

L'énigme de la Matière Noire

Gabriel CHARDIN, CSNSM, Université d'Orsay et CNRS/IN2P3

Feriez-vous confiance à un intendant qui ne serait capable de suivre à la trace qu'un pour cent de vos possessions ? Non, sans aucun doute. Les physiciens, quant à eux, se trouvent quelque peu dans la situation inconfortable de cet intendant. En effet, moins d'un pour-cent de la densité de l'Univers est attribuable aux étoiles, principaux objets visibles de notre Univers, et même si les physiciens ont retrouvé la trace d'environ trois autres pour-cent de la masse de l'Univers (en détectant les gaz errant dans les amas de galaxies en attente de formation d'étoiles), le mystère reste pratiquement entier pour les 96 autres pour-cent. Plus les observations se sont précisées ces dernières années, plus l'importance de la matière noire est devenue essentielle.

Premières observations

La question de la matière noire a été soulevée par le génial astronome américain Fritz Zwicky. En 1933, il observe des groupes de galaxies dans l'amas de Coma et dans celui de la Vierge et remarque que les vitesses des galaxies semblent beaucoup trop grandes pour que ces dernières puissent rester piégées ensemble sous l'action de leur attraction gravitationnelle. Après avoir estimé la masse visible des galaxies à partir de la quantité de lumière qu'elles émettent, il arrive à la conclusion stupéfiante qu'il existe environ cent fois plus de matière sous forme invisible que sous forme visible dans ces amas de galaxies.

Soixante-dix ans plus tard, cette observation tient toujours et c'est sans doute en raison du caractère difficile de Zwicky, pourtant à l'origine de découvertes aussi diverses que les galaxies naines, la prédiction de l'existence des quasars, des étoiles à neutrons, ou encore des supernovae, que la question restera oubliée pendant si longtemps.

Il faut dire par ailleurs que les mesures de Zwicky ne concernaient que moins d'une dizaine de galaxies et que, pour étrange qu'elle soit, la matière noire dans un amas particulier de galaxies ne semblait pas un problème fondamental à l'époque de la découverte de l'expansion de l'Univers et de la mesure de sa vitesse d'expansion, alors en pleine discussion. Néanmoins, la découverte de Zwicky apparaît aujourd'hui comme l'une des plus profondes intuitions de la physique contemporaine.

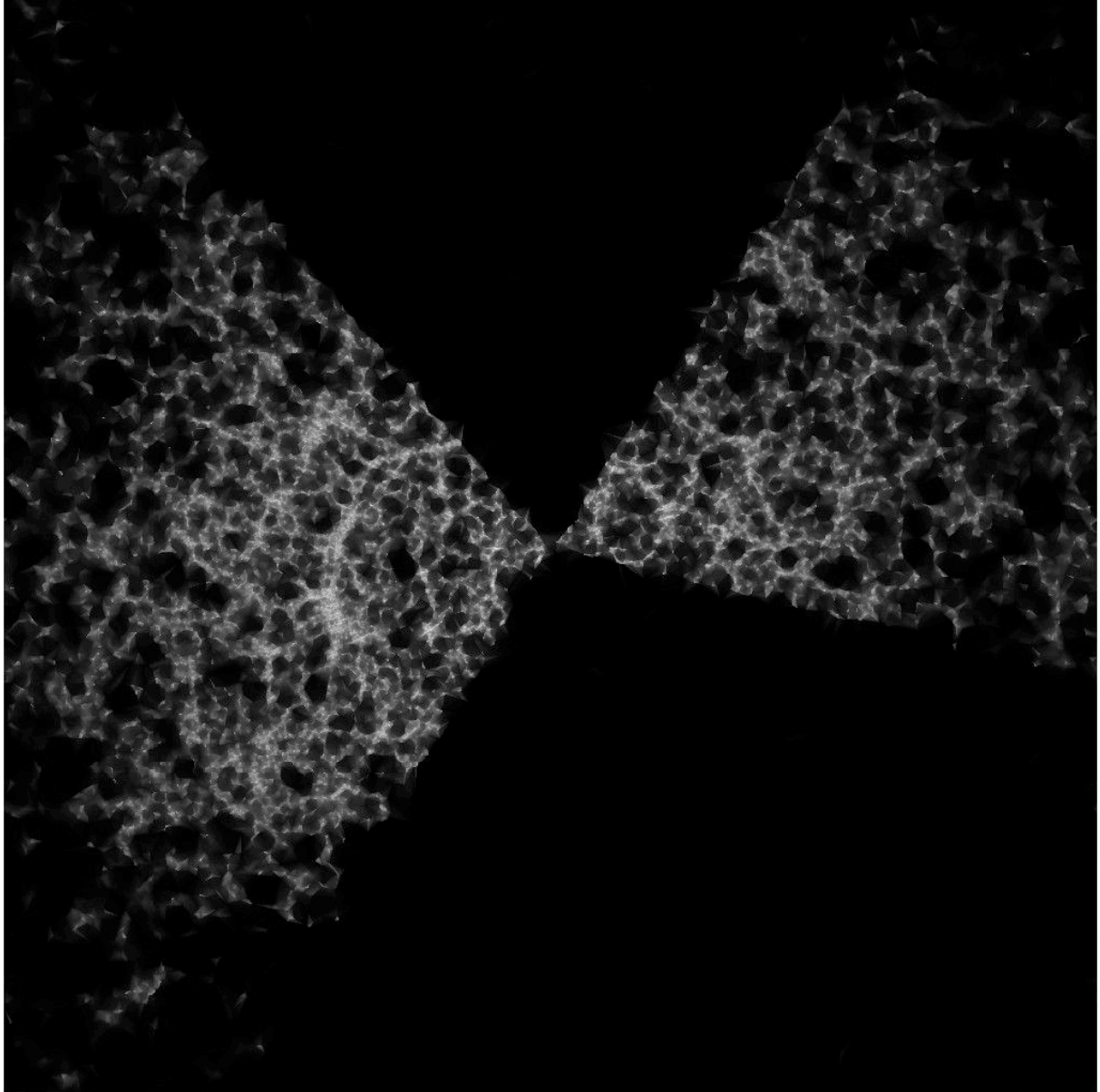


Figure 1 : Le programme d'observation de galaxies Sloane Digital Sky Survey (SDSS) a montré de façon frappante la structure en filaments, murs et vides de la matière dans l'Univers. Les simulations sur ordinateur, dont la précision s'est considérablement accrue ces dernières années, ne parviennent pas à reproduire cette structure sans rajouter environ 20 fois plus de Matière Noire et d'Energie Noire que de matière ordinaire.

Courbes de rotation galactique

Il faudra attendre près de 40 ans, et le début des années 1970, pour que des astrophysiciens tels que Vera Rubin, James Peebles et Ken Freeman finissent néanmoins par remettre la question de la matière noire sous les feux de l'actualité. Reprenant la méthode inventée par Zwicky, ils comparent cette fois la quantité de matière visible dans les bras des galaxies

spirales, comme notre Voie Lactée, à celle qui est nécessaire à expliquer leur vitesse de rotation.

A la grande surprise des astrophysiciens qui effectuent ces premières mesures sur les bras de galaxies, la vitesse de rotation ne diminue pratiquement pas quand on s'éloigne du cœur, mais reste pratiquement constante. Si la matière était concentrée dans la partie visible, la vitesse de rotation dans les bras de la galaxie devrait décroître avec la distance, comme le fait la vitesse d'un satellite lorsqu'on augmente le rayon de son orbite.

Cela signifie qu'une grande partie de la masse de la galaxie se situe bien au-delà de la matière visible présente au centre de la galaxie.

Sur un nombre de plus en plus grand de galaxies, les mesures qui s'accumulent démontrent que le problème est général et que la masse des galaxies s'étend très au-delà de la masse qui est visible sous forme d'étoiles, rassemblées au centre des galaxies : les galaxies semblent entourées d'un énorme « halo » de matière noire, laquelle serait plus de dix fois plus massive que la matière visible abritée par les galaxies.

Cependant, les mesures sont, à cette époque, encore trop fragmentaires et entachées d'incertitudes pour que le problème soit considéré comme vraiment fondamental. Après tout, peut-être la majeure partie des galaxies étudiées contient-elle beaucoup de matière ordinaire sous une forme non détectable par les télescopes ? Trous noirs, gaz ténu sous forme atomique ou moléculaire, étoiles avortées, les possibilités ne manquent pas pour tenter d'expliquer la matière noire.

Lentilles gravitationnelles

Afin de mesurer la masse totale présente dans galaxies et amas de galaxies, les physiciens mettent alors en œuvre une nouvelle méthode ingénieuse. Il s'agit d'utiliser l'effet de lentille provoqué par un corps céleste massif et prédit par la théorie de la Relativité d'Einstein : si un objet massif non lumineux mais transparent vient s'intercaler entre nous et un objet visible, comme une galaxie ou des étoiles, en arrière-plan, l'objet visible aura une image déformée.

Les nombreuses mesures de déformations d'images d'objets célestes réalisées depuis une vingtaine d'années ont permis là aussi d'accumuler les données. Certaines déformations sont spectaculaires, comme les multiples images de la galaxie « Anneau de fumée » dont la couleur gris-bleutée et la forme sont aisément reconnaissables. La quantité de matière noire présente autour de l'amas de galaxies de premier plan est si importante qu'elle conduit à un effet de lentille extrêmement fort, qui déforme l'apparence de la galaxie « Anneau de fumée »

en arrière-plan : on peut voir plusieurs images de cette galaxie réparties autour de l'amas qui constitue la lentille.

Le grand nombre de mesures effectuées à partir de très nombreux amas de galaxies permet de confirmer qu'une très large part (plus de 90% en moyenne) de la masse des galaxies et des amas de galaxies est présente sous forme non lumineuse.

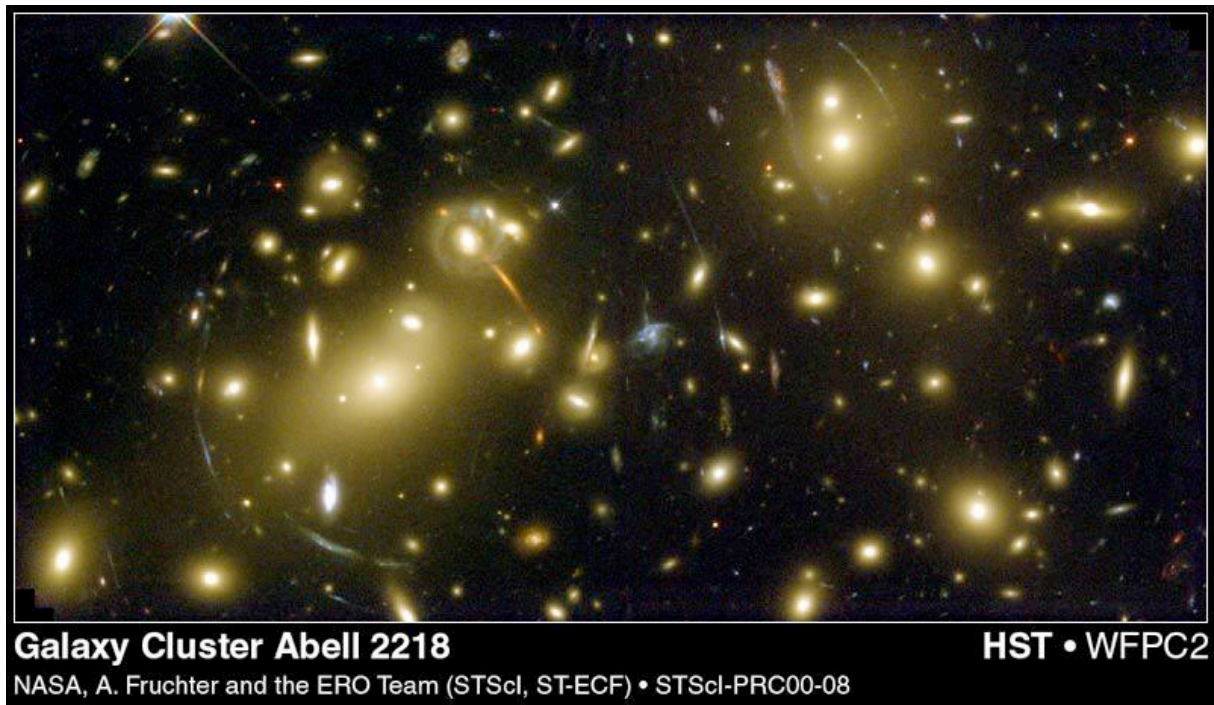


Figure 2 : L'ensemble de galaxies très brillantes, au premier plan, est entouré d'une grande quantité de matière noire. Afin de mesurer l'ensemble de la matière contenue dans cet amas (Abell 2218) de galaxies, les observateurs ont utilisé les effets de lentille gravitationnelle sur les galaxies qui se situent en arrière-plan. Dans cette situation, la quantité de matière totale est tellement grande que l'on observe plusieurs images très déformées, sous formes d'arcs de cercle, de galaxies d'arrière-plan.

Dans notre galaxie

On a cru quelque temps que les naines brunes, des étoiles qui, comme Jupiter, sont trop peu massives pour avoir réussi à démarrer la réaction de fusion thermonucléaire qui donne aux étoiles leur éclat, pouvaient être la clé de l'énigme. Ces étoiles ont une luminosité tellement faible que, même proches de nous, elles échappent à nos télescopes. Comment parvenir alors à détecter ces naines brunes malgré leur très faible luminosité ?

Afin de déterminer si la matière noire de notre galaxie est constituée d'étoiles avortées ou de trous noirs, très peu lumineux, le physicien polonais Bohdan Paczynski eut l'idée d'utiliser l'effet de microlentille provoqué par un corps céleste massif : si une étoile sombre vient s'intercaler entre nous et une étoile visible en arrière-plan, cette dernière verra son rayonnement amplifié lors du croisement.

À la différence des lentilles dont nous avons vu qu'elles déforment les images de galaxies, c'est la luminosité de l'étoile que l'on voit augmenter, car l'étoile nous apparaît trop petite pour que nous puissions observer la déformation de son image.

Comme la probabilité qu'une étoile naine brune intercepte une étoile visible est très faible, il faut observer plusieurs millions d'étoiles, par exemple dans les nuages de Magellan, satellites de la Voie Lactée, afin de pouvoir observer quelques naines brunes de cette façon indirecte.

À quelques dizaines de milliers d'années-lumière de nous, ces deux galaxies naines offrent en effet des millions d'étoiles, toutes situées à peu près à la même distance, au-delà de la majeure partie de la matière noire de notre galaxie. Au début des années 1990, se met donc en place un ambitieux programme de détection d'étoiles de faible masse par effet de microlentille.

Après des premières annonces retentissantes en 1993, l'expérience française EROS au Chili, plus précise que sa concurrente américaine MACHO en Australie, est parvenue finalement à la conclusion, après dix ans d'observations de plusieurs dizaines de millions d'étoiles, que les étoiles sombres ne peuvent, au plus, représenter qu'une dizaine de pour-cent du « halo » de matière noire de notre galaxie. En effet, seules quelques amplifications de luminosité d'étoiles ont été observées alors que des dizaines d'amplifications étaient attendues si les naines brunes constituaient la majeure partie de la matière noire galactique.

Une matière peu ordinaire

Les naines brunes ne suffisent donc pas à expliquer la matière noire. Est-il possible malgré tout que cette matière noire soit constituée de matière ordinaire, même si ce n'est pas sous la forme d'étoiles brunes ? Peut-être existe-t-il d'autres types de matière ordinaire qui pourraient expliquer la matière noire, tel le gaz présent dans les galaxies, difficile à détecter.

Cependant si, à l'extrême rigueur, la matière noire des galaxies que nous pouvons observer avec précision peut être constituée de gaz, cette possibilité n'est toutefois pas envisageable à l'échelle des amas de galaxies. En effet, la matière noire dans les amas représente 30 % environ de la densité de l'Univers, ce qui est près de 50 fois supérieur à la matière visible dans les étoiles. Avec une telle quantité de matière noire sous forme de gaz, il est impossible de mettre en accord les simulations de structures avec les observations. Il est impossible

également de rendre compatible cette quantité de matière avec la proportion d'éléments chimiques – essentiellement de l'hélium, un peu de deutérium et une pincée de lithium – qui ont été produits au cours des premières minutes de la naissance de l'Univers. Et le diagnostic est accablant pour la matière ordinaire : elle ne représente que 4 % de la densité totale de l'Univers. Ainsi donc, la matière noire est en majeure partie de la matière extra-ordinaire, très différente de celle qui nous compose.

Peser l'univers

L'une des méthodes les plus précises permettant aujourd'hui de mesurer la densité totale de matière dans l'Univers consiste à observer la fournaise qu'était le ciel lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans environ. Comment cela est-il possible alors que l'âge de l'Univers est aujourd'hui de plus de dix milliards d'années ?

En fait, l'Univers est suffisamment transparent et peu dense aujourd'hui pour que nous puissions observer l'aspect du ciel à des milliards d'années-lumière de distance, ce qui permet de remonter jusqu'à l'époque où la température de l'Univers (vers 3700 kelvins) en fait un plasma opaque, tel la surface d'une étoile. A cette époque, il n'existait pratiquement plus d'électrons ni de protons libres, lesquels diffusaient la lumière et l'empêchaient de se propager en ligne droite

Les observations du ciel, notamment par le satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) au cours de ces trois dernières années, ont donné lieu à des mesures des « grumeaux » de l'Univers à l'âge de 380 000 ans. Ce sont ces « grumeaux » qui par la suite ont donné naissance aux galaxies et aux grandes structures de notre Univers. Depuis cette époque, l'Univers est devenu pratiquement transparent, c'est pourquoi il nous est possible de remonter jusqu'à l'âge de 380 000 ans.

Depuis cet âge, l'Univers s'est également considérablement distendu, et son volume a augmenté d'un facteur environ un milliard. Du fait de cette expansion, nous observons cette fournaise à une température beaucoup plus faible, qui aujourd'hui n'est plus que d'environ 2,7 degrés absolus.

Parallèlement, ces dernières années, la précision des simulations et la compréhension des phénomènes ont permis de déterminer, à partir des données de WMAP, que la densité de l'Univers est juste critique : rajoutez ne serait-ce qu'un peu de matière et l'Univers s'effondrera sous son propre poids, dans un Big Crunch cataclysmique, au lieu de poursuivre indéfiniment son expansion.

Des WIMPs pour expliquer la Matière Noire

Disposons-nous alors de candidats permettant de remplir le rôle de cette matière extraordinaire, dont les simulations montrent qu'elle doit être froide, c'est-à-dire non relativiste, au moment où l'Univers devient transparent ? Avant d'invoquer des candidats plus exotiques, l'hypothèse selon laquelle la matière noire pourrait être constituée de neutrinos massifs a été examinée avec attention, mais est maintenant écartée car, malgré la faiblesse de leurs interactions, leur présence n'a pas été détectée dans les expériences de sensibilité très supérieure au taux d'interaction attendu.

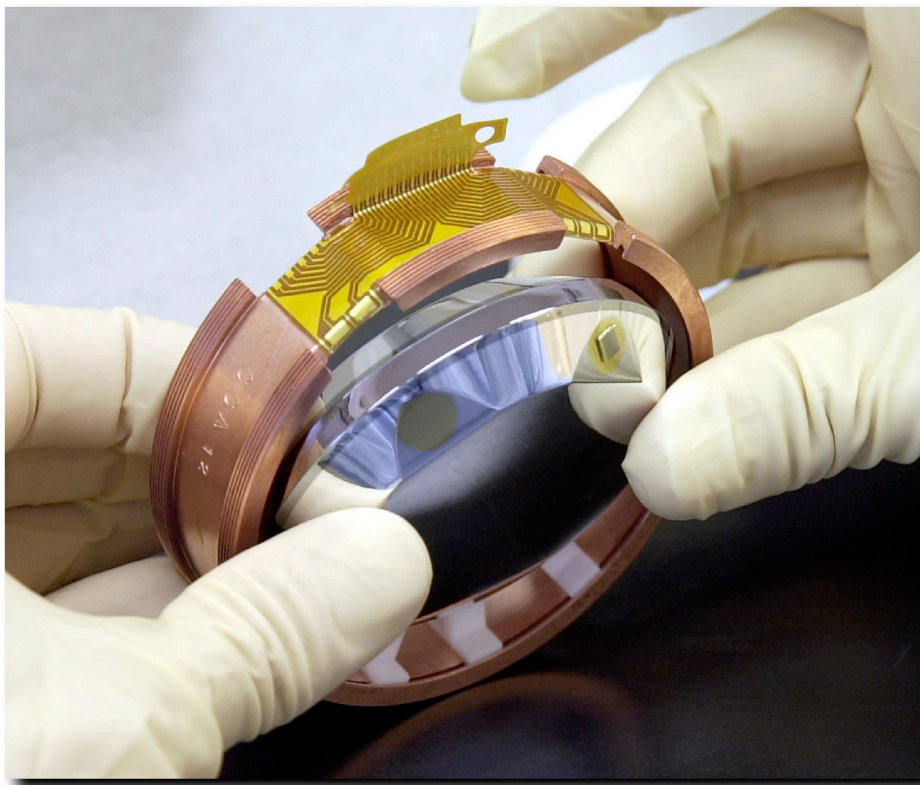


Figure 3 : Détecteur germanium d'une masse de 320 grammes de l'expérience Edelweiss de recherche de la Matière Cachée, opérant dans le laboratoire souterrain de Modane, dans les Alpes à la frontière entre la France et l'Italie sous plus de 1600 mètres de roche. Ces détecteurs sont refroidis à une température d'environ 10 millièmes de degré absolu. A cette température, il est possible de détecter le très faible chauffage (environ un millionième de degré) et les quelques centaines d'électrons produits lors de l'interaction d'un WIMP avec l'un des noyaux de germanium du détecteur.

La solution aujourd'hui la plus prometteuse à cette énigme met en jeu un nouveau type de matière, les particules supersymétriques, qu'un grand nombre d'équipes dans le monde cherchent à observer.

On appelle WIMPs (l'acronyme anglo-saxon de particule massive d'interaction faible, qui est aussi un jeu de mot, car « wimp » signifie mauviette en anglais) ces particules massives, interagissant très faiblement avec notre monde, prédites par les théories qui permettent d'unifier les interactions fondamentales. La plus légère de ces particules est a priori stable lorsqu'elle est isolée des autres.

Selon cette hypothèse, nous serions baignés par un « vent » de WIMPs nous traversant en permanence, sans presque jamais interagir avec nous. Cette idée vous semble ridicule ? Pourtant, un million de milliards de neutrinos émis par le réacteur thermonucléaire à l'intérieur du Soleil vous traversent chaque seconde sans qu'aucun d'entre eux n'interagisse avec votre corps.

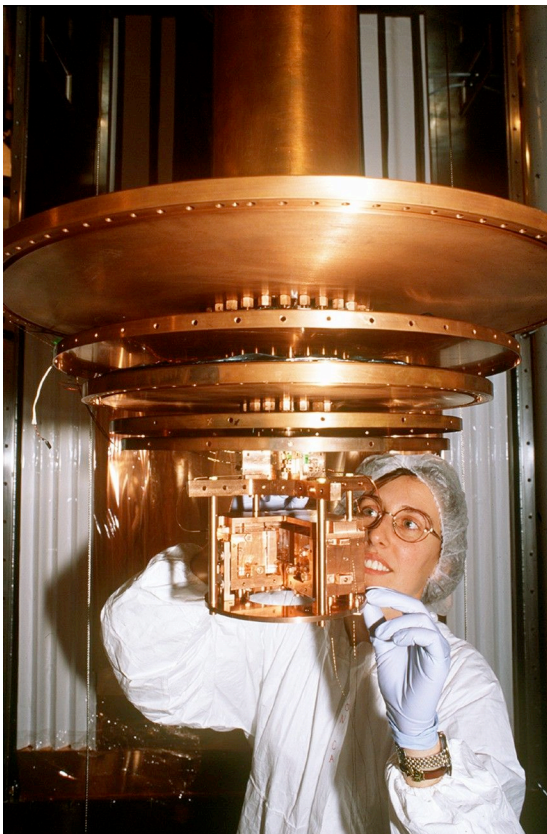


Figure 4 :
Comme l'expérience Edelweiss, l'expérience germano-anglaise CRESST se protège du rayonnement cosmique dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, à environ 100 km de Rome. La photographie montre le montage des détecteurs dans la chambre d'expérience en cuivre ultrapur. L'expérience CRESST-II utilise des cristaux dont on mesure la très légère scintillation (quelques dizaines de photons) et la très faible élévation de température (environ un millionième de degré). Un blindage de protection, en cuivre et en polyéthylène, protège les détecteurs de la radioactivité ambiante.

Il est en fait encore plus difficile de détecter les WIMPs car leur taux de chocs avec la matière ordinaire est phénoménalement faible : a priori de l'ordre ou inférieur à une interaction par kilogramme de matière et par an.

Le défi de la détection des WIMPs

Les principales limites à la détection de ces particules hypothétiques sont :

- le rayonnement cosmique : environ 100 particules issues du rayonnement cosmique traversent chaque seconde notre corps
- la radioactivité induite par les rayons cosmiques
- la radioactivité naturelle (corps humain, roches, matériaux, ...)

Observer les WIMPs, dont nous savons aujourd'hui que le taux d'interaction est au plus de quelques interactions par mois et par kilogramme de matière, est donc une tâche très difficile. Cette observation n'est envisageable que dans des laboratoires enterrés très profondément sous la roche, afin de se protéger du rayonnement cosmique, et par une purification extrême des matériaux composant les détecteurs utilisés pour mettre en évidence les WIMPs, afin de se protéger au maximum de la radioactivité naturelle de ces matériaux.

Ainsi, l'expérience française Edelweiss, dont l'instrumentation présente actuellement l'une des meilleures sensibilités aux chocs de WIMPs sur la matière, est protégée dans le laboratoire souterrain de Modane, à la frontière franco-italienne, par plus de 1600 mètres de roche qui atténuent d'un facteur deux millions environ le rayonnement cosmique subi au niveau de la mer.

L'expérience américaine CDMS, qui a détrôné en 2004 l'expérience EDELWEISS dans la course aux WIMPs, est quant à elle protégée dans une mine des Etats-Unis, moins profonde cependant que le laboratoire souterrain de Modane.

À l'heure actuelle, les trois expériences cryogéniques CDMS, Edelweiss et CRESST, et deux expériences mettant en jeu des cibles liquides d'argon, l'expérience italienne WARP, et de xénon, l'expérience américaine XENON, sont en tête de la compétition internationale. Mais toutes ses expériences sont confrontées au défi de la radioactivité qui se dépose sur la surface des détecteurs, en raison notamment du radon, gaz radioactif dégagé par pratiquement tous les matériaux. D'importants efforts de recherche et développement ont été conduits afin de pouvoir identifier et rejeter ces événements.

L'expérience française Edelweiss, comme l'expérience américaine CDMS et l'expérience allemande CRESST, utilise des détecteurs à une température fantastiquement faible d'un centième de degré absolu afin de pouvoir distinguer les éventuelles interactions de WIMPs, qui transmettent leur énergie presque uniquement aux noyaux des atomes des matériaux composant les détecteurs, de la radioactivité. Dans le cas de la radioactivité naturelle des matériaux, l'énergie est en effet presque toujours transmise non pas aux noyaux mais aux électrons du cortège atomique.

Les matériaux solides les plus purs que l'on sait fabriquer aujourd'hui sont le germanium et le silicium, semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des mémoires d'ordinateur. Ce sont ces matériaux semi-conducteurs extrêmement purs qui sont utilisés pour les détecteurs d'Edelweiss et de CDMS, dont l'instrumentation permet de détecter une élévation de température de moins d'un millionième de degré et un signal électrique de quelques centaines d'électrons. L'expérience allemande CRESST, dans le laboratoire du Gran Sasso en Italie, utilise quant à elle des cristaux scintillants permettant de mesurer lumière (quelques dizaines de photons) et élévation de température (là aussi de l'ordre du millionième de degré) lors d'un choc de particule.

Ces expériences vont bientôt permettre d'explorer une partie beaucoup plus importante des théories d'Unification qui prédisent l'existence des WIMPs. Tout est donc désormais en place pour pouvoir enfin traquer ces particules fantômes !

Energie noire et Matière noire

Cependant, les WIMPs, même si on arrive à les détecter un jour, ne sont peut-être pas la seule clé du mystère de la matière noire. En 1998, les physiciens se sont trouvés en effet confrontés à une nouvelle et énorme surprise : deux équipes (principalement) américaines, le « Supernovae cosmology project » et le « High-z Supernovae search team » ont annoncé presque simultanément avoir constaté une accélération de l'expansion de l'Univers, sous l'effet d'une gravité répulsive, en observant quelques dizaines de supernovae, étalons de luminosité gigantesque, visibles jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière. Mais quel est le rapport avec la matière noire ?

En fait, cette gravité répulsive, appelée aussi énergie noire, l'emporte sur la gravité due à la matière (ordinaire et noire) présente dans l'Univers, d'où cette accélération de l'expansion de l'Univers. On obtient finalement deux composantes « énigmatiques » de la constitution et de l'évolution de l'Univers : la matière noire d'une part et la gravité répulsive d'autre part.

La fantastique découverte en 1998 de cette gravité répulsive est maintenant confirmée par des mesures indépendantes, portant à la fois sur le rayonnement cosmologique à 2,7 degrés, qui nous a notamment permis de mesurer avec précision la densité de l'Univers, et sur les très grandes structures de l'Univers. On peut même avancer aujourd'hui que cette énergie de répulsion gravitationnelle doit contribuer pour 70% environ à la densité d'énergie de l'Univers. Dans les années à venir, différentes équipes, comme celle du SuperNova Legacy Survey (SNLS) franco-canadien, vont observer plusieurs centaines de supernovae afin de rendre plus précises les observations initiales et tenter de comprendre l'origine de cette mystérieuse gravité répulsive, qui est l'élément le plus surprenant lié à l'énigme de la matière noire.

En guise de conclusion

Si l'énigme de la matière noire reste entière, la précision accrue des mesures dans le domaine de la cosmologie au cours des dernières années aura au moins eu le mérite de rendre la question de la matière noire désormais incontournable. Avant 1998, il aurait encore été possible à un sceptique irréductible, qui aurait pu reprocher l'imprécision des mesures, prises individuellement, de nier qu'il existait réellement un problème. Depuis cette date, plusieurs expériences de détermination de la densité cosmologique ont démontré l'ampleur du problème, avec une précision de quelques pour-cent seulement.

Simultanément, les physiciens ont également montré que le neutrino avait une masse, même si cette particule semble ne jouer qu'un petit rôle dans le ballet cosmique, et les expériences de détection des WIMPs parviennent enfin à atteindre la précision qui leur permet d'espérer observer bientôt ces particules tant attendues dans les théories de supersymétrie.

Il reste maintenant à comprendre pourquoi la constante cosmologique de gravité répulsive qu'Einstein considérait comme « sa plus grande erreur » n'en était peut-être finalement pas une, et à cerner les propriétés des deux composants majeurs de l'Univers, la matière noire et l'énergie noire, qui semblent constituer 95 % de son contenu.

Quelques références

Alain Bouquet et Emmanuel Monnier
Matière noire et autres cachotteries de l'Univers
Editions Dunod (2003)

Quand la Science a dit, c'est bizarre
Ouvrage collectif sous la direction d'Etienne Klein
Poches, Editions du Pommier (2007)

Michel Cassé
Énergie noire, matière noire
Editions Odile Jacob (2004)

Quelques sites Web

Sites Web d'Alain Bouquet sur la Matière Noire :
http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/Documents/Archives/Culture/

Page Wikipedia sur la Matière Noire :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_noire

Page Web de Richard Taillet sur la Matière Noire :
http://www.lapp.in2p3.fr/~taillet/dossier_matiere_noire/matiere_noire.php