

LA MATIERE NOIRE DANS L'UNIVERS

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE
CEA-Saclay

Festival d'Astronomie de Fleurance
Août 2004

Nous savons depuis peu que la matière qui brille ne représente que quelques millièmes de la matière que contient l'univers. Le reste, c'est-à-dire l'essentiel, est invisible pour les yeux. Et la situation se complique lorsque l'on s'intéresse à la matière « ordinaire », celle dont nous sommes faits et qui nous est accessible via les télescopes et détecteurs. Elle ne représente que 4% de la matière du cosmos. Les autres 96% sont indétectables et l'on n'en voit que les effets indirects. Qu'est-ce que cette matière noire? Ou se trouve-t-elle? Le débat est encore ouvert.

I – Compréhension de notre univers : les faits

L'univers connu

Pendant des siècles, notre connaissance de l'univers provenait des observations que pouvaient en faire les astronomes. Les objets célestes les plus proches sont les planètes de notre système solaire, dont certaines sont visibles à l'œil nu. Notre système solaire fait partie d'une galaxie de quelques 10 milliards d'étoiles appelée la Voie Lactée. Elle tient son nom de son aspect, semblable à un immense voile blanchâtre traversant le ciel nocturne, visible essentiellement depuis l'hémisphère austral. Au moyen d'instruments de plus en plus performants on peut découvrir que notre univers est peuplé d'un grand nombre de galaxies de toutes formes et de toutes tailles, certaines regroupées en amas pouvant en contenir jusqu'à plusieurs milliers. C'est ainsi que jusque dans les années 1920, à l'ère des observations dans le domaine de l'optique (autrement dit du visible), notre univers est considéré comme étant entièrement constitué d'étoiles entourées de vide.

Le poids de l'univers

Cette vision idyllique de notre univers change radicalement peu après.

Sans le savoir, en 1933, l'astronome Fritz Zwicky écrit la première page de ce qui ressemble par bien des points à une longue et passionnante enquête juridico scientifique. Cette sombre histoire commence dans l'amas de galaxies de Coma, l'un des plus grands amas connus.

En y mesurant la vitesse des galaxies et en utilisant les principes de la gravitation universelle élaborés par Newton quelques siècles auparavant, Zwicky conclut que l'amas de Coma serait en train de se désagréger à moins que sa masse ne soit bien plus importante que celle qui lui est attribuée par le simple comptage des galaxies : les galaxies ont en effet des vitesses outrageusement élevées, et devraient autrement s'échapper de l'amas. Pour maintenir la cohésion de l'amas, sa masse totale devrait être au moins 10 fois supérieure à celles des galaxies le constituant. Où sont cachés les 90% non visibles de la masse? Une plainte contre X est déposée, qui faute de preuve n'aboutit pas.

Plus de quarante ans s'écourent sans que la communauté astronomique ne prenne l'affaire très au sérieux. Pourtant, dans la fin des années 70, de nouveaux plaignants apparaissent, motivés par de nouvelles observations : des études portant sur les vitesses de rotation des galaxies spirales relancent le débat, et l'instruction reprend.

En quoi les vitesses de rotation des galaxies ont-elles un rapport avec leur masse ? Prenons l'exemple des planètes de notre système solaire. La majorité de la masse étant concentrée au niveau du soleil, au centre du système, la vitesse orbitale de la terre par exemple, à 150 millions de kilomètres du soleil, est bien plus importante que celle de saturne, située 10 fois plus loin mais mettant 30 fois plus de temps à boucler son orbite. Ainsi, lorsque Vera Rubin et Kent Ford annoncent que les régions externes de toutes les galaxies qu'ils ont analysées tournent à la même vitesse que les régions plus centrales, autrement dit que les courbes de la vitesse de rotation en fonction de la distance au cœur de la galaxie sont plates, la conclusion est de nouveau sans appel : les galaxies spirales sont enfouies dans un épais halo de matière invisible, dont la masse serait de l'ordre de 10 fois supérieure à celle de la composante visible de la galaxie. La Voie Lactée ne fait pas exception.

Toutes les échelles astronomiques sont touchées. Une autre charge tout aussi accablante vient encore s'ajouter au cas des amas de galaxies. Ceux-

ci agissent en effet comme une loupe gravitationnelle et déforment les galaxies en arrière-plan selon un schéma établi par la relativité générale d'Einstein, qui permet alors de remonter au facteur d'amplification de cette loupe, c'est-à-dire à la masse de l'amas. Dans tous les cas de lentilles gravitationnelles qui ont été étudiés (c'est ainsi que l'on nomme les déformations observées), la masse de l'amas doit être de 10 à 100 fois plus importante que la simple somme des masses des galaxies le constituant. Il faut se rendre à l'évidence et faire preuve d'humilité. L'univers visible, celui qui est directement accessible par la lumière qu'il émet à différentes longueurs d'onde, ne suffit pas à expliquer les effets dynamiques que nous observons. Contrairement à toute attente, nous découvrons que notre connaissance de l'univers se réduit à quelques pourcents seulement, et que nous vivons dans un univers pour la majeure partie invisible.

De la matière noire ? Comment ça ?

Notre univers semblerait donc rempli de matière noire. L'enquête se poursuit, les efforts portant à présent sur les progrès de la cosmologie et de la physique des particules. Cependant, alors que les mesures se précisent, la situation ne fait qu'empirer.

Le modèle standard du Big-Bang prédit que la densité de matière ordinaire (sous forme de protons et de neutrons) présente dans l'univers est environ 4 fois plus importante que celle comptabilisée par les astronomes en observant dans diverses longueurs d'onde. En conclusion de quoi, il existe donc de la matière ordinaire non encore détectée, que l'on nomme « **matière noire baryonique** ». Les astronomes se précipitent pour identifier toute une collection d'astres de tailles diverses ou autres suspects pouvant contribuer. Il pourrait s'agir de gaz diffus intergalactique, ou de planètes dont les masses peuvent être comprises typiquement entre dix millions de fois moins que celle du soleil (soit semblables à Mercure) jusqu'à un millième de celle du soleil (donc semblables à Jupiter). Il pourrait également s'agir d'étoiles de faibles masses (typiquement inférieures à la moitié de la masse du soleil) portant les noms poétiques de naines brunes ou naines rouges, trop légères pour amorcer les réactions nucléaires qui leur permettraient de briller, ou d'étoiles en fin de vie ayant consommé tout leur combustible, telles les naines blanches, les étoiles à neutrons ou les trous noirs. Comment confondre de tels objets ? Tous ces candidats potentiels non lumineux ne sont détectables que par l'intermédiaire de leur influence gravitationnelle. Les détecter est précisément l'objet de l'enquête menée par l'expérience EROS et présentée dans la deuxième partie de ce document.

Toutefois, l'écart observationnel entre matière visible et matière noire est plus proche d'un facteur 10 à 100 que du facteur 4 mentionné dans le paragraphe précédent. Il faut donc invoquer également un autre constituant à la matière noire. Nous voici non plus avec un coupable, mais au moins 2 ! Ce dernier, ne pouvant être composé de neutrons et de protons sans violer le modèle du Big-Bang confirmé à maintes reprises par ailleurs, est nommé « **matière noire exotique** ». De nombreux suspects sont placés en garde-à-vue, à commencer par les insaisissables neutrinos dont on a découvert récemment qu'ils avaient une masse. L'espoir n'est que de courte durée : bien que les neutrinos figurent parmi les éléments les plus représentés dans l'univers (on en dénombre environ 350 par centimètre cube, toutes espèces confondues), leur masse n'est pas suffisante pour expliquer l'ensemble de la matière noire. Le dossier Matière Noire prend la forme d'un fourre-tout assez pratique où règne une certaine confusion, alimentée par les élucubrations les folles des théoriciens les plus inventifs. L'essentiel des candidats est constitué de particules hypothétiques jamais encore observées, ni en laboratoire, ni dans des expériences consacrées à leur détection. Après des plus grands accélérateurs du monde, tel le LEP au CERN (Genève) bientôt remplacé par le futur LHC, les physiciens se penchent sur la question, tentant de produire l'espace d'un instant ces particules qui permettraient enfin de donner une suite favorable à ce dossier épineux. Les contraintes observationnelles actuelles sont encore insuffisantes, il faut attendre patiemment le démarrage du LHC prévu pour 2007.

Vers les années 1990, le mystère vieux déjà de 60 ans n'a guère évolué dans le bon sens. La fraction connue de l'univers s'est réduite à quelques pourcents, la matière ordinaire (même sombre) constituant moins du quart de la masse manquante, tandis que la majeure partie est sous une forme totalement inconnue.

Coup d'état de 1998

Ce n'est plus un mystère pour personne, le modèle standard du Big-Bang impose à notre univers un début extrêmement dense et chaud suivi d'une expansion ralentie au fil du temps par l'attraction gravitationnelle des objets qui le constituent. Einstein avait osé introduire dans ses équations une **constante cosmologique** qui contrecarrait l'effet de la gravité et permettait un univers statique. Néanmoins, dès les premières observations confirmant l'expansion de l'univers, le grand physicien s'est rétracté déclarant qu'il avait commis là « la plus grande bourde de sa vie ». De

nouvelles observations remettent cependant tout en cause une fois de plus.

En 1998, des études portant sur des explosions d'étoiles, les supernovae, montrent que ces objets sont plus loin que prévu, ou que les photons provenant de l'explosion se sont propagés plus longtemps dans l'univers que prédit selon le schéma classique d'expansion, nécessitant ainsi un taux d'expansion plus lent par le passé et une phase récente d'accélération, à l'opposé du ralentissement attendu ! C'est le retour de la fameuse constante cosmologique, autrement appelée « **énergie noire** » puisqu'il s'agit d'une énergie inconnue, non identifiée et ne répondant pas aux critères connus puisqu'elle présente les apparences d'une gravité répulsive. C'est un coup dur pour les physiciens, qui voient leur compréhension de l'univers réduite à une peau de chagrin. Si l'on en croit ce dernier rebondissement de l'affaire, la matière même ne constituerait qu'un tiers de l'univers, tout le reste étant sous une nouvelle forme totalement inconnue à ce jour.

Ce nouveau pan de l'histoire mérite quelques détails supplémentaires, que je présenterai dans la dernière partie de ce document.

En quête de la vérité sur la constitution de notre Univers, ajoutant année après année de nouvelles pièces à l'échafaudage devenu fort bancal, ne serions-nous pas en train de reproduire à l'échelle de l'Univers la perception de Ptolémée qui, pour décrire le mouvement des planètes par un ensemble de sphères concentriques centrées sur la terre supposée fixe, se trouva contraint d'introduire jusqu'à une vingtaine d'épicycles (petits cercles supplémentaires dont les centres eux-mêmes étaient en mouvement circulaire) afin de corriger les trajectoires? La vérité est-elle vraiment si confuse? Physiciens expérimentateurs et théoriciens travaillent d'arrache-pied afin d'apporter un éclairage nouveau à cette sombre énigme et tenter enfin de l'élucider.

II – Approches expérimentales

La matière noire ordinaire et l'expérience EROS

EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) prend ses données depuis un télescope placé sur les hauteurs de la cordillère des Andes, au Nord du Chili. La raison en est simple : le site est aride, sans pluie, à

l'atmosphère stable et propre, loin de toute pollution lumineuse la ville la plus proche étant située à une centaine de kilomètres de là. Toutes les conditions sont réunies pour permettre de bonnes observations astronomiques toute l'année durant. Le télescope est équipé des deux plus grandes caméras CCD au monde lors de leur mise en service en 1996, chacune comportant 32 millions de pixels.

Le principe de détection est fondé sur une idée proposée avec scepticisme par Einstein en 1936 et reprise 50 ans plus tard par l'astronome polonais Bohdan Paczynski : l'effet de microlentille gravitationnelle. Un corps massif infléchit les rayons lumineux des étoiles situées en arrière plan, pouvant conduire, dans le cas d'un alignement suffisamment précis, à une amplification de la lumière de l'étoile. Appliquée à des étoiles des nuages de Magellan, petites galaxies satellites en périphérie du halo de notre propre galaxie, la manifestation d'un tel phénomène devrait permettre de confondre les corps massifs sombres gravitant autour de la Voix Lactée. Malheureusement, sa fréquence est si faible qu'il faut mesurer nuit après nuit l'intensité lumineuse de plusieurs millions d'étoiles pour espérer déceler par cette technique quelques naines brunes.

En 1990, l'excitation est à son comble quand les enquêteurs mettent enfin la main sur les premiers suspects ! L'équipe concurrente américaine est dans la même situation, avec également quelques événements compatibles avec l'effet recherché. À en croire ces premiers résultats, la moitié du halo sombre pourrait ainsi être expliquée par la présence d'astres non lumineux de masses égales à la moitié environ de celle du soleil. Mais il s'avère peu à peu que les candidats ne survivent pas à une investigation plus poussée. Certains se révèlent être une étoile variable, d'autres, bien que clairement identifiables à un événement de microlentille, sont causés par des astres faiblement lumineux du disque même de notre galaxie et non du halo, et ne contribuent donc nullement à la masse du toujours aussi mystérieux halo sombre. En 2004, les contraintes sont telles que moins de 15% de la masse manquante de notre galaxie peut encore être éventuellement expliquée par des astres de faible masse, naines brunes, naines rouges ou naines blanches. Les principaux suspects sont blanchis, mais le véritable responsable n'a toujours pas été appréhendé.

L'énergie noire et l'expérience SNLS

La quête d'un site idéal pour des données astronomiques nous conduit cette fois à Hawaï, sur le Mauna Kea, à 4205 m d'altitude. C'est là que se

trouve, à l'aube du XXI^e siècle, la plus grande mosaïque CCD au monde avec ses 320 millions de pixels.

L'objet de la procédure est ici de déterminer le contenu énergétique de l'univers à partir de l'étude de supernovae, des explosions d'étoiles dans des conditions extrêmement contraintes de sorte que la luminosité de ces objets est connue avec précision. Ainsi, à partir de la lumière mesurée par l'astronome, il est possible de déduire la distance à la supernova. Ces explosions conduisent à des luminosités telles que lors du maximum d'intensité, ces supernovae peuvent être aussi lumineuses que la galaxie que les héberge ! Avantage : elles sont ainsi détectables jusque dans les galaxies les plus lointaines de notre univers. Or en raison de la vitesse de propagation finie de la lumière, regarder loin dans l'espace c'est aussi regarder loin dans le temps. Les supernovae constituent donc un outil puissant pour retracer l'histoire de notre univers.

Le principal intéressé par cette investigation est l'expérience SNLS (SuperNova Legacy Survey). Les supernovae décrites ci-dessus ne se produisant qu'une fois par siècle et par galaxie environ, SNLS observe toutes les 3 nuits près de 200000 galaxies afin d'y déceler, par comparaison entre les images de la nuit et des images antérieures de la même région du ciel, l'apparition d'éventuelles explosions d'étoiles. En conduisant cette étude sur 5 années consécutives, les enquêteurs espèrent interroger environ 700 supernovae pour en tirer des conclusions sur le contenu de l'univers au travers des âges et confirmer l'époustouflante nouvelle à laquelle ont abouti les premières enquêtes sur ces objets, en 1998 : les supernovae lointaines paraissent beaucoup plus faibles que ne le prédit le modèle du big-bang considéré jusqu'alors, ce qui s'interprète par une expansion de l'univers en **accélération** et non en décélération ! Ce résultat si bouleversant mérite confirmation par une étude plus fine, et c'est ce à quoi SNLS s'est engagé.

Conclusion

Été 2004. Le dossier « Matière Noire » est l'un des plus touffus du monde de l'astronomie, le mystère qui l'entoure l'un des plus tenaces. Bientôt un siècle entier se sera écoulé depuis les premiers indices, et loin d'avancer, l'enquête plonge dans une complexité toujours croissante. N'aurions-nous perçu que la pointe immergée de l'iceberg, après des millénaires d'observation de notre univers ?