

A la recherche de la quintessence

Un chercheur qui se serait endormi en lisant la littérature astronomique au début des années soixante, pour se réveiller une trentaine d'années plus tard, se croirait transporté dans un autre univers. Assoupi sous un Soleil certes complexe mais essentiellement sans surprises, étudié du sommet des montagnes en plein jour, il se réveille sous un Soleil énigmatique dont on cherche les secrets à l'aide d'appareils enfouis dans des cavernes les plus profondes. Elevé dans une tradition scientifique qui valorisait surtout l'économie d'hypothèses arbitraires et l'exclusion de phénomènes inobservables, notre dormeur se trouve mêlé aux discussions savantes sur des dimensions "compactifiées" et cachées, sur des univers avoisinant sans contact causal, sur des particules dont l'absence à l'état libre prouve l'existence. Les scientifiques de sa jeunesse méprisaient une Eglise qui n'avait pas encore disculpé Galilée pour sa conviction "criminelle" que l'Homme ne se trouve pas au centre de l'Univers; le Vatican a enfin fermé ce chapitre de son histoire ... cédant le terrain à certains cosmologues qui prêchent que l'Univers existe parce que l'Homme est là pour le contempler.

Enfin, avec quelle stupeur accueillera-t-il l'information que l'Univers où il se trouve à présent, loin d'être pratiquement vide comme l'Univers qu'il a quitté, est plein, rempli d'une matière invisible et insaisissable, de nature inconnue; ses bien-aimés protons, neutrons et électrons ne constitueraient ici qu'une fraction ridicule de toute la matière cosmique. La quintessence de l'Antiquité, l'éther maintes fois réinventé et abandonné, trouve ici une nouvelle réincarnation.

La préhistoire d'un problème

L'invention d'objets invisibles a une lignée fort respectable. Pythagore semble avoir été le premier à proposer une planète sombre, déduisant son existence de la non-observation du "foyer" du système planétaire organisé selon ses préceptes d'harmonie musicale: sa nouvelle planète s'interposait en permanence entre la Terre et le "foyer", cachant celui-ci et disparaissant elle-même.

Pythagore était suivi, deux millénaires plus tard, par John Adams et Urbain Le Verrier, qui proposèrent d'expliquer quelques anomalies du mouvement orbital d'Uranus par la perturbation gravitationnelle d'une nouvelle planète lointaine. Neptune fut, en effet, observée, en 1846, près de l'endroit indiqué par Le Verrier. La richesse et la puissance de la gravitation newtonienne furent confirmées au cours du même siècle, quand Friedrich Bessel annonça que, selon ses observations du mouvement de Sirius, cette étoile devait être accompagnée d'une autre, trop peu lumineuse pour être visible avec ses ins-

truments; grâce à une nouvelle génération de lunettes, l'étoile manquante fut enfin découverte en 1864, mais il fallut encore attendre un bon demi-siècle et une révolution en physique fondamentale pour comprendre comment un objet aussi petit pouvait influencer Sirius de façon aussi importante.

La théorie de la gravitation universelle a connu, au 19^e siècle, maints succès éclatants. Cependant, expliquer tout mouvement incompréhensible par l'effet d'une masse "invisible" n'est pas sans danger, comme l'illustre l'histoire de Mercure: l'orbite de cette planète ne correspond pas aux prévisions de la théorie newtonienne et, à la fin du XIX^e siècle, cette anomalie était imputée couramment à la présence d'une petite planète près du Soleil (nommée prématurément Vulcain) ou d'un anneau de poussières (quand Vulcain a refusé de se manifester). Mais, comme l'a montré Albert Einstein, l'orbite de Mercure ne peut être expliquée convenablement que par un changement radical de la théorie de la gravitation.

L'histoire classique

Unique parmi toutes les forces connues, l'effet de la gravitation semble être sans limite: la gravitation contrôle directement le comportement dynamique de n'importe quel ensemble de planètes, d'étoiles et de galaxies. Si l'on suppose, avec Newton et ses successeurs, que la force gravitationnelle varie en fonction inverse du carré de la distance, un lycéen aujourd'hui peut (ou devait pouvoir) exploiter l'équilibre des forces d'inertie et de la gravitation pour montrer que la vitesse v d'un petit corps en orbite circulaire de rayon r dans un potentiel gravitationnel U est donné par :

$$v^2/r = dU/dr \quad (1)$$

Pour le cas d'une orbite autour d'une masse M cette relation se simplifie:

$$v^2 = GM/r \quad (2)$$

où G est la constante gravitationnelle. Enfin il n'est pas beaucoup plus difficile de trouver que la pression P d'un gaz en équilibre dans le potentiel U vérifie:

$$dP/dr = -\rho (dU/dr) \quad (3)$$

où ρ est sa densité.

La relation (3) peut être transposée facilement pour décrire la distribution des vitesses v d'un essaim de masses identiques en équilibre dans le potentiel U :

$$d(n \langle v_z^2 \rangle) / dr = -n (dU/dr) \quad (4)$$

où n est le nombre de masses par unité de volume, et v_z est une composante de vitesse par rapport au barycentre.

La relation (2) permet de trouver la masse centrale d'un système élémentaire, d'après une mesure de la vitesse et du rayon orbital. L'étude de groupes stellaires et galactiques est basée sur les relations (3) et (4).

Pour connaître sans ambiguïté la masse d'un astre, il faut déterminer le trajet d'un "corps témoin" qui se déplace sous son influence gravitationnelle. Si les mouvements apparents sont trop faibles pour qu'un trajet puisse être discerné les corps étant, par exemple, trop loin de nous), rien ne peut être établi sans l'hypothèse supplémentaire (mais *ad hoc*) que les corps constituent un système lié, ce qui permet, d'une simple mesure de vitesse par effet Doppler (plus exactement, sa composante radiale), de sonder le potentiel gravitationnel du système et ainsi de remonter à la masse. Cette hypothèse est en quelque sorte un acte de foi, plus ou moins justifiable par l'aspect géométrique du système et par des convictions intimes concernant son mode de formation; si on l'admet, il suffit de cartographier la distribution de vitesses des corps constitutifs, et ensuite, d'inverser la variation du potentiel dU/dr pour obtenir la distribution de la masse du système.

Un essaim sphérique de masses en équilibre constitue le cas le plus simple: la distribution de masse est donnée par:

$$GM/r^2 = dU/dr \quad (5)$$

Pour toute autre géométrie, il est nécessaire d'inverser l'équation de Poisson:

$$\nabla^2 U = 4 \pi G \rho \quad (6)$$

L'histoire moderne

Les étoiles sont organisées en galaxies; les galaxies font généralement partie d'amas de forme approximativement sphérique et qui, eux-mêmes, sont membres de structures plus grandes, de forme irrégulière, plutôt filamenteuses. La hiérarchie des structures cosmiques ne montre même pas le début d'une disparition aux échelles spatiales les plus grandes observées.

Le premier soupçon que tout ne va pas bien dans le monde des étoiles remonte aux années trente de notre siècle. On savait déjà que le Soleil se trouve près du bord d'un ensemble stellaire, la Galaxie, de forme assez aplatie. Pour les étoiles dans le voisinage du Soleil, il est relativement facile de connaître (approximativement) les distances et les vitesses; dans ce cas, l'équation (4) se présente sous la forme:

$$d(n \langle v_z^2 \rangle) / dz = -n (dU/dz) \quad (7)$$

où v_z est la composante de vitesse perpendiculaire au plan de la Galaxie. La distribution des étoiles et leur dispersion de vitesse en fonction de la distance z au plan de symétrie galactique donne alors la variation du potentiel, et, via l'équation de Poisson, la variation de la masse en fonction de z ; cette procédure amena Jan Oort à suggérer que les étoiles visibles ne constituent qu'environ 50% de toute la matière autour du Soleil.

Peu de temps après, Fritz Zwicky, analysant la dispersion des vitesses des

galaxies dans les amas riches et proches, conclut d'après les équations (4) et (5) que la matière visible dans les galaxies ne suffit pas pour les lier les unes aux autres et en faire un ensemble stable; pour cela, il faut au moins cent fois plus de matière ... qui se cache obstinément au regard indiscret des astronomes.

Ces premières études étaient souvent contestées. Les résultats des analyses de la matière "locale" étaient entachés d'incertitudes considérables: par exemple, pour trouver une distribution de masse d'après les équations (7) et l'équation (6), il faut effectuer numériquement la dérivée seconde d'une grandeur obtenue par comptage d'un petit nombre d'étoiles, de sorte que les fluctuations statistiques déjà importantes sont amplifiées démesurément. Différentes techniques statistiques, différentes façons de tenir compte aussi de l'influence gravitationnelle de la matière en dehors de notre environnement (car notre galaxie n'est pas sphérique), donnent des résultats assez différents; selon le consensus actuel (nié toutefois par une poignée de chercheurs), les incertitudes résiduelles ne permettent pas de conclure que beaucoup de matière manque au compte dans le voisinage solaire.

Les résultats de Zwicky semblent au premier abord plus fiables, car, dans le cas d'amas presque sphériques, seule une dérivée première apparaît dans l'analyse statistique; cependant rien ne prouve que ces ensembles constituent des systèmes liés, sauf leur aspect géométrique régulier et le fait que la dispersion de vitesses des galaxies d'un même amas est petite par rapport à leur vitesse d'ensemble. Un demi-siècle devait s'écouler avant qu'une méthode totalement indépendante — basée sur les effets de la gravitation sur la lumière — vienne étayer la conclusion inquiétante de Zwicky.

Le problème des galaxies spirales

Le sondage du contenu matériel de l'Univers commence à soulever de sérieux problèmes au début des années soixante-dix, quand le mouvement de nuages d'hydrogène atomique (qui se trahissent par l'émission d'une raie caractéristique à la longueur d'onde de 21 cm) a pu être cartographié pour un nombre significatif de galaxies spirales. On savait déjà que leur luminosité décroît, plus ou moins exponentiellement, du centre vers l'extérieur; comme la luminosité est supposée être fonction du nombre d'étoiles, on conclut que la masse stellaire est concentrée vers le centre, et on s'attend à ce que la vitesse orbitale des nuages suffisamment loin du centre de leur galaxie commence à décroître, pour approcher asymptotiquement la loi (2). Mais tel n'est pas le cas: au lieu de décroître comme il le faut, les vitesses orbitales ont la fâcheuse tendance de rester constantes (à quelques oscillations près), et cela jusqu'à des dis-

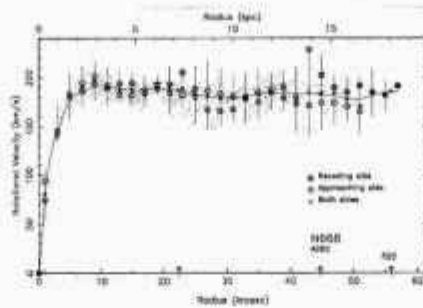


Figure 1 : La courbe de rotation pour une galaxie spirale déterminée à l'aide de la raie H alpha [2]. La courbe continue n'est qu'une fonction spline ajustée aux données. On remarque surtout le plateau; ici, la vitesse orbitale de la matière devrait alors être une fonction décroissante de la distance au centre de la galaxie, si la variation radiale de la luminosité était un témoin complet de la variation de la masse (cliché C. Balkowski).

tances qui atteignent plusieurs fois l'étendue de la matière lumineuse stellaire. Et est devenu rapidement impossible d'imputer cette anomalie à quelque fantaisie de l'hydrogène neutre, car avec le progrès de l'astronomie optique, on a pu constater que les nuages de gaz ionisé associé aux étoiles très chaudes semblent aussi vouloir garder une vitesse orbitale constante, et cela sur des étendues importantes des galaxies spirales (figure 1). Donc, si ces régions sont liées, la masse totale à l'intérieur d'un rayon r doit, selon l'équation (2), être proportionnelle au rayon r ; cette matière n'est pas lumineuse et donc elle n'est pas stellaire, mais sa contribution est grande, s'élevant à plusieurs fois la masse de la matière lumineuse.

Paradoxalement, il est plus facile d'avoir des informations dynamiques de ce type pour les galaxies lointaines que pour la nôtre. En fait, comme toute la matière "chez nous" tourne dans le même sens, la valeur mesurée est, dans ce cas, la différence de deux vitesses comparables, et donc l'incertitude de la mesure est relativement grande. Néanmoins, les informations dont on dispose suggèrent que la Galaxie n'est pas différente à cet égard des autres galaxies spirales: la vitesse orbitale ne décroît pas comme elle devait le faire si l'essentiel de la masse galactique était concentré vers le centre. En admettant que notre galaxie constitue un système lié, sa masse totale doit être, de nouveau, plusieurs fois la masse de la matière lumineuse.

Résumons: dans la grande majorité des galaxies spirales, seuls systèmes dont on peut bien étudier la dynamique grâce à leur organisation en forme de structure aplatie tournant autour d'un axe de symétrie, la variation de la vitesse de rotation en fonction de la distance au centre ("la courbe de rotation", selon le jargon de la discipline) a un comportement caractéristique [3]. Près du centre, la vitesse de rota-

tion augmente régulièrement, pour atteindre, soit un plateau qui reste plus ou moins plat, soit jusqu'à un maximum provisoire, suivi un peu plus loin par le plateau ubiquiste.

La montée de la courbe de rotation, ainsi que l'éventuelle rechute provisoire, sont compatibles avec la quantité de matière lumineuse (estimée d'après la variation radiale de la luminosité) dans la partie centrale du disque de ces galaxies; le problème est de comprendre comment la courbe de rotation peut devenir et rester plate.

On peut, bien sûr, supposer que la matière dans ces régions n'est pas gravitationnellement liée, mais il faudrait alors expliquer pourquoi la matière galactique s'évade toujours à une vitesse qui dépend peu de sa distance du centre de la galaxie: cela impose des conditions assez particulières.

Selon une autre échappatoire, les étoiles assurent parfaitement la liaison gravitationnelle; cependant, à cause des poussières interstellaires, présentes dans toutes les galaxies spirales, nous sous-estimons la lumière intégrée et donc la masse des étoiles. Les avis sur l'importance de cet effet sont partagés.

Peut-on imaginer une force autre que la gravitation qui retiendrait les gaz des parties externes des galaxies en dépit de leur vitesse élevée? Les galaxies sont les sièges de champs magnétiques; si les bords des galaxies sont ionisés, un champ ancré à la partie centrale d'une galaxie pourrait entraîner la matière ionisée. Cependant, un tel entraînement crée une vitesse angulaire constante; pour que la vitesse linéaire soit constante, il faut introduire quelques phénomènes dissipatifs ... et donc des paramètres assez arbitraires. Mais ces champs magnétiques, sont-ils suffisamment importants et seraient-ils suffisamment stables sur une échelle de temps cosmologique? Et, de toute façon, aucun champ magnétique envisageable à grande échelle ne pourrait entraîner les étoiles, que nous savons maintenant se trouver aussi dans les parties plates de courbes de rotation.

Echapper à l'énigme en gardant la loi de Newton est difficile, et il est très tentant d'imaginer que les galaxies spirales contiennent beaucoup plus de matière que celle à laquelle contribuent les étoiles et les gaz lumineux: l'équation (2) impose alors que la masse sombre responsable de la liaison gravitationnelle croît linéairement avec la distance au centre. Comme, le plus souvent, la courbe de rotation reste presque plate jusqu'au dernier point de mesure, nous ne savons pas où se terminent ces structures, et en toute rigueur la détermination de leur masse d'après la vitesse orbitale de la matière aux extrémités n'est qu'une limite inférieure.

Cette "colle" gravitationnelle galactique, comment serait-elle organisée?

Au pays des WIMPs, des MACHOs et de la neige hydrogénique

Supposons, tout d'abord, qu'une matière "sombre" entoure chaque galaxie sous la forme d'un halo plus ou moins sphérique, constituant une sorte d'atmosphère galactique. Si sa densité varie en fonction inverse du carré du rayon, la masse à l'intérieur d'un rayon donné augmente linéairement avec le rayon, et à des distances suffisamment éloignées du centre, le halo sera le facteur dominant pour le bilan de forces. Bien sûr, une telle variation de densité ne peut pas être maintenue jusqu'au centre; il doit y avoir un fléchissement quelque part, ce qui permet alors d'expliquer toute courbe de rotation comme une superposition des contributions venant d'un disque et d'un halo, leurs importances relatives étant déterminées par des paramètres ajustés aux données, différents pour chaque galaxie. A remarquer aussi que la variation linéaire ne peut pas continuer indéfiniment vers l'extérieur, car les galaxies voisines se trouveraient en contact.

La présence d'un halo massif soulève deux problèmes fondamentaux.

D'une part, dans le voisinage du Soleil, les étoiles visibles rendent compte assez bien de la matière totale - la Nature s'est abstenue de cacher grand-chose dans notre environnement stellaire.

De même, peu de matière semble être "cachée" dans les structures appelées "amas globulaires", groupes stellaires de forme approximativement sphérique distribués dans un halo sphérique autour de notre galaxie. Etant relativement proches, leurs parties externes peuvent souvent être résolues en étoiles individuelles, et donc leurs masses peuvent être mesurées à l'aide des équations (4) et (5): les étoiles visibles rendent compte relativement bien de la masse de ces amas... en tout cas, il n'y a pas de déficit aussi flagrant que pour la Galaxie elle-même. Cela est très gênant, car les amas globulaires, structures très anciennes, balayent le halo, et a priori ils devraient être fortement "contaminés" par tout ce qui s'y trouve.

On peut bien évidemment inventer des raisons pour la "pureté" des amas globulaires et de notre environnement stellaire en dépit d'un halo de quelque nature qu'elle soit, mais cela revient à introduire des spéculations parfaitement *ad hoc*.

Enfin, il est très curieux de constater que le halo et le disque de tant de galaxies spirales se "débrouillent" pour que les courbes de rotation qui en résultent deviennent et restent presque plates; avec deux contributions a priori indépendantes, la production d'une courbe générale paraît étonnante. Ce procédé s'apparente à un "curve fitting" amélioré plutôt qu'à une explication en termes de physique de base; admettons-le toutefois pour voir où nous entraîne l'hypothèse d'un halo massif.

Un gaz de particules inconnues?

Un milieu gazeux en équilibre hydrostatique est une idée parfaitement plausible; l'énergie cinétique par unité de masse serait alors constante, comme il se doit selon l'équation (2). La température de ce milieu isotherme serait très élevée - entre 10⁴ et 10⁶ °K selon les éléments qui la composent - car la vitesse caractéristique des particules doit être du même ordre que la vitesse orbitale de la matière dans le disque, soit au moins 100 km/s pour que leur distribution soit sphéroïdale. Les éléments légers seraient entièrement ionisés; les éléments lourds garderaient leurs électrons internes. Un milieu aussi chaud entourant notre galaxie serait détectable, soit par les effets du plasma sur la propagation d'ondes radio provenant des sources extérieures, soit par une émission diffuse couvrant tout le ciel, dans une gamme spectrale allant de l'optique aux rayons X. Or, de tels phénomènes n'ont jamais été mis en évidence, ni chez nous, ni dans d'autres galaxies spirales; si les halos de galaxies spirales sont composés d'une matière gazeuse, elle ne peut pas être sous une forme qui interagit de façon significative avec le rayonnement électromagnétique... ce qui élimine tout élément usuel et toutes les particules massives connues.

En l'absence d'autres indications, mais à l'instar de Vulcan de triste mémoire, on donne aux particules fugitives du halo éventuel un nom, ou plus exactement le sigle américain WIMP qui veut dire "Weakly Interacting Massive Particle"; le nom est souvent rendu en français (l'Académie et le C.N.R.S. obligent) par "mauviette", ce qui traduit littéralement le mot, mais au prix de perdre entièrement le sens du sigle.

La télédétection de WIMPs semble exclue par leur nature même.

Par contre, si elles entourent notre galaxie, leur agitation thermique doit en amener quelques-unes vers nous de temps à autre, et on pourrait éventuellement les mettre en évidence à l'aide de détecteurs appropriés. Cependant, trouver une aiguille cachée dans une botte de foin est un jeu d'enfant par rapport aux problèmes expérimentaux soulevés par la recherche de WIMPs cosmiques, car au moins on sait que l'aiguille est là et comment elle est; les WIMPs, par contre, seraient différentes de toute particule connue, et elles pourraient ne pas exister car un halo galactique "wimpifié" n'est qu'une possibilité parmi d'autres pour expliquer les courbes de rotation galactiques.

Quoi qu'il en soit, une véritable industrie de détection de particules spéculatives se développe depuis quelques années: sans informations précises concernant la nature de la matière à détecter, la plupart des techniques se bornent à transformer l'énergie cinétique de particules massives

traversant l'appareil en énergie thermique, un changement caractéristique de température ou d'état physique étant la signature recherchée. On ne s'attend pas à obtenir un signal très fort: ces bolomètres sont donc fortement refroidis. Le rayonnement cosmique interfère évidemment avec de telles expériences, qui sont enfouies alors dans des cavernes profondes. Enfin, la radioactivité naturelle des matériaux et de l'environnement impose un bruit de fond inéliminable, mais un effet amusant constitue la signature des WIMPs, quelle que soit leur nature, et permettrait éventuellement de les distinguer du bruit local. Elles forment par hypothèse un nuage autour de la Galaxie, et donc le Soleil les rencontre à sa vitesse orbitale autour du centre galactique, soit à environ 200 km/s; comme la Terre tourne autour du Soleil à environ 30 km/s, le flux de WIMPs arrivant dans un détecteur terrestre aura un maximum quand les deux vitesses s'ajoutent, et un minimum quand elles se retranchent. Cette modulation caractéristique (quoique petite) constituerait la signature de particules venant du halo galactique... mais il faut admettre que nous sommes encore bien loin d'avoir observé ne serait-ce qu'un candidat, sans parler d'une modulation du flux.

Un ensemble de petites masses ordinaires?

Rien n'impose que le halo soit gazeux; son invisibilité pourrait s'expliquer par la présence d'objets macroscopiques, plus grands que des macromolécules (sinon leurs émissions optiques et radios auraient été observées), mais plus petits que les étoiles les plus petites car c'est précisément la lumière stellaire qui manque. On peut imaginer que le halo est rempli, par exemple, de planètes, ou d'étoiles "ratées" de masse bien inférieure à un dixième de la masse solaire - les fameuses "naines brunes" - ou de trous noirs. Sous cette forme, la matière est "ordinaire" et sa présence n'entraîne aucun changement de la physique fondamentale. Par contre, de sa banalité même surgit le problème épineux de savoir comment ces objets se seraient formés sans une foule d'étoiles normales: pour un halo chaud, on attend plutôt le contraire.

A défaut de précisions, et pour les distinguer des WIMPs, leurs partisans les appellent MACHOs, sigle qui n'a besoin d'aucune traduction et qui veut dire Macroscopic Compact Halo Objects. Mais leur détection n'est pas pour autant aisée: par construction (et contrairement à leur nom), ils sont éminemment discrets. Etant substellaires, ils ne sont pas sources d'énergie, mais comme ils ne baignent que dans le rayonnement du fond du ciel à 3 K, l'émission infrarouge d'un MACHO individuel en serait indiscernable. Et contrairement au cas des WIMPs, on ne souhaite pas observer l'arrivée d'un MACHO sur la Terre.

En fait, un MACHO pourrait, en principe, se trahir par son effet sur la lumière d'une source quasi ponctuelle située derrière lui. On sait que le trajet de rayons électromagnétiques qui passent dans le voisinage d'une masse est dévié par son champ gravitationnel, créant pour un observateur qui se trouve presque aligné avec la masse et la source une caustique, dont la brillance peut être bien supérieure à celle de la source [7]. Dans le cas d'un alignement parfait, la déviation angulaire provoquée par une masse M est donnée par :

$$\theta = \sqrt{4GM/c^2}(d_{sm} / d_{sm}d_{os}) \quad (8)$$

où d_{sm} , d_{om} et d_{os} sont respectivement la distance entre la source lumineuse et la masse M , la distance entre l'observateur et la masse, et la distance entre l'observateur et la source. Dans ce cas idéal, le "mirage" de la source lumineuse se présente sous la forme d'un anneau brillant centré sur la masse M ; on appelle ce phénomène une lentille gravitationnelle (à tort, soit dit en passant, car il ne s'agit pas d'une image localisée dans l'espace, mais d'une caustique), l'anneau étant populairement appelé "anneau d'Einstein".

Si l'alignement n'est pas parfait, la déviation angulaire de la lumière varie en plus comme $1/\sqrt{b}$ où b est le paramètre d'impact du rayon lumineux, et le "mirage" de la source, au lieu d'être un anneau complet, en est un fragment, un arc dont le rayon de courbure est néanmoins presque celui de l'anneau d'Einstein idéal.

La déviation étant proportionnelle à \sqrt{M} , elle est évidemment très petite pour des masses stellaires et substellaires, et on ne s'attend pas à résoudre pour ces cas la structure d'un anneau d'Einstein. Cependant, la présence de l'anneau se traduirait par une augmentation de la brillance de la "lentille" (plus exactement, "micro lentille"), ou, si la lentille n'est pas lumineuse, par celle de la source.

Imaginez que l'on mesure continuellement la brillance d'une étoile à l'extérieur de notre galaxie, par exemple dans une des galaxies très proches. Comme la matière dans le halo est forcément en mouvement, un MACHO (s'il y en a) va passer tôt ou tard entre nous et l'étoile en question: une caustique va alors balayer la Terre et la brillance apparente de l'étoile va augmenter graduellement, pour atteindre un maximum quand on se trouve au milieu de la caustique, la décroissance de brillance étant symétrique par rapport à la montée.

Le principe, exploré théoriquement par Bogdan Paczynski [11], est simple; la pratique l'est beaucoup moins. Comme, dans les meilleurs des cas, la probabilité d'un alignement fortuit pour une étoile donnée est faible, il faut suivre en permanence la brillance de plusieurs millions d'étoiles, afin d'observer une poignée d'exemples; heureusement le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie voisine, fournit un champ d'étoiles résolues très riche. Ensuite, il faut bien reconnaître que peu d'étoiles ne changent pas leur brillance au

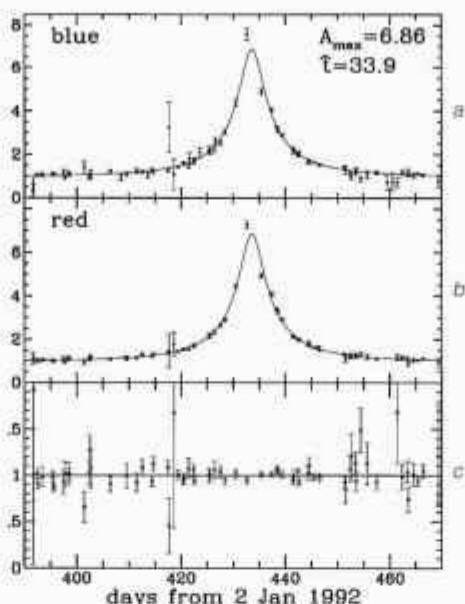


Figure 2 : Le meilleur candidat pour un MACHO, enregistré par la collaboration américano-australienne [1].

(a) et (b) : la fluctuation lumineuse, observée en lumière bleue et rouge respectivement; la courbe continue représente un ajustement aux données d'une courbe théorique symétrique, et on remarque la présence de points dont l'écart par rapport à la courbe est significatif. L'ensemble des points dans le pic ne constitue pas une fluctuation symétrique.

(c) : le rapport des fluctuations dans le bleu et dans le rouge (cliché C. Stubbs).

cours du temps: les étoiles variables de classes connues et de courte période sont faciles à éliminer, mais les éruptions aléatoires des étoiles constituent une source de "fausses alertes". Une vraie caustique porte sa propre signature: elle est parfaitement symétrique autour du maximum et, puisque la déflexion lumineuse d'un champ gravitationnel est indépendante de la fréquence, la caustique doit être identique à plusieurs fréquences. Cependant, cette signature n'est univoque que si les gammes spectrales sont suffisamment différentes pour que les processus radiatifs soient complètement différents.

Deux équipes ont annoncé récemment l'observation de candidats : une collaboration française ([4] voir aussi [10]), après avoir examiné environ 3 millions d'étoiles à l'aide de plaques photographiques, a publié deux candidats, et une collaboration américano-australienne [1] a publié un candidat après avoir examiné environ 2 millions d'étoiles à l'aide de détecteurs CCD. Les résultats de ce travail impressionnant illustrent la difficulté d'aboutir à une conclusion convaincante d'après ce type d'observation.

Admettons tout d'abord que les fluctuations de brillance observées sont bel et bien dues à un phénomène de micro lentille gravitationnelle. On ne peut pas pour autant se baser sur cette petite poignée de cas pour affirmer qu'il s'agit de MACHOs car on ne connaît ni la distance de la len-

tille ni sa vitesse ni sa masse. En fait, tout corps compact sur la ligne de visée pourrait en principe être responsable du phénomène. Or, le disque de la Galaxie contient des étoiles à neutrons et des naines blanches, petits objets de masse stellaire composée de matière à l'état dégénéré, de luminosité respectivement nulle ou faible; il y a sans doute aussi des corps substellaires, des "planètes" géantes et autres choses similaires. Avec trois candidats, il est impossible d'exclure la possibilité que ces caustiques ont été provoquées par des objets sans aucun rapport avec le halo; on voit difficilement comment le nombre de candidats pourrait augmenter suffisamment dans les années à venir pour effectuer une analyse statistique convenable. D'ailleurs, une équipe scrutant les étoiles vers le centre de notre galaxie a annoncé l'observation de quelques candidats micro lentilles dans le disque galactique [18] et [19]; en admettant cette interprétation des fluctuations lumineuses (interprétation, soit dit en passant, qui ne s'impose pas, car pour des raisons techniques les mesures sont incomplètes et les "garde-fous" manquent), il s'agirait vraisemblablement d'étoiles petites, faibles ... et tout à fait ordinaires. Certes, observer les caustiques de n'importe quel objet est intéressant en soi; mais si l'objet est près du disque galactique, on n'a bien sûr rien appris sur la constitution du halo ni d'ailleurs sur son existence, but principal de l'opération.

Puis, s'agit-il vraiment des signatures de micro lentilles? Globalement, les mesures ne montrent pas d'incompatibilité éliminatoire (la figure 2 montre le meilleur candidat trouvé jusqu'à présent); cependant, pour un oeil sceptique, elles sont compatibles aussi avec d'autres courbes, celle de la micro lentille n'étant pas nécessairement la meilleure. Les étoiles sont faibles car le Grand Nuage de Magellan est malgré tout loin; les incertitudes sont donc grandes, surtout dans le cas de mesures photométriques faites à l'aide de plaques photographiques. Aux deux longueurs d'onde choisies, le bleu et le rouge, les fluctuations se ressemblent beaucoup, mais cette partie de la signature ne constitue pas en fait une preuve irréfutable qu'il s'agit de micro lentilles. En effet, une différence de comportement dans ces deux bandes spectrales permet d'éliminer des candidats, mais leur similarité ne prouve rien, car si un processus thermique augmente la quantité d'énergie rayonnée par une étoile dans le continu spectral, les fluctuations observées dans le bleu et le rouge seront de toute façon identiques. Et, au juste, peut-on exclure les éruptions stellaires? Aucune des étoiles ne semble pas avoir changé de brillance plus d'une fois sur la durée des observations, mais cela ne prouve rien non plus : on connaît actuellement quelques centaines de sources astronomiques qui ne se sont manifestées qu'une seule fois. Ces sources émettent certes des rayons gamma [8], et sont vraisem-

(suite p. 18)

(suite de la p. 15)

blement extragalactiques, mais tant que l'on n'a pas compris leur fonctionnement, on ne peut pas être sûr que les "candidats MACHOs" ne représentent pas un phénomène analogue dans le domaine optique.

L'identification des MACHOs par un effet de micro lentille gravitationnelle me semble très marginale; c'est d'ailleurs la conclusion des auteurs des articles en question, contrairement aux annonces enthousiastes parues dans les média.

Un disque d'hydrogène très froid?

Revenons au point de départ.

Si les parties extérieures des galaxies spirales sont en équilibre, le plateau de la courbe de rotation semble exiger la présence d'une grande quantité de matière non-lumineuse. Cependant, en l'absence d'une preuve irréfutable, rien n'impose *a priori* que cette matière forme un halo; il est tout aussi plausible qu'elle soit confinée dans le disque. Pour saisir les avantages associés à ce changement de perspective, il suffit de remplacer la complexité d'une galaxie spirale par un disque d'épaisseur constante, avec une courbe de rotation plate partout; dans ce cas, la densité de la matière doit être une fonction inverse du rayon:

$$\rho \propto 1/r \quad (9)$$

L'énergie totale E d'un disque auto gravitant en rotation est donnée par:

$$E \propto \int r (\rho v^2 + \rho U) dr \quad (10)$$

$\propto \int d(rU)$ en tenant compte de (9) et de (1).

L'intégrand ne dépend plus de la structure du disque, d'où:

$$\delta E = 0 \quad (11)$$

et on conclut que l'énergie totale est un extremum; une analyse détaillée moins cavalière [12] montre que cet extremum est en réalité un minimum.

Il est peut-être significatif que la vitesse de rotation de la matière dans un disque est constante quand son énergie est minimum; seul un disque (plus exactement une structure axisymétrique) se comporte de cette façon. L'ubiquité de courbes de rotation plates des galaxies spirales serait-elle simplement un reflet de la loi générale que tout système mécanique cherche à minimiser son énergie totale? Limiter la matière "sombre" au disque expliquerait sans hypothèse supplémentaire pourquoi les amas globulaires, habitants du halo, en sont pratiquement dépourvus.

Cette idée intéressante entraîne un certain nombre de conséquences.

Les galaxies ne sont pas nécessairement nées dans l'état où on les observe aujourd'hui, et donc elles doivent pouvoir dissiper de l'énergie mécanique au cours de leur évolution pour arriver au minimum; un processus de frottement s'impose, dont la durée caractéristique doit être infé-

rieure à leur âge. Les collisions stellaires étant excessivement rares, le milieu responsable de la dissipation serait plutôt gazeux (pas de MACHOs), et de composition plutôt ordinaire car les particules doivent bien interagir les unes avec les autres (pas de WIMPs). Ensuite, pour éviter sa dispersion dans un halo, la matière doit être très froide; mais pour éviter sa condensation en étoiles (processus énergétiquement très favorable dans un milieu froid), la matière doit être organisée en nuages qui se dispersent par collisions mutuelles sur une échelle de temps plus petite que celle associée à la formation stellaire. Enfin, à l'heure actuelle, le phénomène doit être limité aux régions externes des galaxies spirales, et le milieu qui en est responsable doit être parfaitement transparent malgré sa masse élevée et sa composition ordinaire.

Ces conditions ne sont pas faciles à satisfaire simultanément. L'ubiquité cosmique de l'hydrogène suggère une solution amusante ([13] et [14]); les parties externes des galaxies, supposées soumises essentiellement au rayonnement du fond cosmologique à 3°K seulement, seraient le siège d'hydrogène moléculaire ou macromoléculaire, l'état le plus stable de l'hydrogène à des températures aussi faibles. L'émission thermique du milieu se confondrait alors avec le fond cosmologique (avec sans doute quelques fluctuations qui seraient indiscernables des fluctuations de l'Univers primitif enregistrées par le satellite COBE); pour accumuler une masse suffisante sans créer un écran opaque, son organisation spatiale serait fractale.

Si l'idée est alléchante vue de loin, elle n'est pas sans problèmes vue de près. Les processus physiques de base qui gèrent la dissipation énergétique tout en conservant le moment cinétique ne sont pas clairs, tandis que l'origine des structures fractales (très à la mode, soit dit en passant), qui interviennent ici un peu à la manière des épicycles de l'Antiquité "pour sauver les apparences", reste obscure, même si l'aspect de certains nuages interstellaires ne semble pas incompatible avec une géométrie fractale. Par ailleurs, l'hydrogène moléculaire à 3°K n'est pas plus facile à détecter que les constituants des halos massifs éventuels; on peut tout au plus chercher à mettre en évidence, à la frontière qui sépare l'hydrogène moléculaire de l'hydrogène atomique, l'émission de molécules comme le CO généralement associées à la présence d'hydrogène et dont les raies peuvent encore être excitées... mais sans oublier qu'il s'agit de régions exceptionnelles qui ne suivent pas nécessairement cette loi d'association établie dans d'autres contextes. Enfin, comme les courbes de rotation sont plates même dans les régions peuplées d'étoiles très chaudes et des gaz ionisés, il faudrait comprendre la persistance de l'hydrogène moléculaire dans ces endroits malgré les conditions thermiques assez défavorables.

Le problème des amas de galaxies

Entre les WIMPs, les MACHOs, et les nuages d'hydrogène moléculaire froid, entre les halos et les disques, il y a sûrement assez de degrés de liberté pour rendre compte de toutes les courbes de rotation des galaxies spirales... mais une partie seulement du problème de la matière sombre serait résolue pour autant.

Depuis quelques années, on sait que certains amas de galaxies sont atteints d'une maladie semblable, mais sous une forme plus grave. A l'analyse dynamique effectuée par Zwicky et ses successeurs, s'est jointe la méthode de lentille gravitationnelle qui s'affranchit de l'hypothèse selon laquelle les amas sont gravitationnellement liés; il s'agit, en effet, d'utiliser les trajets spatiaux de "particules témoins" — les photons en l'occurrence — visualisés par les caustiques optiques des galaxies très loin derrière les amas "lentilles", pour déterminer leur masse.

Les amas, avec leurs centaines de galaxies, sont très massifs, et on s'attend donc à pouvoir résoudre les anneaux d'Einstein; comme, en général, les alignements entre nous, les sources et les centres des amas sont rares, on observe le plus souvent des arcs; dans les cas où plusieurs galaxies lointaines se superposent sur un même amas, il est possible de trouver la distribution de la masse de celui-ci, car chaque arc se rapporte à un volume particulier [17].

Bien que la méthode ait déjà été suggérée par Zwicky comme moyen de déterminer la masse d'une galaxie, elle a pu être exploitée pour les amas seulement depuis une dizaine d'années, car il fallait d'abord confirmer que les "arcs" n'étaient pas des galaxies ordinaires proches déformées mécaniquement, mais constituaient de véritables "mirages" gravitationnels de sources lumineuses situées très loin derrière les amas.

A la suite de ce travail, une conclusion s'impose, apparemment sans équivoque: la matière lumineuse des galaxies ne contribue qu'environ pour un centième à la masse des amas. En plus, la matière "sombre" des amas semble être plus concentrée vers le barycentre que la distribution des galaxies elles-mêmes.

Mais les problèmes ne s'arrêtent pas aux amas de galaxies; l'étude de l'Univers dans son ensemble fournit d'autres indices de notre ignorance de son contenu matériel (ou de la physique fondamentale).

Quelques considérations cosmologiques

Plus personne aujourd'hui ne nie la réalité de l'expansion de l'Univers: le décalage vers le rouge des raies spectrales des galaxies en fonction de leur distance est caractérisée par une grandeur empirique, appelée "constante de Hubble", avec la dimension d'une fréquence. La valeur de

la constante de Hubble est déterminée pour un ensemble d'objets de décalages spectraux connus et dont les distances peuvent être déterminées de façon plus ou moins (généralement moins) directe; comme aucun témoin parfaitement fiable de distance extragalactique n'est connu, la valeur de la constante de Hubble est le sujet d'un débat qui dure depuis soixante ans environ, et ne semble pas s'estomper. Elle a diminué d'un facteur supérieur à 5 au cours de cette période, une diminution largement au-delà des incertitudes citées; aujourd'hui, la tendance est toujours à la baisse. Les valeurs soutenues par différents partisans sont contenues dans la gamme 50 - 100 km/s/Mpc, où le Mpc (le Megaparsec) est égal à environ 3×10^{19} km. Cette fourchette est un reflet de la dispersion des différentes techniques utilisées, dont les incertitudes individuelles statistiques sont beaucoup plus petites. L'inverse de la constante de Hubble est une mesure de l'âge de l'Univers; il n'est pas sans intérêt de noter que l'extrémité supérieure de la fourchette actuelle de la constante de Hubble correspond à un univers plus jeune que ses étoiles les plus anciennes.

La constante de Hubble est utilisée pour transformer le décalage spectral d'une galaxie lointaine en distance; elle intervient donc, approximativement linéairement, dans toute estimation dynamique de la masse d'un objet extragalactique.

Elle intervient aussi dans la détermination de la densité de l'Univers par une méthode complètement indépendante de toute supposition concernant la liaison gravitationnelle des structures cosmiques. Il s'agit des abondances de certains éléments légers dans l'Univers. En admettant l'interprétation de l'expansion de l'Univers en termes d'une origine cosmique à la mode du "Big Bang", une origine très chaude et très dense, les éléments ^2H , ^3He , ^4He et probablement ^7Li seraient formés pendant les premières mille secondes environ; cette période correspond essentiellement à la durée de vie des neutrons dont la présence est indispensable pour réaliser la nucléosynthèse. Les abondances de ces éléments par rapport à l'abondance de l'hydrogène dépendent de la densité de la matière au moment où l'abondance de chaque élément s'est figée; les processus ultérieurs (essentiellement la formation, la vie et la mort des étoiles) ont changé ces abondances de façon (en principe) calculable, et donc leurs valeurs actuelles constituent (en principe) un sondage de l'Univers primitif; en tenant compte de l'expansion cosmique, et donc de la valeur de la constante de Hubble, la densité à cette époque reculée peut conduire à la densité que l'Univers devrait avoir aujourd'hui et donc à son rapport masse/luminosité. Jusqu'à présent, se basant sur la densité de l'hélium dans quelques petites galaxies supposées être restées dans un état très primitif, et sur des mesures de la densité de deutérium dans le milieu interstellaire

(donc milieu proche et "contemporain") corrigées par ce que nous croyons savoir sur les effets modificateurs de l'évolution stellaire, et en tenant compte de la constante de Hubble, on admet une valeur caractéristique de quelques dizaines pour le rapport masse/luminosité de l'Univers; cependant, la fourchette d'erreur s'étend sur presque un ordre de grandeur. Or, une très grande barre d'erreur sur une valeur moyenne masque souvent un problème de fond. L'incertitude sur la constante de Hubble (qui intervient ici comme l'inverse du carré) est bien sûr responsable pour une partie importante de l'incertitude sur cette détermination du rapport masse/luminosité; mais contribue aussi le fait que le deutérium et l'hélium pris séparément conduisent à des résultats assez différents.

Rien ne vaut une mesure directe; l'hélium a certes pu être sondé dans des régions extragalactiques réputées peu évoluées, mais la faiblesse des raies de deutérium a limité son étude à la matière interstellaire locale, et donc à un milieu hautement modifié depuis sa formation. Mesurer cette abondance dans la matière intergalactique serait éminemment souhaitable, car elle constitue (en principe) un échantillon de matière beaucoup plus primitive ... mais ce travail nécessite le pouvoir collecteur de la nouvelle génération de télescopes géants qui sont en train d'être mis en service. Un aperçu des changements de perspective qui nous attendent vient d'être révélé par le tout nouveau télescope "Keck" dont le miroir principal est de dix mètres de diamètre [15]; dans un nuage intergalactique vraisemblablement très ancien "éclairé" par un objet encore plus lointain, le rapport de l'abondance de deutérium à l'hydrogène semble être beaucoup plus grand que la valeur correspondante obtenue en étudiant la matière locale. En fait, cette détermination est en meilleur accord avec l'abondance de l'hélium dans les galaxies primitives, et conduit au rapport masse/luminosité cosmique environ trois fois plus faible que la valeur "canonique" ... ce qui la rend à peine plus important que ce rapport pour toute la matière lumineuse. Affaire donc à suivre, car toute possibilité d'erreur n'a pas encore été écartée; mais affaire de la plus haute importance, car si les résultats sont justes, ils creusent encore plus l'écart entre ce que nous comprenons et ce que nous ne comprenons pas.

Enfin, si la version du Big Bang la plus à la mode, la cosmologie "inflationnaire" [5], ne relève pas uniquement d'un rêve philosophique, l'Univers doit avoir juste assez de matière pour arrêter son expansion (certes, dans un avenir infiniment lointain); cela correspond à environ mille fois plus de matière que celle qui est réellement observée.

Un pot-pourri de problèmes

Résumons. Toute méthode dynamique à peu près fiable (et celle des lentilles gra-

vitacionnelles s'assimile à une méthode dynamique très fiable) aboutit apparemment à la même conclusion: dans les ensembles stellaires suffisamment grands ou dans les groupes de galaxies, la matière lumineuse ne compte que pour une petite fraction de la masse totale.

Conventionnellement, l'excès de matière dans un conglomerat stellaire ou galactique est paramétré par le rapport de sa masse à sa luminosité, en unités solaires (en cgs, pour le Soleil, ce rapport est égal à environ 0.5). En tenant compte du mélange d'étoiles différentes dans le voisinage solaire, ce rapport serait d'environ 1.5 en l'absence de matière non-lumineuse, valeur comparable aux résultats des analyses autour du Soleil; il monte à 10 environ pour les galaxies spirales, et il est de quelques centaines dans les amas de galaxies.

Cependant, pour que la nucléosynthèse cosmologique produise les abondances actuelles des éléments légers, le rapport masse/luminosité doit être de quelques dizaines partout ... ou de quelques unités seulement si les résultats du télescope Keck sont justes.

D'autres sondages du contenu matériel de l'Univers sont moins fiables car les hypothèses sous-jacentes sont pratiquement invérifiables:

- Certaines galaxies sont entourées de "couronnes" de gaz émettant des rayons X. Il s'agit souvent de galaxies de forme elliptique qui n'ont pas de rotation évidente et dont la masse ne peut donc pas être déterminée comme celle des galaxies spirales; néanmoins, l'émission X de "couronnes" permet d'estimer à la fois la quantité de gaz très chaud et sa température, et donc d'estimer la masse totale de la galaxie d'après l'équation (3) ... en supposant que les couronnes sont liées gravitationnellement. Soulignons que nous avons encore moins de raisons d'admettre cette hypothèse que celle de la stabilité des amas de galaxies — nous ne savons même pas comment ces couronnes sont chauffées — mais si on l'admet, on conclut que ces galaxies doivent contenir, comme les galaxies spirales, un fort pourcentage de matière sombre.

- Certains groupes et amas de galaxies coexistent avec un gaz intergalactique très chaud, qui se manifeste, comme les couronnes des galaxies elliptiques, par une émission en rayons X; pour que ce gaz soit lié (mais en réalité aucune observation ne l'exige), il faut admettre un rapport masse/luminosité tout à fait comparable à celui qui est tiré de la dispersion des vitesses galactiques et de l'étude des "mirages" gravitationnels.

- Puis, une étude statistique des vitesses dans les petits groupes galactiques (galaxies binaires, par exemple) conduit aussi à une estimation de la masse, qui n'est pas incompatible avec les valeurs obtenues pour les galaxies individuelles, mais qui présuppose, bien sûr, que ces

systèmes sont gravitationnellement liés.
- Enfin, la cosmologie "inflatoire" impose un rapport masse/luminosité dans les environs de 1000.

Si l'hypothèse selon laquelle l'Univers est rempli d'un milieu ubiquiste sombre semble résumer les observations et les spéculations de façon éminemment économique, elle entraîne néanmoins un nombre impressionnant de suppositions ad hoc pour tenir compte de l'incohérence des résultats.

Tout d'abord, le déficit de matière lumineuse dans l'Univers serait différent pour différentes catégories de structures [16] :

La progression en fonction de l'échelle spatiale est frappante: rien (ou presque) ne manque dans le voisinage du Soleil ni dans les petits amas stellaires; la composante sombre est d'autant plus importante que l'échelle spatiale correspondante est grande. Voici un curieux retour au Cosmos géocentrique - les structures les plus grandes sont nécessairement aussi les plus éloignées. Est-ce un fait réel nécessitant une explication qui remonte à l'origine de la hiérarchie des structures, ou un sous-produit des lacunes de la connaissance concernant le comportement physique des objets les plus éloignés et donc les plus difficiles à observer et à comprendre?

La nucléosynthèse cosmologique, avec la gamme de valeurs de la constante de Hubble admise aujourd'hui (50-100 km/s/Mpc) et sans tenir compte des résultats du télescope Keck conduit à une plage de valeurs du rapport masse/luminosité compatible avec les valeurs associées aux galaxies individuelles, et donc compatible avec l'existence des MACHOs dans les halos ou de l'hydrogène moléculaire froid aux extrémités de disques galactiques. Or, il s'agit d'un processus à grande échelle par excellence et on s'attend donc à une convergence avec les valeurs trouvées pour les plus grands conglomerats de galaxies et (bien sûr) pour l'Univers tout entier; il n'en est rien, et la limite supérieure du rapport masse/luminosité trouvée d'après la nucléosynthèse cosmologique est plus petite que la limite inférieure trouvée pour les très grandes structures.

Si on admet la nouvelle valeur de l'abondance du deutérium, la situation devient encore plus critique: la quantité de la matière lumineuse et de la matière sondée par la nucléosynthèse cosmologique (maintenant confondues) seraient incompatibles avec tout sondage basé sur le mouvement des objets déjà à l'échelle d'une galaxie individuelle.

Pour contourner la nouvelle énigme qui surgit et dont on n'a nullement besoin, il faut, d'une part, se rappeler que la nucléosynthèse ne sonde en pratique que les conditions de la matière baryonique, et, d'autre part, admettre qu'une fraction importante de la matière "sombre" dans toute structure suffisamment grande est

Source de l'information

Rapport masse/luminosité

Environnement solaire	~1
Amas stellaires	~1
Galaxies individuelles	≥10
Petits groupes de galaxies	10-100
Amas et superamas de galaxies	100-300
Les structures les plus grandes	~700
La nucléosynthèse cosmologique (avant Keck)	10-70
La nucléosynthèse cosmologique (d'après Keck)	<<10
La cosmologie inflatoire	~1000

composée de particules massives non-baryoniques.

Les résultats du télescope Keck enlèveraient donc une des motivations principales qui incitent à entourer les galaxies avec l'hydrogène moléculaire froid; ils embrouilleraient par là même la situation des MACHOS, dont l'un des attraits principaux était justement la normalité.

Comme on fait son lit, on se couche; il faut, selon cette interprétation, que l'Univers grouille de particules que l'on n'a jamais rencontrées nulle part. Cela n'est point grave car les théories non-standard des particules élémentaires sont une source inépuisable de matière exotique: axions, particules SUSY, photinos, neutralinos, ... il y a presque un embarras de richesses (potentielles).

De tous les candidats, les neutrinos massifs feraient le moins d'entorses à la physique connue, car au moins on sait que les neutrinos existent, et leur masse n'a pas encore été suffisamment bien déterminée pour pouvoir exclure expérimentalement quelques eV/c^2 . valeur qui donnerait à ces particules un rôle dans le problème de la matière sombre cosmique. Avec des difficultés croissantes, on a pu poser une limite supérieure de $\sim 10 eV/c^2$, limite qui pourra être franchie au laboratoire seulement grâce à des miracles d'ingéniosité. Cependant, un certain espoir est entretenu depuis quelque temps par la recherche de neutrinos solaires: on enregistre entre 1/3 et 2/3 (selon l'expérience) du flux que prévoit la théorie solaire. Si le déficit est réel, et si les résultats discordants de différentes expériences ne sont pas un reflet de quelque erreur systématique, on pourrait être amené à admettre que les neutrinos changent de nature lors du passage du noyau solaire jusqu'à nous, devenant une variante à laquelle les appareils de la génération actuelle ne sont pas sensibles. Une telle "oscillation" indiquerait que les neutrinos ont, en effet, une masse, que la théorie standard des particules doit donc être modifiée ... et que, peut-être, on est proche d'une solution du problème de la matière sombre. Soulignons cependant l'écart qui sépare l'espoir de la preuve:

- la valeur du déficit de neutrinos dépend du modèle solaire auquel on adhère; connaît-on tous les paramètres d'une structure aussi complexe que le Soleil suffisamment bien pour justifier un changement dans la physique des particules?

-actuellement, le déficit diminue à mesure que les détecteurs et les analyses statistiques s'améliorent;

-il est rare qu'un détecteur soit aussi efficace que le croient ses réalisateurs, mais jusqu'à présent aucune expérience n'a été étalonnée avec de vrais neutrinos pour déterminer la performance réelle de l'équipement; il est peut-être significatif que tous les appareils enregistrent un déficit. Un étalonnage est prévu dans quelques mois pour un des détecteurs les plus récents; une autre affaire à suivre.

La matière sombre des galaxies serait-elle donc faite d'une variété de particules, et celle des grandes structures d'une autre? Si l'on introduit les WIMPs partout avec les mêmes proportions, où mettrait-on l'excès de la matière baryonique suggéré par la nucléosynthèse cosmologique ... à moins que sous la pression des nouveaux résultats sur l'abondance de deutérium cet excès ne s'évanouisse comme la rosée matinale? Mais, dans ce cas, la matière exotique entourerait les galaxies aussi, étant absente de leur intérieur profond; de quelque manière que l'on retourne le problème, il nous incombe d'expliquer une très curieuse ségrégation.

Nous pouvons supposer qu'aucune structure multi-galactique n'est gravitationnellement liée; il n'en reste pas moins que les "mirages" gravitationnels observés au sein des amas de galaxies témoignent (selon l'interprétation conventionnelle) de la présence de grandes concentrations de masse non-lumineuse bien au-delà de ce qu'imposent déjà les courbes de rotation plates des galaxies spirales.

Celles-ci demeurent d'ailleurs sans explication satisfaisante.

L'hypothèse de halos massifs entraîne le "hasard" curieux des halos et des disques dont les contributions se compensent (à quelques rares exceptions

près); d'ailleurs, les partisans de halos baryoniques (espèce maintenant menacée et peut-être en voie de disparition) doivent en plus expliquer la suppression de la production stellaire dans des conditions qui justement la favorisent.

Une grande quantité d'hydrogène moléculaire froid confiné dans un disque pourrait rendre compte de façon naturelle de l'ubiquité de courbes de rotation plates, à condition toutefois que cet état puisse survivre et rester invisible partout où les courbes de rotation sont plates, c'est-à-dire non seulement aux extrémités des galaxies, mais aussi dans les régions peuplées d'étoiles et de gaz chauds; de toute façon, cette solution ne peut pas s'appliquer aux galaxies elliptiques avec leurs halos très chauds, ni aux amas de galaxies noyées aussi dans des gaz très chauds (en supposant, bien sûr, que ces gaz sont réellement liés), ni enfin à ce qui manque au compte dans l'Univers entier (selon la cosmologie "inflatoire") car ce manque ne peut pas être baryonique. Et peut-être cette solution ne s'applique-t-elle nulle part, si les baryons de la matière lumineuse suffisent à rendre compte de la nucléosynthèse cosmologique.

Qu'il y ait un problème profond est certain; que la matière sombre en soit la solution ne me paraît pas évident, car elle constitue à présent moins une explication physique qu'une couverture qui masque un paramétrage "à gogo". Son identification reste problématique (sur le plan expérimental ainsi que théorique) et, ce qui est plus grave encore, aucune hypothèse cohérente quant à sa nature ne peut rendre compte de l'ensemble des observations.

En désespoir de cause, quelques solutions plus radicales ont été proposées.

- Une grande part du problème peut être imputée à la valeur de la constante de Hubble; si elle était de quelques fois plus petite que la limite inférieure actuellement admise (et donc bien au-delà de toute mesure effectuée), le rapport masse/luminosité déduit de la nucléosynthèse cos-

mologique pourrait grimper suffisamment pour rendre compte non seulement de la structure des amas de galaxies, mais peut-être même de toute très grande structure. Dans ce cas, la matière baryonique serait seule coupable de nos problèmes, et il ne resterait qu'à l'identifier, et à expliquer pourquoi dans différentes structures différentes proportions sont lumineuses. Une telle solution offre d'ailleurs d'autres avantages intéressants [6]; encore faut-il convaincre les partisans farouches des valeurs actuelles que la constante de Hubble doit être baissée autant.

- On peut aller encore plus loin, et modifier la loi de Newton en introduisant une nouvelle constante de la physique

$$g = \begin{cases} GM/r^2 & \text{si } GM/r^2 \gg g_0 \\ \sqrt{(GM/r^2)} g_0 & \text{si } GM/r^2 \ll g_0 \end{cases}$$

où g est l'accélération gravitationnelle habituelle de Newton pour une masse M , et où $g_0 = 10^{-8} \text{ cm/s}^2$ serait une accélération fondamentale. Avec cette loi, introduite depuis environ dix ans par Mordecai Milgrom [9], on peut, en effet, rendre compte de beaucoup d'observations sans introduire une matière invisible, mais le prix est élevé: la relativité générale, bien vérifiée jusqu'à preuve du contraire et qui se réduit à la loi de Newton dans la limite de champs très faibles, ne se réduit en aucune limite connue à la loi proposée.

Tout cela (ou une partie) se pourrait, bien sûr; rien n'interdit des dosages délicatement ajustés de particules exotiques et de particules ordinaires dans différentes structures à différentes échelles, avec une matière répartie adroitement entre différentes parties d'un même objet — l'homogénéité cosmique n'est après tout qu'une fiction racontée aux enfants. Il serait d'ailleurs étonnant que nous connaissions, dès à présent, toute la physique nécessaire pour bien comprendre tout l'Univers; les idées les plus folles ne sont peut-être pas encore assez folles pour être justes.

Quoiqu'il en soit, les articles affirmant

péremptoirement "au moins 90% de la matière dans l'Univers est invisible et sous une forme inconnue" se multiplient joyeusement: la situation rappelle cette légende latine qui figurait sur une des premières cartes des Indes publiée au début du XVII^e siècle: *Vera quae visa, quae non, veriora* - "ce que nous avons vu est vrai, et ce que nous n'avons pas vu est encore plus vrai". ■

L. M. Celnikier

Observatoire de Paris-Meudon

Références

- [1] Alcock C. et al., *Nature*, **365** (1993), 623.
- [2] Amram P. et al., *Astronomy and Astrophysics*, Suppl Series, **103** (1994), 5.
- [3] Ashman K. M., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **104**(1992), 1109.
- [4] Aubourg E. et al., *Nature*, **365** (1993), 623.
- [5] Celnikier L. M., *Bulletin de la Société Française de Physique*, juillet 1991, 11.
- [6] Harrison E., *Astrophysical Journal Letters*, **405** (1993), L1.
- [7] Hewett P. C., *Contemporary Physics*, **33** (1992), 81.
- [8] Kniffen D. A., *American Scientist*, **81** (1993), 342.
- [9] Milgrom M., *Astrophysical Journal*, **270** (1983), 365.
- [10] Milsztajn A., *Bulletin de la Société Française de Physique*, mars 1994.
- [11] Paczynski B., *Astrophysical Journal*, **304** (1986), 1.
- [12] Pfenniger D., *Astrophysical Journal*, **343** (1989), 142.
- [13] Pfenniger D., Combes F., Martinet L., 1993, prépublication de l'Observatoire de Paris, no. 93048.
- [14] Pfenniger D., Combes F., 1993, prépublication de l'Observatoire de Paris, no. 93048.
- [15] Songalia A., Cowie L. L., Hogan C. J., Rutgers M., *Nature*, **368** (1994), 599.
- [16] Trimble V., *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, **25** (1987), 425.
- [17] Tyson A., *Physics Today*, June 1992, 24.
- [18] Udalski A. et al., *Acta Astronomica*, **43** (1993), 289.
- [19] Udalski A. et al., communication soumise à *Astrophysical Journal Letters*, (1994).

Colloque "Beauté 94" au Mont-Saint-Michel

Du 24 au 29 avril, s'est tenu, au Mont-Saint-Michel, le deuxième colloque international sur la physique de la beauté auprès des machines hadroniques. Le but de ce colloque est d'approfondir le potentiel physique et les défis expérimentaux en relation avec la future génération d'expériences sur la physique de la beauté auprès des machines hadroniques. Après Prague l'an passé, le choix du Mont-Saint-Michel assurait la continuité dans le charme et la beauté! L'organisation matérielle du colloque reposait sur le DAPNIA (Département d'Astrophysique, Physique des Particules, Physique

Nucléaire, et Instrumentation associée), pour le comité local d'organisation et le secrétariat. Le Conseil Régional de Basse-Normandie, le Conseil Général de la Manche, l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et Physique des Particules) et diverses entreprises (Alimtronic, CAEN, et Wiener-France) ont apporté leur soutien financier. La Commune du Mont-Saint-Michel, par la mise à disposition de diverses facilités (dont la salle de conférence), les hôteliers locaux, les Monuments Historiques, et l'Action Culturelle Régionale ont assuré la qualité de l'environnement de cette semaine de travail en commun.

Une moisson de résultats Le top dans la récolte de CDF?

L'un des moments les plus intéressants de ce colloque a été la confrontation des résultats obtenus à Fermilab par les expériences CDF et D0 dans leur recherche du top. CDF observe un effet à 2.8 écarts standards pour un top de masse 174 GeV avec une section efficace de 13.9 pb, qui n'est pas en désaccord avec le résultat négatif de D0. La masse mesurée est en excellent accord avec la limite indirecte actuelle, et les prochains mois pourraient bien permettre de confirmer ou d'infirmer