conventionnels qui aiment s'aventurer hors des sentiers battus, au risque de voir leur capital terminer en « *junk bonds* » (obligations pourries). Par exemple, à l'échelle des galaxies, la gravité modifiée (MOND) proposée par Moti Milgrom en 1983 s'est révélée reproduire remarquablement toutes les courbes de rotation. Elle modifie la loi de Newton uniquement en champ faible, là où nos mesures ne sont que de nature astrophysique et où le choix entre matière manquante et gravité modifiée est encore une gageure. Dans les années qui viennent, il est probable que de nouvelles observations, dans le ciel et dans les accélérateurs de particules, permettront de distinguer les pistes gagnantes parmi toutes les solutions avancées. Il sera toujours temps pour les perdants de réinvestir plus judicieusement !

---

# 1 Historique de la découverte

---

## Première évidence d'une masse manquante

---

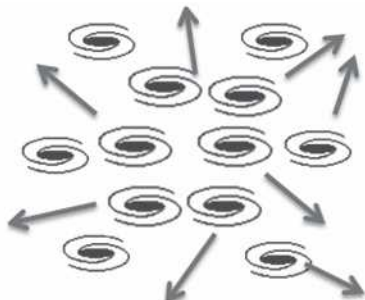
### L'astronome suisse Fritz Zwicky et les amas de galaxies

Qui, le premier, a eu l'idée de l'existence d'une matière noire ? Il n'est pas facile de le dire, car ce que l'on entendait par matière noire au début du  $xx^e$  siècle était assez différent de ce que l'on conçoit aujourd'hui sous ce nom. On s'accorde largement à dire que l'idée en remonte aux années 1930.

Fritz Zwicky, un astronome d'origine suisse qui a fait toute sa carrière d'astronome aux États-Unis, remarque en effet, dans une publication datant de 1937, qu'il manque beaucoup de matière dans les amas de galaxies, et notamment dans l'amas de Coma. Son travail visait à estimer la masse d'un amas de galaxies en mesurant les vitesses relatives des galaxies qui le composaient (*cf.* Figure 1.1). À l'époque, certains astronomes mesuraient la rotation des nébuleuses (on dirait aujourd'hui « galaxies ») et en déduisaient une masse. Mais Zwicky montre que cela ne suffit pas : la plupart des amas de galaxies ne tournent pas, il faut donc prendre en compte la dispersion des vitesses, et utiliser le théorème du viriel<sup>1</sup>, qui relie l'énergie cinétique (donc l'amplitude des

---

1. Le théorème du viriel pour un système en équilibre dynamique, relie l'énergie cinétique  $T$  et l'énergie potentielle  $V$ , par la relation :  $2T + V = 0$



**Figure 1.1.** Fritz Zwicky calcule la masse des amas de galaxies en utilisant leurs vitesses relatives, ou dispersion de vitesses. Pour un amas à l'équilibre, comme celui de Coma, l'énergie potentielle de gravitation (fonction de la masse et de la taille) devrait être égale à deux fois l'énergie cinétique. Il trouve des vitesses de l'ordre de 1 000 km/s, des masses de  $5 \cdot 10^{14} M_{\odot}$ , soit cent fois supérieures à la masse visible des galaxies.

vitesses relatives) à l'énergie potentielle totale (donc la masse de l'objet). À sa grande surprise, le calcul indique une masse cent fois supérieure à la masse visible. Impressionné par ce résultat, il propose plusieurs méthodes pour déterminer la masse, dont les lentilles gravitationnelles, méthode qui ne sera possible que des dizaines d'années plus tard !

Pour Zwicky, les « nébuleuses » étaient constituées de matière lumineuse et de matière noire, laquelle comprenait les étoiles froides, les objets solides, à la fois microscopiques (grains de poussière) ou macroscopiques (résidus d'étoiles en fin de vie), et du gaz. De plus, la matière noire pouvait absorber et éteindre une grande partie de la lumière de la masse visible. Et c'est donc dans ces deux directions qu'il a cherché à résoudre le problème. Il a également avancé d'autres hypothèses : la masse manquante se situait soit dans les galaxies soit dans l'espace intergalactique, ou bien alors cette masse manquante n'existait pas, et c'était la loi de la gravitation de Newton à grande échelle qu'il fallait modifier.

## Masse noire ou bien nécessité de réviser la loi de la gravitation ?

Ce n'était pas la première fois que se posait la question de savoir s'il existait vraiment de la matière encore invisible ou s'il fallait changer la

loi de la gravitation. Au XIX<sup>e</sup> siècle, on s'était aperçu que la planète Uranus, découverte en 1781, présentait des anomalies dans son mouvement qui ne pouvaient s'expliquer avec la gravitation de Newton, sauf en supposant une masse supplémentaire, non encore observée. Vers 1844, Urbain Le Verrier, à l'instigation de François Arago, alors directeur de l'Observatoire de Paris, explore la piste de la planète encore inconnue, et calcule sa masse, son orbite et sa position supposée d'après les connaissances de l'époque. Le jour même où il reçoit par courrier les prédictions de Le Verrier, l'astronome Johann Galle à Berlin découvre la planète qui sera appelée Neptune.

Mis en confiance par cette réussite, Le Verrier tente de reproduire cette brillante découverte quelques années plus tard, pour expliquer l'avance anormale du périhélie de Mercure de 43" par siècle, restée inexpliquée. Cela pouvait très bien s'expliquer par l'action gravitationnelle d'une masse invisible, à l'intérieur de l'orbite de Mercure, qu'il propose d'appeler Vulcain. Mais lors de l'éclipse de soleil de 1860, bien que tous les télescopes soient braqués sur sa position supposée, Vulcain n'est pas au rendez-vous. Le Verrier propose alors l'existence d'une ceinture de petits corps : les Vulcanoïdes.

Le problème fut résolu, comme on le sait, en 1916 par Albert Einstein, dont la relativité générale explique exactement l'avance de 43" par siècle du périhélie de Mercure. Cet exemple historique montre comment un problème de masse manquante peut être résolu soit par la découverte de matière supplémentaire, soit par un changement de la loi de gravitation.

## L'existence de matière noire fait son chemin

---

Il faudra attendre environ quarante ans pour que l'idée de matière noire fasse son chemin, et soit vraiment adoptée par les astronomes. Entre-temps, plusieurs astronomes ont avancé l'existence d'une masse manquante. Jan Oort, dans les années 1930, a parlé de matière noire au voisinage du Soleil dans la Voie lactée. Il a examiné les vitesses des étoiles perpendiculaires au plan, et si le plan était en équilibre, ces vitesses devaient nous donner une estimation de la masse contenue dans le plan. Il a trouvé une masse bien supérieure à celle des étoiles visibles. Mais il pensait à l'époque que le gaz du milieu interstellaire, la poussière

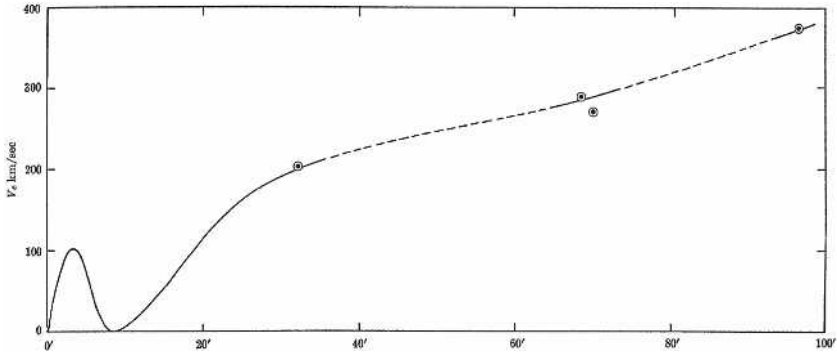
qui l'accompagnait, en association avec les astres morts qui ne rayonnaient plus, pouvaient expliquer le problème. Aujourd'hui, on sait, en effet, que la densité du gaz est supérieure à celle des étoiles dans le voisinage du Soleil.

Alors que Zwicky ne s'intéressait pas à l'amas de la Vierge, pensant qu'il n'était pas assez « relaxé », qu'il n'avait pas atteint l'équilibre, Sinclair Smith en 1936 applique la même méthode du viriel et s'aperçoit également que, dans cet amas, il manque beaucoup de masse par rapport à la masse visible des galaxies. Il justifie son résultat en montrant, grâce aux distributions de vitesse, que l'amas est en équilibre dynamique. Le rapport entre masse dynamique et luminosité est à cette époque de l'ordre de 500 en unités solaires. Or le rapport masse/luminosité ( $M/L$ ) pour une population stellaire standard est de l'ordre de 3 à 6 pour les luminosités optiques. La masse dynamique excède bien d'un facteur 100 la masse visible !

## La rotation des galaxies révèle aussi de la matière manquante

Curieusement, Zwicky ne pensait pas que la méthode du viriel pût s'appliquer aux galaxies, car il croyait à tort que les étoiles étaient soumises à une viscosité et que leurs mouvements de rotation autour du centre des galaxies n'étaient pas le seul reflet de la masse. Pourtant, l'on sait aujourd'hui que les étoiles peuvent être considérées comme formant un milieu sans collisions.

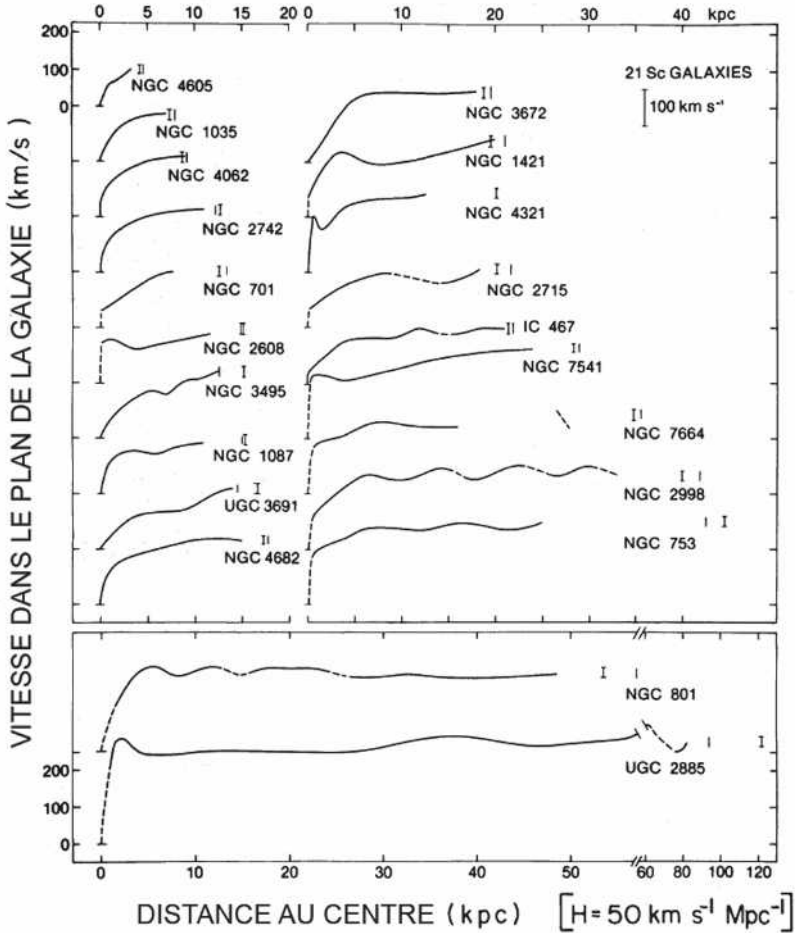
Horace Babcock, en 1939, mesure la courbe de rotation de la galaxie d'Andromède et en déduit une masse bien supérieure à la masse visible (cf. Figure 1.2). Pour cela, il a pris des spectres selon le grand axe de la galaxie, et mesuré les raies en absorption H et K, dues aux étoiles, mais aussi des raies en émission dues aux nébuleuses de gaz ionisé interstellaires (raies de [OII], [OIII]). Le décalage Doppler de ces raies permet de déduire la vitesse des étoiles et du gaz par rapport à nous. Il faut ensuite prendre en compte l'inclinaison du plan de la galaxie sur le ciel, et déprojeter pour connaître la vitesse de rotation dans le plan de la galaxie. Le centre d'Andromède possède très peu de gaz, et les étoiles sont surtout dans un bulbe massif, maintenu plus par la dispersion de vitesses



**Figure 1.2.** Horace Babcock, en 1939, fut le premier à publier une courbe de rotation étendue de notre voisine la galaxie d'Andromède. Il remarqua notamment que la vitesse de rotation augmentant avec le rayon jusqu'à la limite de la galaxie optique, le rapport masse/luminosité ( $M/L$ ) devenait irréaliste pour une population stellaire aux bords. Son rapport  $M/L$  au centre était très faible de façon erronée.

que par la rotation. C'est pourquoi la vitesse semble anormalement faible au centre dans la figure 1.2.

Au cours des décennies suivantes, l'obtention de courbes de rotation pour les galaxies spirales proches s'est de plus en plus étendue. Dans le Groupe local et au-delà, les courbes de rotation étaient mesurées par des spectres de raies de gaz ionisé ( $H\alpha$  et  $[NII]$ , notamment) dans les longueurs d'onde optiques (0,35-0,75 microns), et dans les années 1960-1970, un catalogue de courbes pour des galaxies spirales de plusieurs types morphologiques a été constitué, notamment par l'équipe de l'astronome américaine Vera Rubin (cf. Figure 1.3). Ces courbes de rotation servaient à mesurer la masse dynamique des galaxies. De plus en plus, il apparaissait que beaucoup de masse devait encore se trouver au-delà des derniers points de mesure, surtout pour les galaxies sans bulbe, peu massives. Pour les galaxies massives, avec sphéroïde développé, les courbes de rotation étaient plates, ou même tombaient aux bords, et l'évidence d'une masse non lumineuse n'était pas aussi forte. Le rapport masse sur luminosité ( $M/L$ ) variait de 2 à 10 selon le type des galaxies, la distance au centre, etc. Le fait que la plupart des courbes de rotation soient assez plates vers le bord pouvait être expliqué par la distribution des étoiles en fonction de la distance au centre. La masse croissait linéairement avec le



**Figure 1.3.** Courbes de rotation pour vingt et une galaxies de type morphologique Sc, disposées selon un rayon croissant. Les deux côtés de la galaxie, s'éloignant et s'approchant, ont été moyennés pour obtenir la courbe finale. La barre verticale au bord de chaque galaxie indique le rayon  $R_{25}$  de l'isophote correspondant à 25 magnitudes par seconde carrée. Les pointillés au centre sont une extrapolation, par manque de mesures. Les pointillés aux bords indiquent une courbe qui descend plus vite que de façon képlérienne (d'après Rubin *et al.*, 1980).



rayon, mais cela ne paraissait pas complètement irréaliste pour un disque d'étoiles. Les incertitudes étaient grandes (existence de vitesses non circulaires dues soit à une barre, soit à des distorsions du plan ou gauchissement variable). C'est pour cela que l'idée de matière noire a mis du temps à s'installer. Par exemple, les distances des galaxies étaient très mal connues. La constante de Hubble variait entre 50 et 100 km/s selon les auteurs. Et pour les galaxies proches, dont la vitesse se distinguait du flot de Hubble en raison de vitesses particulières supérieures, l'incertitude sur la distance était d'un facteur supérieur à 2. Or l'estimation de la masse est proportionnelle au carré de la vitesse (qui, elle, est indépendante de la distance) et au rayon, qui en dépend linéairement. La luminosité croît comme le carré de la distance. Le rapport M/L varie donc comme l'inverse de la distance. À l'époque de Babcock, la distance de la galaxie d'Andromède était estimée à 200 kpc, au lieu des 750 kpc aujourd'hui. Le rapport M/L était alors surestimé d'un facteur 3,75.

### **L'existence de matière noire est contestée : trop d'incertitudes ?**

Pourquoi Zwicky, ce génie visionnaire, n'a-t-il pas été suivi, ni même cru, pendant près de quarante ans ? D'abord, l'astronome était un personnage non conventionnel, avec des idées très particulières parfois, ne croyant pas à l'expansion de l'Univers, qui pourtant avait été établie. C'était aussi quelqu'un d'irascible, de méprisant pour ses collègues et étudiants. Il s'est attaqué à de nombreux problèmes dans divers domaines et a laissé des travaux importants sur les novae, avec la découverte des supernovae, et un catalogue très utile de galaxies et d'amas de galaxies, dont les noms sont encore utilisés de nos jours.

D'autre part, le domaine souffrait de trop d'incertitudes. Ne serait-ce que sur les distances des galaxies, qui ont été modifiées après lui d'un facteur 10. L'équilibre dynamique des amas de galaxies n'était pas fermement établi, et certains pouvaient ne pas être liés gravitationnellement. Le rapport masse/luminosité des populations stellaires était encore assez mal connu ; il y avait des problèmes d'extinction par la poussière. Les galaxies n'étaient pas connues dans toutes les longueurs d'onde, et comme il a été prouvé ensuite, il pouvait exister de grandes masses de gaz visibles en dehors du domaine optique. Aujourd'hui,

lorsque nous projetons nos connaissances sur les astronomes de l'époque, on ne comprend pas pourquoi les idées de Zwicky ont mis tant de temps à faire leur chemin. Pourtant, des astrophysiciens très connus, comme Martin Schwarzschild dans les années 1950 ou Jim Peebles dans les années 1970, pensaient qu'il était possible d'expliquer les observations sans matière supplémentaire. M. Schwarzschild a publié, en 1954, des modèles dynamiques de galaxies et d'amas où la luminosité et la masse dynamique avaient un rapport constant : l'un traçait l'autre, et si certains rapports  $M/L$  étaient très grands, c'était peut-être parce que toute la lumière des objets n'avait pas encore été détectée. J. Peebles effectue, en 1970, des simulations  $N$ -corps de la formation de l'amas de Coma, avec des conditions initiales cosmologiques et un seul type de particules, représentant les galaxies. Le modèle représente bien les observations de l'amas actuel, qui paraît donc bien gravitationnellement lié et à l'équilibre. Il n'est pas nécessaire d'ajouter de la masse en dehors des galaxies dont le rapport  $M/L$  est déjà de  $\sim 100$ .

### Arrigo Finzi rejette toutes les objections

Il n'y avait toujours pas consensus parmi les astrophysiciens dans les années 1950-1970. Certains étaient pourtant très en avance sur leur temps, comme Arrigo Finzi, astrophysicien à Rome. En 1963, celui-ci publie un article qui fait le point sur tous les problèmes de masse manquante, dans les galaxies ou les amas de galaxies. Il mesure la masse de la Voie lactée grâce aux mouvements des amas globulaires, et la trouve trois fois trop grande. Il est convaincu que la platitude des courbes de rotation déjà mesurées à cette époque constitue un vrai problème, qui ne peut être résolu par un rapport  $M/L$  constant, contrairement à l'affirmation de M. Schwarzschild. L'hypothèse selon laquelle cette masse manquante est constituée par des étoiles mortes ne tient pas, car les étoiles avant de mourir auraient rejeté les éléments lourds synthétisés en leur centre, alors que l'abondance observée de ces éléments décroît avec le rayon. Pour les amas de galaxies, Finzi examine l'hypothèse selon laquelle la masse manquante se trouve sous forme de gaz très chaud, mais la rejette, car le temps de refroidissement d'un gaz si dense serait très court, et celui-ci ne serait donc plus invisible. Prenant en compte plusieurs contraintes astrophysiques, il avance comme seule solution possible l'inexistence d'une matière noire et que la loi de la gravitation décroît moins vite que le carré

de la distance, à l'échelle d'une galaxie. Cette hypothèse est purement empirique, et ne correspond pas à une théorie.

## La matière noire se réduit comme peau de chagrin

---

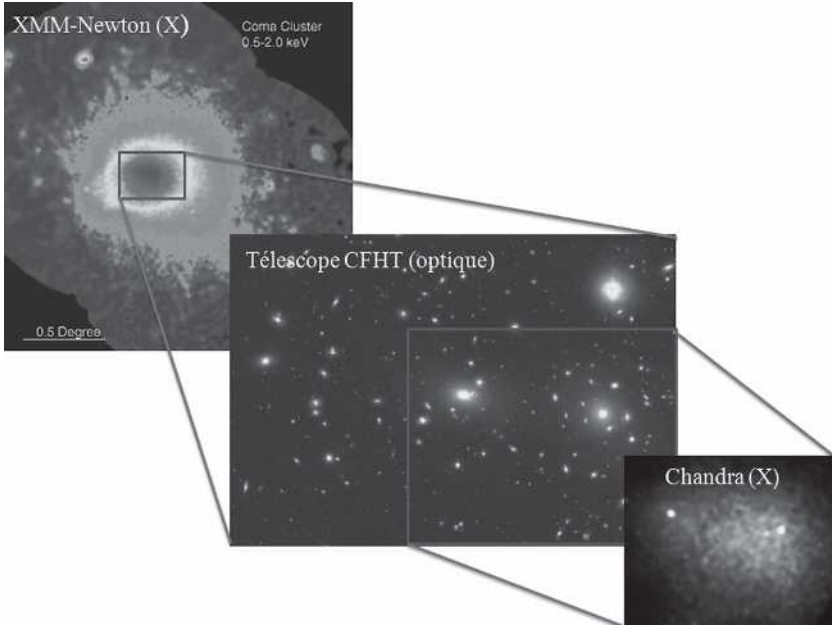
Peu à peu, l'astrophysique s'ouvre à tous les domaines du spectre électromagnétique : du plus énergétique (rayons X et gamma) jusqu'au plus faible (le domaine radio). À très haute énergie, le rayonnement est arrêté par l'atmosphère, et le lancement de satellites est nécessaire.

### Découverte de gaz très chaud dans les amas de galaxies...

Les premiers satellites en rayons X découvrent de façon fortuite, en 1966 (Boldt *et al.*), une très forte émission diffuse dans l'amas de Coma (*cf.* Figure 1.4). Felten *et al.* (1966) interprètent cette émission comme étant du gaz très chaud, ou gaz coronal, car ressemblant au gaz ionisé dans la couronne du Soleil. L'émission ne peut pas venir des galaxies elles-mêmes, car il faudrait qu'elles rayonnent chacune 10 000 fois plus que la Voie lactée. Bien sûr, il existe une contribution de certaines des galaxies elliptiques les plus massives, comme le montre la figure 1.4, mais elle est relativement négligeable dans l'ensemble de l'émission diffuse. Le premier examen du ciel complet en rayons X par le satellite Uhuru, en 1971, confirma que les amas de galaxies étaient de puissants émetteurs X, et que la matière visible y était dominée par le gaz chaud. La température du gaz intergalactique serait de  $T \sim 10^8$  K, soit cent millions de degrés ! Et sa masse n'était pas déterminée de façon précise à l'époque, mais pouvait être comparable à la matière manquante.

### ... est-ce la matière manquante ?

Après de nombreuses observations plus précises et plus sensibles, on sait aujourd'hui que la masse de gaz chaud dans les amas riches est de l'ordre d'environ dix fois la masse des galaxies. Il reste encore de la matière noire, au niveau d'environ six fois la masse visible. Par rapport à la découverte de Zwicky, la quantité de matière noire s'est considérablement réduite. Et l'observation en rayons X porte un nouveau coup à



**Figure 1.4.** L'amas de Coma, qui a permis à Zwicky de découvrir la matière noire, a été un des premiers à être observé en rayons X. L'image du haut, obtenue avec le satellite XMM-Newton, montre que l'émission X du gaz très chaud (température de quelques dizaines de millions de degrés) est très étendue. L'image centrale, obtenue avec le télescope CFH (Canada-France-Hawaii) en optique, détaille le centre de l'amas, où se trouvent les deux galaxies les plus massives, qui proviennent sans doute d'une fusion de deux sous-amas. Enfin, l'image du bas du satellite Chandra est un zoom de l'émission X qui montre deux pics correspondant aux deux galaxies massives, plus de l'émission étendue du gaz intergalactique.

notre anthropomorphisme : la plupart de la matière ne rayonne pas dans les longueurs d'onde optiques que l'œil perçoit ! Nos yeux sont conçus pour percevoir les longueurs d'onde de l'arc-en-ciel, du violet au rouge, mais l'essentiel ne rayonne pas dans ce domaine, ce qui peut conduire à une vision erronée de l'Univers. Au fil des années, la matière noire mentionnée par Zwicky s'est réduite comme peau de chagrin, et dans les années 1970 l'espoir était de découvrir, à d'autres longueurs d'onde ou par d'autres moyens, la fameuse matière noire dont personne ne pensait qu'elle pût être autre chose que de la matière ordinaire.

## L'existence de matière noire est vraiment établie

---

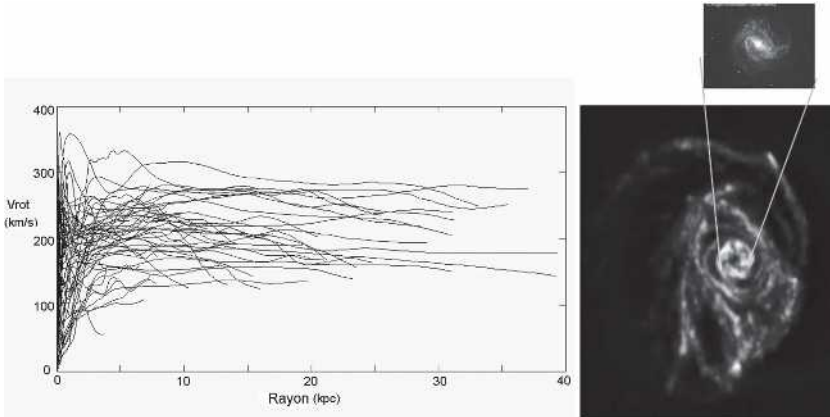
### L'hydrogène atomique et ses courbes de rotation étendues

Le spectre électromagnétique s'est élargi à un autre domaine, cette fois celui des basses longueurs d'onde, en radioastronomie. L'élan a profité des nombreuses antennes radar qui avaient été installées et utilisées abondamment pendant la Seconde Guerre mondiale. Jan Oort et son étudiant Henk Van de Hulst cherchèrent une raie spectrale qui pourrait tracer le gaz interstellaire dans les ondes radio. Ils découvrirent la raie fondamentale de l'atome d'hydrogène, que l'on nomme HI, à 21 cm de longueur d'onde. C'est une raie quasiment « interdite » en laboratoire, car sa probabilité d'émission spontanée est de une en dix millions d'années, et le choc avec les parois ou les collisions avec d'autres atomes surviendront avant pour désexciter l'atome. Par contre, dans le vide de l'espace, la raie peut s'observer, surtout si les densités de colonne sont grandes (avec  $10^{21}$  atomes par  $\text{cm}^2$ ), s'étalant sur des années-lumière. La raie fut détectée pour la première fois en provenance du milieu interstellaire par Ewen & Purcell en 1951. La première courbe de rotation obtenue avec le gaz atomique HI fut publiée par Van de Hulst *et al.* en 1957. Elle s'étendait bien au-delà du rayon optique, et permettait ainsi de connaître la distribution de matière réellement invisible !

Les résultats des cartographies avec la raie de HI à 21 cm se sont ensuite multipliés. Comme le montre la figure 1.5, les courbes de rotation restent plates, bien au-delà de la fin du disque d'étoiles, qui contient l'essentiel de la masse. Le gaz ne représente, dans les galaxies spirales comme la Voie lactée, que de 5 à 10 % de la matière visible totale. Le fait que la vitesse ne descende pas avec le rayon  $r$  en  $r^{-1/2}$  comme attendu si la masse se restreint à la masse visible, démontre l'existence de matière noire, indépendamment du rapport masse/luminosité des étoiles. Enfin, dans les années 1970-1980, un consensus s'est établi au sein de la communauté quant à l'existence de matière noire.

### La stabilité des galaxies requerrait-elle des halos de matière noire ?

Pour confirmer cette nécessité d'une matière noire, des arguments plus théoriques concernant la stabilité des galaxies ont aussi été avancés



**Figure 1.5.** L'observation en radioastronomie de la raie à 21 cm de l'atome d'hydrogène (HI) a permis d'étendre les courbes de rotation bien au-delà du rayon optique des galaxies. L'image de gauche montre une compilation de telles courbes de rotation, qui se révèlent plates à grande distance (Sofue & Rubin, 2001). L'image de droite montre la carte HI de Messier 83, dont le rayon est quatre fois le rayon optique. Le zoom en encart est l'image optique de la galaxie, qui est tout incluse dans la déplétion centrale de gaz de Messier 83.

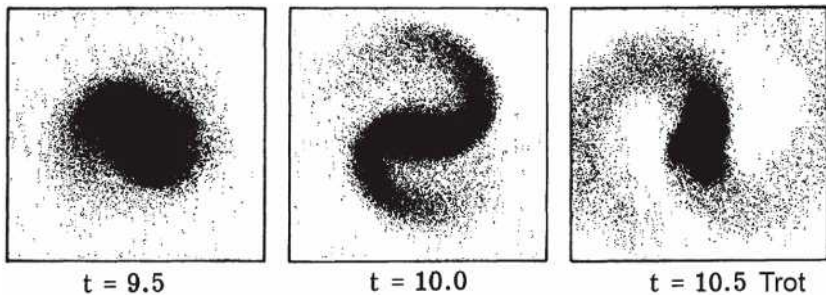
à la même époque. Au début des années 1970, les simulations sur ordinateur de la dynamique des galaxies, sous l'influence de leur propre autogravité, ont pris un grand essor grâce aux progrès techniques impliquant une plus grande puissance de calcul. Dans la décennie précédente, la stabilité des galaxies avait été étudiée de façon analytique par des approximations. Lin & Shu avaient développé en 1964 la théorie des ondes de densité pour expliquer la structure spirale, mais celle-ci devait être très enroulée. Dès que les calculs ont été possibles, plusieurs équipes ont commencé à calculer le développement de ces ondes spirales, en prenant en compte uniquement les forces de gravité entre étoiles et en partant d'un disque d'étoiles à l'équilibre.

Les conditions initiales de ces simulations étaient un disque en rotation, avec une dispersion de vitesses faible, correspondant à ce qui est observé dans la Voie lactée. Les résultats furent très surprenants. Au lieu de développer des bras spiraux enroulés, comme c'était prédit par la théorie analytique des ondes de densité, les disques de galaxies étaient tous violemment instables et formaient des barres (Hohl, 1971). L'arrivée

des barres pouvait toutefois être une bonne surprise, puisque les deux tiers des galaxies sont barrées. Pourtant, l'instabilité était si violente que les barres étaient même à la fin détruites, à cause d'une trop grande dispersion de vitesses des étoiles (*cf.* Figure 1.6). L'instabilité modifie considérablement les orbites des étoiles, qui deviennent allongées et non plus quasi circulaires comme au départ. Le disque est chauffé, et le support contre la gravité et l'effondrement n'est plus tant la rotation que les mouvements désordonnés et la dispersion de vitesses. Après avoir été chauffés, les disques d'étoiles ne forment plus de spirales, ni de barres.

Quelques solutions ont été proposées, et notamment pour prendre en compte le gaz interstellaire qui, lui, est dissipatif : les nuages de gaz entrent en collision et, dans les chocs, le gaz chauffé rayonne son énergie ; il peut se refroidir, contrairement aux étoiles. Son caractère froid s'étend également aux étoiles qui se reforment à partir de ce gaz. C'est, en effet, une solution qui est prise en compte par les simulations dynamiques aujourd'hui, qui considèrent tous les processus de formation d'étoiles ou de leur perte de masse. Le gaz est même parfois trop froid et forme trop d'étoiles, et il faut prendre en compte le chauffage dû à la rétroaction des étoiles : vent stellaire, supernovae.

Mais revenons aux années 1970. Pour résoudre le problème des instabilités trop violentes des disques d'étoiles, qui conduisent à des galaxies à trop forte dispersion de vitesses, deux théoriciens américains,



**Figure 1.6.** Simulation numérique du problème à N-corps, représentant un disque d'étoiles sans collisions. Initialement, le disque est en rotation, en équilibre avec une dispersion de vitesses correspondant à ce qui est observé dans la Voie lactée. Une violente instabilité en forme de barres semble inévitable, et chauffe considérablement le disque (d'après Hohl, 1971).

Ostriker & Peebles, en 1973, émettent l'idée que les galaxies baignent dans un halo de matière invisible quasi sphérique, stabilisé par sa dispersion de vitesse, et ne participant pas aux instabilités. Ce halo stabilise le disque, qui devient moins autogravitant. Les simulations numériques d'un disque évoluant à l'abri gravitationnel d'un halo sphérique bien plus massif donnaient alors des galaxies plus stables. Ne s'arrêtant pas là, Ostriker & Peebles extrapolent l'existence du halo noir à des échelles plus grandes, et font le rapprochement avec la masse manquante des amas de galaxies. Cette hypothèse constituait un saut hasardeux, car à cette époque, la nature de la matière noire était encore baryonique, faite de corps compacts ou de gaz. Comment des objets si différents que les amas de galaxies ou les superamas pourraient-ils contenir des quantités significatives de cette matière ?

Bien que, plus tard, des simulations plus réalistes de disques galactiques aient montré que leur stabilité envers les barres ne nécessitait pas forcément de halo noir, l'idée de matière noire devenait plus solide, et surtout était confirmée par un grand nombre de courbes de rotation, observées en radio avec l'hydrogène atomique, avec une extension radiale de deux à quatre fois supérieure aux précédentes, donc sans ambiguïté.

C'est donc quarante ans après les premières découvertes d'Oort et de Zwicky que l'idée de matière noire dominant les galaxies et amas de galaxies s'est installée. Il a fallu pour cela une conjonction entre progrès des observations dans tout le spectre électromagnétique (radioastronomie, rayons X) et aussi idées et concepts théoriques, aidés par le progrès des simulations numériques.

Mais on n'en était encore que dans les débuts ! Dans les années 1970, on ne parlait encore que de matière ordinaire ; dans la décade suivante va émerger l'idée d'une matière exotique, non baryonique.

## La matière noire devient exotique

---

### Big-Bang et synthèse de l'hélium et du deutérium

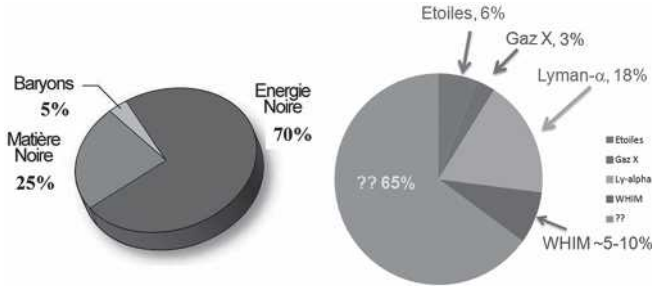
Un vrai changement de paradigme survient en 1984, comme l'aboutissement de plusieurs avancées en cosmologie et de découvertes obser-



vationnelles majeures s'étalant sur la vingtaine d'années précédentes. Nous aurons le loisir de revenir plus en détail sur ces étapes à l'origine de la cosmologie moderne. Tout d'abord, la découverte du fond cosmologique micro-onde par Penzias et Wilson en 1965 confirme la théorie du Big-Bang pour les premières phases de l'Univers. En 1950, Fred Hoyle avait inventé le terme de Big-Bang pour se moquer des théories où l'Univers débutait son expansion à un instant zéro, alors qu'il défendait le modèle stationnaire. Une des plus belles réussites du Big-Bang a été d'expliquer comment se sont formés les premiers éléments, comme l'hélium ou le deutérium. Ces derniers sont observés aujourd'hui dans toutes les galaxies qui nous entourent avec une abondance supérieure à celle attendue de par leur fabrication dans les étoiles. Leur nucléosynthèse dans l'Univers jeune apporte des contraintes très intéressantes sur la densité de protons et de neutrons présents dans le premier quart d'heure de l'Univers, et donc sur la fraction universelle de baryons. En 1975, la mesure très précise des abondances des éléments établit que la matière ordinaire ne peut pas dépasser 5 % de la densité critique, celle qui sépare les univers ouverts et fermés. Cette densité critique est aujourd'hui de  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>. Toute densité normalisée à cette densité critique se nomme  $\Omega$  par convention, ce qui se traduit par  $\Omega_b = 0,05$  pour les baryons (ou matière ordinaire, dont nous sommes faits, cf. Figure 1.7).

## Comment s'effondrent les galaxies, en dépit de l'expansion ?

Une autre grande question de la cosmologie est de savoir comment se sont formées les grandes structures et les galaxies à partir d'un état initial de l'Univers très homogène. Aujourd'hui, l'Univers qui nous entoure est extrêmement structuré, avec un énorme contraste entre galaxies et vide intergalactique. Mais l'observation du fond cosmologique micro-onde montre qu'il était très homogène au départ. Le fond cosmologique correspond au bain de photons qui se sont propagés librement à partir de leur dernière diffusion, environ 400 000 ans après le Big-Bang. Avant cette époque, les photons étaient diffusés sans cesse par les particules chargées du plasma initial, et avaient une trajectoire tourmentée. Ensuite, l'Univers refroidi par l'expansion s'est recombinié



**Figure 1.7.** Composition de l'Univers, mise à jour d'après les dernières déterminations faites à partir des résultats de l'observation du fond cosmique micro-onde avec le satellite Planck (à gauche). Dans le schéma de droite, la fraction de matière ordinaire, c'est-à-dire les 5 % de baryons, est détaillée en au moins cinq composants. Les étoiles des galaxies ne correspondent qu'à 6 % des baryons, et le gaz très chaud dans les amas à 3 %. Les études des absorbants dans la raie Lyman- $\alpha$  de l'hydrogène montrent qu'aux alentours de 18 % pourraient se trouver en gaz ionisé dans les filaments cosmiques intergalactiques. On pense aussi qu'une grande partie des baryons pourraient se trouver dans un état tiède ou chaud (WHIM = *Warm-Hot Intergalactic Medium*). Plus de la moitié est encore inconnue, et devrait se trouver sous forme de gaz chaud ou froid.

lorsqu'il a atteint la température de 3 000 K (soit un décalage vers le rouge, ou « *redshift* », de  $z \sim 1\,000$ ), et le plasma a laissé la place au gaz d'hydrogène neutre. Les photons du fond cosmologique gardent donc en empreinte l'état de l'Univers à cette époque de dernière diffusion et, en particulier, devraient nous transmettre les fluctuations de densité primordiales  $\delta\rho/\rho$  qui ont ensuite donné lieu aux grandes structures et aux galaxies. Pourtant, ces fluctuations sont très petites, on le sait aujourd'hui, de l'ordre de  $10^{-5}$  en valeur relative, et dans les années 1970-1980 il n'existait que des limites supérieures. Mais le niveau de ces limites était déjà inquiétant.

En effet, les fluctuations de densité croissent très lentement, car l'expansion de l'Univers ralentit leur effondrement gravitationnel. L'amplitude des fluctuations ne croît que proportionnellement à la taille caractéristique de l'Univers, soit comme l'inverse de  $(1+z)$ ,  $z$  étant le *redshift*. La matière ordinaire ne peut commencer à s'effondrer gravitationnellement qu'après la recombinaison (à  $z \sim 1\,000$ , ou  $T = 3\,000$  K), car auparavant les ions et les électrons sont intimement couplés aux

photons par la diffusion Thomson. Les particules chargées participent alors aux oscillations acoustiques avec les photons. Si l'on doit attendre que les atomes d'hydrogène se forment et que le gaz de baryons se sépare des photons, alors les fluctuations de densité ne peuvent croître que d'un facteur 1 000 jusqu'à aujourd'hui. Comme les limites supérieures mesurées à l'époque sont déjà inférieures à  $\delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$ , les structures ne peuvent pas se former dans un Univers fait uniquement de matière ordinaire.

La seule solution réside dans le recours à une autre matière, invisible ou noire, car elle n'interagit pas avec les photons. Cette non-interaction lui permet de s'effondrer sous sa propre gravitation pour former des structures et galaxies noires, avant la recombinaison de l'hydrogène. L'existence d'une matière noire exotique, faite de particules encore inconnues, s'impose alors.

## Les neutrinos pourraient-ils être la masse manquante ?

Il est intéressant de noter que c'est précisément à cette même époque qu'un premier candidat fait son apparition : les neutrinos, qui jusque-là étaient considérés comme sans masse, ainsi que le prédisait le modèle standard des particules élémentaires, se révèlent avoir une petite masse. C'est le mystère des neutrinos solaires qui suggère l'existence de cette masse. Les astronomes qui essayent de détecter tous les neutrinos formés dans les réactions nucléaires au sein du Soleil, se heurtent à un résultat surprenant : un flux de neutrinos trois fois plus faible qu'attendu. Fallait-il incriminer notre connaissance de la structure interne du Soleil ? En fait, seulement un tiers du flux de neutrinos venant du soleil est détecté, parce que les neutrinos existent sous trois sortes, appelées « saveurs » : neutrinos électroniques, muoniques et taus. Sur le chemin entre le Soleil et la Terre, ils se partagent entre ces trois saveurs, et les détecteurs sur Terre ne comptent que les neutrinos électroniques. Or l'échange entre les trois saveurs n'est possible que si les neutrinos ont une masse. On ne connaît encore à l'heure actuelle que le carré de la différence de masse entre les divers neutrinos, mais pas encore leurs masses individuelles. Nous reviendrons sur ce problème dans un prochain chapitre.

Même si la masse des neutrinos est faible, leur contribution dans le contenu de l'Univers pourrait être significative, car ils sont nombreux.

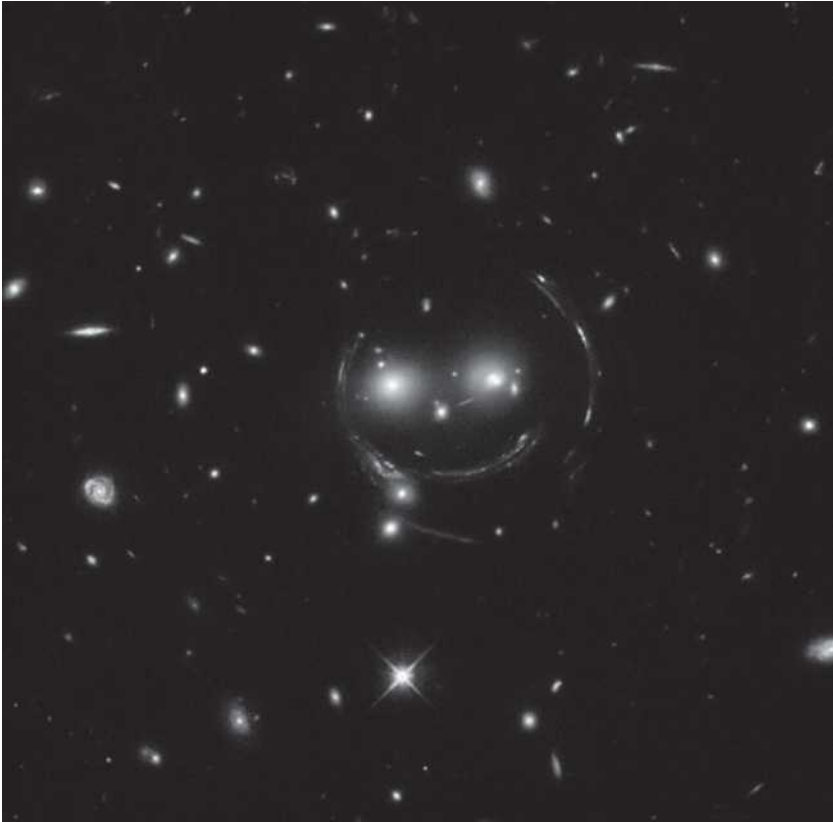
Les neutrinos provenant du Big-Bang sont présents aujourd'hui avec une densité comparable à celle des photons (300 neutrinos/cm<sup>3</sup>). En 1976, cette question s'est alors posée : et si la matière noire était constituée de neutrinos ? La densité normalisée des neutrinos est  $\Omega_\nu = \Sigma m(\text{neutrino}) / 45 \text{ eV}$ . Si chacun des neutrinos contribue pour 15 eV, les neutrinos pourraient atteindre la densité critique pour rendre l'Univers fermé ( $\Omega = 1$ ). Cette masse était encore possible dans les années 1970. Rappelons que la masse équivalant à 1 eV (électronvolt) =  $1.8 \cdot 10^{-33} \text{ g}$  et que la masse de l'électron est de  $m(\text{électron}) = 0,5 \text{ MeV}$ , par comparaison.

Mais très vite, les astronomes remarquent que la matière noire ne peut pas être constituée uniquement de neutrinos, car c'est de la matière noire chaude. Cela veut dire que les particules sont relativistes lorsqu'elles se découplent du Big-Bang, *i.e.* lorsque leur abondance est gelée et qu'elles ne peuvent plus être en équilibre formation-annihilation, la température de l'Univers tombant en dessous de leur énergie de masse ; et d'autre part, elles ne peuvent plus s'annihiler, car leur densité tombe en dessous de la densité critique avec l'expansion de l'Univers. Or les particules relativistes créent une pression qui empêche la matière de s'effondrer sur des échelles de l'ordre de leur libre parcours moyen. Il ne se formerait alors que de très grandes structures, qui ensuite pourraient se fragmenter. Ce scénario ne correspond pas du tout à l'Univers observé, comme confirmé par les simulations numériques de formation des structures. La matière noire froide, faite de particules plus massives, non relativistes au découplage, devient le modèle privilégié, le modèle standard (CDM, pour *Cold Dark Matter*). Ces particules permettent la formation de structures à toute échelle. Comme les premières structures à s'effondrer sont à petite échelle, cela correspond au scénario hiérarchique, où les grandes structures se forment par fusion de plus petites. La matière noire froide constitue encore aujourd'hui le modèle privilégié, comme nous allons le voir maintenant plus en détail.

## Les lentilles gravitationnelles cartographient la matière noire

Pour compléter cette histoire de la matière noire, il faut mentionner une découverte essentielle, à l'origine de notre principal outil pour car-

tographier aujourd'hui cette masse invisible : les lentilles gravitationnelles. Si la masse ne se voit pas, sa gravité dévie les rayons lumineux, et les images déformées trahissent sa présence. Einstein, au début du  $xx^e$  siècle, avait prédit la formation des arcs, et même des anneaux, comme l'image déformée d'un astre d'arrière-plan par une masse-lentille sur la ligne de visée. Lorsque la source, la lentille et l'observateur sont bien alignés, on s'attend à voir un anneau par symétrie. Mais la



**Figure 1.8.** Exemple de lentille gravitationnelle, dans cette image du HST (Hubble Space Telescope Galaxy) de l'amas de galaxies SDSS J1038+4849. L'image est qualifiée de figure souriante, les deux yeux étant les principales galaxies de l'amas et le sourire venant des arcs gravitationnels. Ces arcs sont les images déformées de galaxies d'arrière-plan, dont la lumière est déviée par l'amas. (Crédit : NASA/ESA.)

probabilité en était jugée si faible que l'observation était qualifiée d'impossible, et les anneaux d'Einstein n'ont été découverts que cinquante ans après. En 1987, les premiers arcs dans les amas ont été découverts à l'observatoire de Toulouse, et interprétés comme des arcs gravitationnels (Soucaïl *et al.*, 1987). Au centre des amas, une multitude d'arcs sont visibles sur les images à haute résolution angulaire (*cf.* Figure 1.8), et tout autour les images des galaxies sont aussi déformées : c'est l'étude statistique de ces déformations qui permet la cartographie de la matière noire.



# La matière noire

## Clé de l'Univers ?

Si ces dernières années de nombreuses découvertes ont permis de mieux connaître notre Univers, 95 % de son contenu, constitué de matière et d'énergie noires, nous est encore aujourd'hui totalement inconnu. Quelle est la nature de cette matière noire, de ces particules exotiques, sans lesquelles ne pourraient se former les galaxies ?

L'ouvrage, rédigé par Françoise Combes – astrophysicienne dont les travaux de recherche dans ce domaine sont unanimement reconnus – fait le point sur l'état actuel des connaissances, les découvertes les plus récentes et les prochains défis à relever.

Une référence pour tous les passionnés de cosmologie !

*Astrophysicienne, agrégée de sciences physiques et docteur d'État en astrophysique, **Françoise Combes** a été sous-directrice du laboratoire de physique de l'École normale supérieure d'Ulm et astronome à l'Observatoire de Paris. Elle a présidé la Société française d'astronomie et d'astrophysique et dirigé le programme « Galaxies. » du Centre national de la recherche scientifique.*

*Membre de l'Académie des sciences depuis 2004, elle a été nommée professeur au Collège de France, titulaire de la chaire « Galaxies et cosmologie », en août 2014.*

ISBN : 978-2-311-40080-9



9 782311 400809

[www.vuibert.fr](http://www.vuibert.fr) 