A la recherche de la matière noire

Les astrophysiciens bénéficient aujourd'hui d'instruments capteurs les plus perfectionnés grâce, en particulier, aux techniques spatiales mises à leur service pour observer les astres et les galaxies sous toutes les longueurs d'ondes. Pourtant, quelle frustration de constater que près de 90 % de la masse totale de l'univers échappe à toute possibilité d'investigation directe. Cette partie considérable de l'univers, dénommée « matière noire », « sombre » ou « invisible », semble régir de façon presque « dictatoriale » le mouvement des grandes structures (du niveau des galaxies jusqu'à celui des amas de galaxies), et même celui de l'univers entier si l'on étudie celui-ci sous le seul critère de ses aspects dynamiques.

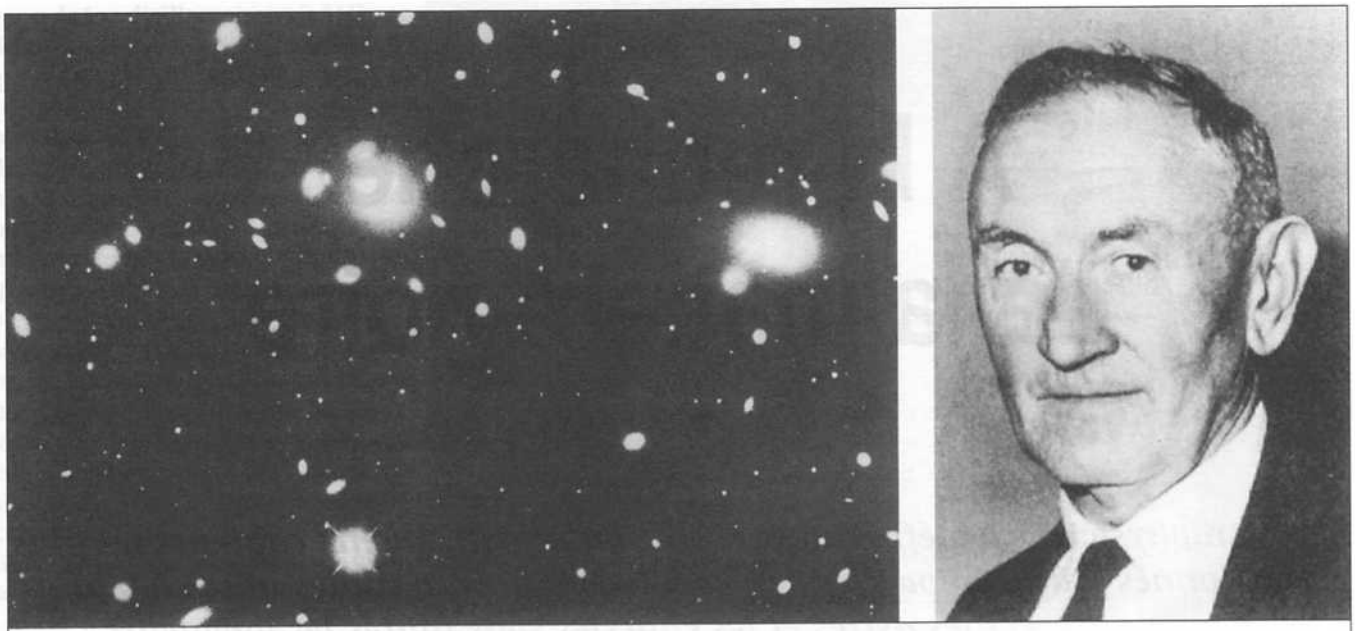
Philippe Jamet

La matière noire, dont la nature fait depuis des décennies l'objet d'âpres controverses, peut être considérée comme une des questions prioritaires auxquelles cherchent à répondre les astrophysiciens, à côté d'objectifs en apparence plus « simples » parce que mieux définis comme celui du calcul des structures des objets en rotation rapide (comme les pulsars et les étoiles à neutrons), ceux des pertes de masse dues au transfert par rayonnement, des critères de stabilité ou d'instabilité des structures stellaires ou encore du passage de l'inanimé au vivant en milieu planétaire. Dans tous les cas que nous venons de citer, les astrophysiciens avaient au moins l'avantage de pouvoir développer des théories, de faire des observations ou de « l'astrophysique de laboratoire » (cas de la physique atomique et moléculaire et de l'étude de la formation de molécules en milieu « hostile ») sur des objets ou des structures dont ils connaissaient assez bien la nature et leurs particularités.

Dans le cas de la matière noire, ils n'ont pu qu'en observer les effets indirects dus aux perturbations dynamiques qu'elle induit sans savoir vraiment à quoi ils ont affaire effectivement. Ils se retrouvent comme un boxeur confronté aux coups d'un adversaire invisible et dont il est nécessaire de pouvoir évaluer les déplacements « au jugé » avant de tenter de le coincer dans les cordes !

Preuves de son existence

L'existence de la matière noire apparut évidente dans les années 30, quand furent élaborés les premiers modèles fiables relatifs à la mécanique et à la dynamique des galaxies et des grandes structures. On constate un écart notable d'ordre dynamique entre les mouvements théoriques correspondant à la masse et à la luminosité de ces structures (rapport M/L) et les mouvements observés.



A gauche, l'amas de Coma, situé à 250 millions d'années-lumière de notre Galaxie et comprenant plusieurs milliers de galaxies. A droite, l'astronome Fritz Zwicky (1898-1974).

Dans les années 1932-1933, l'astronome bulgaro-suisse Fritz Zwicky, émigré aux Etats-Unis et célèbre pour avoir été l'un des premiers à envisager l'existence des étoiles à neutrons issues de l'effondrement sur elles-mêmes d'étoiles massives, est chargé par le Caltech d'un programme de recherches sur la répartition des galaxies dans l'univers. Il se met ainsi à élaborer un catalogue photographique des galaxies identifiées à cette époque, en définissant la place de celles-ci et leurs mouvements propres par rapport aux amas auxquels elles appartiennent. A son grand étonnement, il constate une double perturbation dynamique : d'un côté, les mesures de vitesses relatives aux étoiles et aux nuages de gaz et poussières de chacune des galaxies observées sont beaucoup trop élevées au regard de leur masse visible ; d'un autre côté, les écarts sont encore plus élevés par rapport aux modèles théoriques dès que les observations sont effectuées à l'échelle plus macroscopique des amas de galaxies, structures pouvant regrouper jusqu'à plusieurs milliers de galaxies ! Au cours des ses observations, Zwicky remarque un phénomène étonnant au niveau de l'amas de Coma, une structure située à un peu plus de 250 millions d'années-lumière de notre galaxie, regroupant plusieurs milliers de galaxies à l'intérieur d'une sphère imaginaire de 25 millions d'années-lumière. Zwicky montre que les vitesses individuelles de déplacement des composants galactiques de Coma et leurs rapports respectifs sont, sans le moindre doute possible, « anormales et excessives ». Il arrive à la conclusion suivante : le maintien de l'équilibre dynamique de l'ensemble de l'amas n'est explicable que par la présence de très importantes quantités de matière optiquement non détectable à l'intérieur et autour de ces galaxies.

Pour comprendre cette relation entre la vitesse de déplacement et un composant galactique individuel observé et la masse totale de l'amas dans lequel cette galaxie se trouve, il faut faire appel aux lois de la mécanique céleste et aux forces de gravitation. Elles expliquent pourquoi l'interaction de corps en mouvement agissant les uns sur les autres (planètes par rapport à une étoile, étoiles entre elles, galaxies entre elles) se traduit par des mouvements relatifs dotés d'une vitesse propre à chacun des composants de l'ensemble par rapport à un centre de gravité commun. La masse totale de l'ensemble est ainsi déduite de ces effets gravitationnels. D'une façon générale, et tous les travaux effectués depuis ceux de Zwicky semblent le confirmer[1], l'étude des associations galactiques révèle que les vitesses de déplacement de leurs composants (mesurées par Effet Doppler) sont beaucoup trop élevées pour qu'on les explique par un simple manque de fiabilité des mesures.

L'astrophysique spatiale a permis de nous faire une idée plus précise des structures et des répartitions en différents types d'étoiles de la plupart des galaxies facilement observables par les instruments en orbite. Certaines indications nous mènent à croire que d'importantes quantités de cette matière noire seraient « infiltrées » au cœur même des galaxies. Cette hypothèse a été renforcée depuis 1983 grâce aux découvertes réalisées par le satellite américano-anglo-néerlandais IRAS lors d'observations de galaxies spirales. Elles ont révélé, entre autres, que nombre de ces galaxies émettent des quantités *anormales* de rayonnement dans l'infrarouge lointain. D'ordinaire, ce rayonnement est dû à l'existence, au sein des galaxies, d'immenses nuages de poussières où se trouvent des composants dont les arrangements atomiques favorisent le transfert du rayonnement UV des étoiles avoisinantes vers l'infrarouge, excitant ces poussières par cette variante particulière du spectre électromagnétique. Dans le cas détecté par IRAS, la quantité d'UV réellement rayonnée est à elle seule *insuffisante* pour provoquer l'excitation

nécessaire des poussières correspondant au niveau d'émission en infrarouge détecté. L'astrophysicien néerlandais Valentijn (dont l'équipe a travaillé sur IRAS) voit dans ces résultats la preuve (complémentaire aux perturbations d'équilibre dynamique) de l'existence d'importantes quantités de matière noire au sein de ces galaxies. Dans ce cas précis, il y a interaction avec la matière visible mais par le biais d'un phénomène physique encore inconnu qui ne concerne peut-être qu'une partie de cette matière noire dont les diverses composantes ne sont probablement pas toutes interactives avec la matière ordinaire. L'addition des tous ces éléments explique pourquoi les vitesses individuelles mesurées de ces galaxies n'aboutissent pas à la dislocation des amas et des groupes, phénomène jamais constaté dans l'univers.

D'autre part, l'étude d'un certain nombre de structures lointaines, à la limite de « visibilité » de nos instruments (comme par exemple les quasars) laisse penser qu'il y a *quelque chose* entre elles et nous et que ce « quelque chose » joue un rôle de « frein » du mouvement général d'expansion de l'univers, au prix de forces gravitationnelles gigantesques.

De ce dernier point de vue, les implications cosmologiques de la matière invisible apparaissent évidentes et, sans même avoir acquis un minimum de certitudes sur sa nature, de nombreux théoriciens et astrophysiciens l'ont intégrée dans des modèles où elle est compatible avec le phénomène de nucléosynthèse primordiale responsable de la formation des éléments les plus légers de l'univers, à savoir le deutérium, l'hélium 3, l'hélium 4 et le lithium 7. C'est le cas notamment de Jean Audouze, directeur de l'Institut d'Astrophysique de Paris, et d'un autre spécialiste, M. Delbourgo-Salvador. Parmi les hypothèses retenues par les deux astrophysiciens, notons celle où la matière noire serait de nature semi-baryonique. Elle se serait formée selon un processus de photofission partielle de l'hélium 4 et du lithium 7, au sein du deutérium et de l'hélium 3, par l'intermédiaire de photons hyper-énergétiques produits par la désintégration de neutrinos très massifs et de particules dont l'existence semble probable pour de nombreux physiciens, à savoir les gravitinos. L'origine cosmologique de cette matière et sa nature « dissociée » expliquerait pourquoi son interaction avec la matière ordinaire serait faible, voire nulle, ainsi que les conditions de sa formation dans des conditions de températures extrêmement élevées ou très basses. Le rôle que cette matière a pu jouer comme « catalyseur » des grandes structures (même s'il ne participe pas à la réaction) a attiré beaucoup de physiciens des particules dans les programmes de collaboration pluridisciplinaire avec les astrophysiciens. Toutefois, de nombreuses années auparavant, d'autres spécialistes envisageaient qu'il puisse ne pas exister une explication unique au phénomène de la matière noire...

Il nous faut également noter, qu'outre le processus de vitesse anormale des galaxies et des amas, la présence massive de matière sombre au niveau des grandes structures est également révélée par les cartographies radiogalactiques de l'hydrogène neutre à 21 centimètres. Cet hydrogène, sous forme de nuages, est un composant essentiel des parties internes et externes de toutes les galaxies et l'examen des cartes radio à 21 cm d'un grand nombre de galaxies montre en effet que ces nuages d'hydrogène subissent des distorsions étonnantes qui s'étendent bien au-delà de la structure galactique proprement dite et dans le cadre de configuration anormales. Tout ceci prouve que ces nuages subissent massivement des effets gravitationnels incompréhensibles à moins de faire appel à l'existence d'une matière « extérieure » non détectable par nos moyens traditionnels.

EN SEPTEMBRE DANS
FUSION
La science, passionnément !
Dossier :
la magnétohydrodynamique
Le Japon se lance dans
un programme spatial ambitieux
Le danger de
l'*implosion* démographique

Questions longtemps sans réponse

Il est flatteur pour nous de constater que, dans le cadre des efforts considérables entrepris au niveau international pour tenter d'identifier ce que peuvent être les composants de cette matière noire, les astrophysiciens de l'hexagone semblent avoir pris une place de choix, que ce soit

aussi bien à l'Observatoire de Meudon (laboratoire DAEC dirigé par Chantal Balkowski) qu'à l'Institut d'Astrophysique de Paris (travaux de Jean Audouze, Alfred Vidal-Madjar et Daniel Kunth) ou bien encore au Service d'Astrophysique de Saclay ou au Département de Physique des particules élémentaires du CEA (équipe de Michel Spiro). Cette prépondérance française au niveau des programmes internationaux s'est d'ailleurs traduite ces dernières années par deux colloques d'importance mondiale qui ont réuni sur le sol français les meilleurs spécialistes dans ce domaine[2].

De tous ces débats qui agitent la communauté des astrophysiciens depuis près de vingt ans, il est apparu en fait que cette matière noire pouvait être la résultante de plusieurs phénomènes indépendants les uns des autres ou seulement interactifs au niveau de quelques-uns, certains pouvant être interactifs avec la matière ordinaire, d'autres non, mais dans tous les cas déterminante quant aux anomalies de perturbation dynamique.

Parmi les candidats potentiels proposés à l'époque, citons les neutrinos, particules de masse nulle et électriquement neutres, dont l'existence fut prouvée en 1956 à la suite des travaux de Pauli sur les processus de désintégration Bêta et dont on sait qu'ils sont notamment émis lors des explosions de supernovae et même par des étoiles de type solaire à la suite des processus de nucléosynthèse. Ces neutrinos, dont l'énergie est très inférieure à celle de l'électron, ont toutefois une masse trop petite (1/10.000 à 1/100.000 de l'électron) pour pouvoir être détectés par des moyens purement astrophysiques, ce qui explique toutes les tentatives effectuées ces dernières années pour les détecter à partir de laboratoires souterrains et de tunnels, du fait que ces neutrinos peuvent pratiquement traverser toutes les formes de matière. Les conséquences de leurs propriétés sur les phénomènes astrophysiques ont été particulièrement étudiées par le français Vannucci et l'allemand Raffelt. Toutes les informations tendent à prouver que les neutrinos ne pourraient pas se condenser pour former les constituants de la matière sombre qu'en s'associant avec des quantités de matière différente dont l'ordre de grandeur doit être au minimum comparable à celui d'une galaxie de grande taille. Pour les astrophysiciens Themaine et Gunn (Caltech), le fait qu'il existe de la matière noire autour et au cœur de petites galaxies particulières (dites naines sphéroïdales) doit écarter, tout au moins pour celles-ci, l'hypothèse du neutrino.

Parmi les autres explications avancées, notons les particules exotiques qui avaient des tenants aux Etats-Unis (Frenk et White) mais aussi en France à l'IAP et qui, selon une hypothèse qui a encore du succès, auraient pu être les composants essentiels d'une matière sombre et froide témoin des processus qui ont abouti à la formation de l'univers très peu de temps après la formation des éléments les plus légers. Ces particules dites Wimps (Weakly Interacting Massive Particle) seraient plus lourdes que les protons et leur nature difficile à mettre en évidence à cause de leur absence d'interaction avec la matière ordinaire. Autre possibilité envisagée à l'époque, les « naines brunes ». Ces étoiles, en raison de leur faible masse (inférieure à 0,08 masse solaire), ne peuvent engendrer les processus habituels de nucléosynthèse qui caractérisent les étoiles et sont donc des astres « intermédiaires » entre une petite étoile et une planète géante gazeuse de type Jupiter. Toutefois, on ne peut en aucun cas expliquer les déformations extra-galactiques des halos d'hydrogène neutre repérés en mode radio autour des galaxies par les seules naines brunes. Il faudrait pour cela des naines brunes en quantités pratiquement illimitées et il semble douteux que ce processus de formation mini-stellaire apparaisse aussi loin du centre des galaxies, à moins de considérer que des quantités monumentales de poussières et de gaz puissent exister bien au-delà des structures galactique les plus éloignées du centre des galaxies, à savoir les amas globulaires contenus dans les halos galactiques. Mais alors, pourquoi n'a-t-on pas détecté jusqu'à présent ces monumentales concentrations de gaz et de poussières, même s'il existe quelques exemples rarissimes et récents de découvertes de concentrations énormes de gaz intergalactique ? Dans les années 1991-1992 toutes ces questions faisaient encore l'objet de controverses entre théoriciens et praticiens de l'astrophysique mais c'était sans compter avec les programmes de détection mis en place par les mêmes astrophysiciens.

Recherches dans tous les azimuts

Depuis plusieurs années des efforts intenses sont entrepris pour « piéger » la matière noire en utilisant, pour vérifier toutes les hypothèses relatives à celle-ci, ce que l'on pourrait comparer à de véritables « mâchoires d'acier » dotées de senseurs capables de traquer géographiquement l'invisible ou d'en déduire la composition par une analyse de ses effets indirects. Dans le domaine des Wimps, les laboratoires IN2P3, DAPNIA/CEA et l'IAP de Paris se sont particulièrement impliqués dans la mise au point de récepteurs thermiques dénommés bolomètres et équipés de détecteurs semi-conducteurs au germanium extrêmement sensibles de façon à pouvoir capter les très basses énergies émises par des particules situées en milieu très froid. Dans ce domaine, nous en sommes encore au stade de la mise en œuvre et il faudra certainement attendre l'embarquement de tels récepteurs sur des satellites à longue durée de vie pour pouvoir passer du stade de la présomption à celui de preuve.

Par contre, plus intéressants parce que plus immédiatement accessibles, sont les résultats obtenus de la détection de naines brunes et ceux relatifs à la découverte de grandes concentrations de gaz, plus précisément d'hydrogène moléculaire, associées à des poussières. Dans ces deux domaines, l'année 1993 peut être considérée comme une « révolution » et même une rupture au niveau de l'histoire de la connaissance : grâce à certaines découvertes, plus rien ne sera désormais comme avant...

En-dessous de la Voie lactée, on peut apercevoir deux taches lumineuses : le Petit et Grand Nuage de Magellan. Visible seulement dans l'hémisphère Sud, le Grand Nuage est actuellement l'objet des recherches du programme français EROS, pour détecter des naines brunes par méthode indirecte, dite de « microlentille gravitationnelle ».

Depuis 1990, le programme EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) représente un véritable travail de titan au niveau de la recherche de naines brunes dénommées pour la cause « Massive Compacts Halo Objects ». La base de ces observations repose sur la possibilité que certaines de ces naines brunes, au cours de leur déplacement, puissent passer exactement dans la ligne de visée reliant une étoile parfaitement identifiée et un observateur terrestre. Inspirés notamment par Alfred Vidal-Madjar (IAP) et Michel Spiro (DAPNIA/CEA), les objectifs d'EROS consistent à analyser et détecter les effets de ce passage sur les modifications de la courbe de lumière des étoiles visées en se basant sur l'hypothèse que les forces de gravité de la naine brune joueront sur cette lumière. On peut le comparer à un « effet de loupe », dénommé microlentille gravitationnelle et qui a déjà été constaté dans le passé lorsque qu'une étoile quelconque passe devant une céphéide bleue ou dans le cadre d'un système d'étoiles doubles[3]. Il est alors généralement constaté, au passage devant l'étoile visée, une *forte hausse* de la courbe de luminosité de cette dernière. Cette hausse se traduit par un passage temporaire à une magnitude d'ordre supérieur avant que celle-ci décroisse à nouveau lorsque l'étoile perturbatrice sort peu à peu de la ligne de visée. Il va de soi que, pour ce qui concerne les naines brunes qui sont des astres de très petite taille, il existe statistiquement de très faibles chances pour que de tels alignements favorables par rapport à notre position dans l'espace se produisent souvent : d'où la nécessité d'étudier simultanément des *millions* d'étoiles pendant plusieurs années, pour augmenter les chances de détection !

Ceci explique pourquoi le programme EROS a été structuré pour une surveillance permanente du Grand Nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de la nôtre située à 179.000 années-lumière, seulement visible de l'hémisphère Sud. Elle offre l'avantage d'occuper en surface apparente une portion du ciel visible considérée assez importante pour offrir statistiquement des chances réelles de détecter des naines brunes dans les parties périphériques de notre Galaxie, bien sûr si l'une de celles-ci se trouve à un moment donné dans la ligne de visée reliant une étoile significative de Magellan et nous. EROS représente la surveillance presque permanente de 10.150.000 étoiles « magellaniennes », spécifiquement choisies en fonction de leurs critères de luminosité au moyen de plaques photographiques à grand champ et longue pose, et d'une caméra CCD (réalisée au DAPNIA) installée à l'Observatoire Européen Austral situé au Chili.

Et, comme le succès n'est bien souvent que le résultat d'une « longue patience déguisée », en 1993 une équipe française pluridisciplinaire[4] a réussi à mettre en évidence *deux* de ces phénomènes de microlentilles

provoquées par le passage de naines brunes devant deux des étoiles choisies pour le programme EROS. Les courbes de lumière présentées par les chercheurs sont en effet saisissantes si on les compare avec les modèles de références théoriques : les diverses phases détectées s'étalent sur une durée de 30 jours avec un accroissement de magnitude significatif d'un facteur d'amplification de 2,5, comme il avait été prévu lors de la définition des modèles ! Et quelque temps après, en octobre 1993, un résultat presque identique était annoncé par une équipe américano-australienne[5].

Plus étonnant encore, d'autres découvertes effectuées la même année laissent à penser qu'une grande partie de la matière noire pourrait être composée de nuages massifs et étendus d'*hydrogène moléculaire*, celui-ci étant ordinairement non détectable en mode radio. En effet, à l'inverse de l'hydrogène neutre facilement détectable sur la raie à 21 cm, et de la plupart des molécules découvertes dans l'espace, l'hydrogène moléculaire *n'émet pas d'ondes radio* parce que ses composants atomiques se retrouvent sous forme symétrique par rapport à l'axe de rotation de la molécule. Il est par contre plus facilement détectable en UV lorsque la luminosité d'astres proches ou lointains (comme les quasars) voit celle-ci absorbée par ces nuages lorsque les deux se situent sur une même ligne de visée par rapport à un observateur terrestre.

Une autre façon, cette fois-ci indirecte de le détecter, vient de ce que cet hydrogène moléculaire ne constitue pratiquement *jamais* à lui seul des structures homogènes dans l'espace et qu'il est généralement *associé* dans des agrégats très froids au *monoxyde de carbone* qui émet lui, en mode radio, sur la raie à 2,6 millimètres. Etant donné que l'un n'existe pas sans l'autre, la détection de grandes quantités de monoxyde de carbone implique également celle de l'hydrogène moléculaire de façon indirecte. Toutefois, étant donné les températures extrêmement basses qui règnent dans les parties périphériques des galaxies, la détection de ce monoxyde de carbone n'est pas toujours évidente en radioastronomie millimétrique car, en dessous d'une certaine température, il se forme des conglomérats quasiment inertes et « inactifs » qui n'émettent pratiquement plus sur une quelconque longueur d'onde et particulièrement en radio. Dans ces conditions la détection de cet hydrogène moléculaire associé au monoxyde de carbone relève de l'exploit ! C'est pourtant ce que vient de réaliser avec les instruments de l'IRAM (interféromètre du plateau de Bures et antenne unique du Pico Veleta) l'équipe de St.Guilloteau associée au Département de radioastronomie de Meudon. De cette traque fine et sensible, les chercheurs français, associés à un scientifique canadien impliqué sur le télescope spatial Hubble, et travaillant selon des méthodes de « signature indirecte », viennent de ramener dans leurs filets une bonne demi-douzaine de nuages mixtes d'hydrogène moléculaire et de monoxyde de carbone associés à des poussières et non détectés auparavant. Maintenant que la voie est ouverte à un nouveau type de recherches, l'on peut s'attendre à de nouvelles découvertes.

Selon la française Françoise Combes (Laboratoire de radioastronomie de Meudon) et le suisse Pfenniger, ces immenses nuages ne seraient en fait qu'un des composants principaux de la matière noire et un élément interactif avec la matière visible. Ils seraient probablement semicristallisés sous forme de glaces d'hydrogène et de structures ayant des similitudes avec une forme de carboglace « mou », à cause des très basses températures du milieu ambiant. Sous l'influence de phénomènes de collision ou d'ondes de choc produits par l'explosion de supernovae, ces nuages pourraient de temps à autre changer d'état et s'effondrer gravitationnellement sur eux-mêmes, donnant naissance à de nouvelles étoiles. Exit désormais les théories de la matière sombre faisant appel à des particules exotiques ou des axions ? Pas sûr du tout car les naines brunes et l'hydrogène moléculaire ne peuvent à eux seuls expliquer les déformations étonnantes subies par les nuages d'hydrogène neutre à proximité des halos galactiques. Et dans ce domaine si fascinant qu'est la matière noire, il y a encore probablement place pour beaucoup d'autres hypothèses et tentatives d'explication. ■

Notes

1. En particulier ceux de Vera Rubin, Hartwick, K. Ford, D.Burstein, W.L.W. Sargent.

2. Le premier (« The Distribution of Matter in the Universe ») a été organisé en août 1991 à Paris par le DAEC (Département d'Astrophysique Extra-galactique et de Cosmologie) de l'Observatoire de Meudon. En juin 1992, se tenait, dans le cadre des « Rencontres de Blois », un colloque sur « l'Astrophysique des particules » consacrant une part importante de ses débats au problème de la matière noire. Parmi les intervenants, notons les noms de A.Yahil (Berkeley), Y.Mellier (Observatoire de Midi-Pyrénées), R.Sancisi (Université de Groningen), L.Krauss (Yale University), B.Sadoulet (Berkeley), M.Shapoznikov (Institut de Physique Nucléaire de Moscou).

3. Travaux de Paczynski en 1986, Aubourg et Ferlet en 1991.

4. Vidal-Madjar de l'IAP, Marc Moniez de l'INP3 d'Orsay et Michel Spiro du DAPNIA/CEA.

5. Cette équipe associait des chercheurs du Lawrence Livermore Laboratory et de l'Observatoire du Mont-Stromlo.

Ouvrages à consulter

1. Jean Audouze, *Constraints on Dark Matter from Primordial Nucleosnthesis*, IAP, novembre 1985.

2. *Towards a bolometric Dark Matter Detection Experiment*, IAP 420, septembre 1993.

3. Alfred Vidal-Madjar, Daniel Kunth, Michel Spiro et 23 autres coauteurs, *Is Our Massive Dark Halo Macho of Compacts Objects ?*, IAP 426, mai 1991.

4. A. Vidal-Madjar, *Detection of Compact Objects by Microlensing*, IAP 432, novembre 1993.

5) *Scintillations* (Journal du Département d'astrophysique, physique des particules, physique nucléaire et instrumentation associée du CEA).

6. A paraître : D. Pfenniger, F. Combes, L.Martinet, Comptes-rendus de recherche dans *Astronomy and Astrophysics* 1 et 2.

7. Philippe Jamet, *La détection des molécules de l'espace*, Fusion numéro 28, mars, avril, mai 1989.