



La matière noire non baryonique

Claudine Goldbach
et Gérard Nollez, I.A.P.

A la suite du bel article de Roger Ferlet sur la recherche de matière noire baryonique par effet de microlentille (CC 87) Claudine Goldbach et Gérard Nollez poursuivent l'exploration de l'énigme de la masse cachée de l'Univers.

Cette fois ils nous parlent de la matière noire non baryonique¹ et de la recherche des neutralinos.

De nombreux travaux récents contribuent à définir un nouveau cadre à l'énigme de la masse cachée ou matière noire. Ceux-ci portent sur la recherche de matière noire baryonique par effet de microlentille, sur l'étude des structures à grande échelle, des supernovae de type Ia, du fond de rayonnement cosmologique micro-onde et bien sûr la détermination expérimentale de la masse du neutrino. Les études croisées des supernovae Ia à fort décalage vers le rouge² et du fond cosmologique confortent l'hypothèse d'une "énergie du vide" (représentée par une "constante cosmologique") et mettent une limite supérieure de l'ordre de $\Omega_m = 0,3$ à la densité de matière de l'Univers. La densité de matière baryonique, Ω_B , restant de l'ordre de $\Omega_B = 0,1$ il reste de la place pour la matière noire non baryonique.

En 1998, l'équipe de Super-Kamiokande (Japon) a annoncé la mise en évidence d'"oscillations"³ des neutrinos atmosphériques et en conséquence l'existence d'une masse du neutrino.

Cependant, cette composante "chaude" de la matière noire non baryonique ("chaude" signifie que les particules se déplaçaient à la vitesse de la lumière au mo-

ment du découplage matière - rayonnement à $t = 10^6$ ans) ne peut à elle seule rendre compte de la masse cachée et l'existence de particules de matière noire "froide" (non relativistes) reste une hypothèse d'actualité.

Des particules non baryoniques, froides et quelque peu exotiques, sont prévues par les modèles de physique des particules. On les désigne sous le nom de WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles). Interagissant très faiblement avec la matière, elles sont très difficilement détectables mais des efforts considérables sont actuellement développés pour tenter de prouver leur existence. Les recherches portent plus particulièrement sur la mise en évidence d'un neutralino de masse comprise entre 50 et 500 GeV, particule la plus légère prévue par la supersymétrie et qui serait stable d'après certaines versions de ce modèle de physique des particules.

A noter également que deux groupes, l'un aux USA, l'autre au Japon, cherchent activement à détecter des axions, particules de très faible masse (de l'ordre de 10^{-5} eV), par l'étude de leur conversion en photons en présence d'un champ magnétique externe.

A la recherche des neutralinos

Si les neutralinos existent et constituent une partie du halo de matière noire de notre Galaxie, leur détection sur Terre est possible ... mais fort difficile !

En effet, si on s'attend sur Terre à un flux de neutralinos de l'ordre de 100 à 1000 particules par cm^2 et par seconde, leur probabilité d'interaction avec la matière est si faible que l'on ne peut, au mieux, espérer qu'une interaction par jour et par kg de détecteur. La détection de ces interactions appartient donc au domaine de la recherche des événements rares qui nécessitent une protection maximale contre toutes les interactions parasites, qu'elles soient dues au rayonnement cosmique, à la radioactivité du détecteur et de son environnement, aux perturbations acoustiques ou électromagnétiques ...

Pour se protéger du rayonnement cosmique, des laboratoires souterrains ont été aménagés. En France, le Laboratoire Souterrain de Modane a été construit dans le tunnel du Fréjus, entre la France et l'Italie ; une couverture de 1700 m de roches permet de diviser par $3 \cdot 10^6$ le taux de particules chargées issues du rayonnement cosmique.

Dans le laboratoire souterrain, il convient ensuite de se blinder contre la radioactivité proche. Les écrans de plomb sont particulièrement efficaces pour arrêter les rayons γ ... encore faut-il que la présence de l'isotope radioactif ^{210}Pb (de période égale à 22 ans), soit négligeable. On comprend donc l'intérêt de disposer de plomb très ancien. Au laboratoire souterrain de Modane, les écrans sont réalisés en plomb archéologique grâce à une collaboration établie entre physiciens et archéologues : le plomb provient d'une cargaison de lingots retrouvés au large de Ploumanach' et vieux de 15 siècles.

Quant au détecteur lui-même, sur quels principes repose sa conception ? Lors de leur interaction avec la matière ordinaire, les particules de matière noire vont céder, par diffusion élastique

sur les noyaux d'une cible, une partie de leur énergie à un noyau qui va subir un effet de recul. C'est cette énergie de recul du noyau que l'on va chercher à détecter à travers un effet physique dépendant de la nature du détecteur : ainsi les diodes semi-conductrices en germanium ou silicium vont convertir l'énergie de recul en charges électriques et les cristaux scintillants, tels l'iodure de sodium, vont convertir l'énergie en lumière. Mais ces types de détecteurs ne sont sensibles qu'à des énergies de recul supérieures à 10-20 keV ; or l'énergie de recul cédée au noyau par une particule de matière noire de masse inférieure à 10-20 GeV sera plus faible.

Depuis les années 80, un nouveau type de détecteur a donc été développé : il s'agit du bolomètre qui est constitué d'une cible cristalline et d'un senseur (thermomètre). Lors d'une interaction, le recul du noyau va induire des vibrations du réseau cristallin qui produiront une infime élévation de la température. Pour que celle-ci soit décelable, il faut que le bolomètre lui-même soit à très basse température (bolomètre cryogénique fonctionnant vers 10 mK). Le thermomètre, lui, devra transformer cette élévation de température en signal électrique signant l'événement. Plusieurs équipes européennes, américaines, japonaises disposent actuellement de bolomètres cryogéniques et s'installent dans des sites souterrains. Toutes cherchent à améliorer la sensibilité du détecteur, à rejeter le bruit de fond radioactif et à abaisser le seuil de détection. Des voies particulièrement prometteuses ont été ouvertes grâce à des bolomètres à double détection ; ces bolomètres permettent, lors d'une interaction, de mesurer deux signaux : un signal thermique et, en plus, soit un signal d'ionisation (cible de germanium), soit un signal de luminescence (cible en scintillateur). Le bilan énergétique est différent selon qu'il s'agit d'une interaction avec une particule de matière noire (ou un neutron) ou avec un photon γ du bruit de fond : le rapport des deux signaux, chaleur / ionisation ou chaleur / luminescence, permet de rejeter les événements parasites dus aux photons γ .

Les expériences en cours ou en projet

Toutes les expériences de détection directe de la matière noire non-baryonique doivent augmenter la masse de leur détecteur. En effet, une signature claire des interactions avec la matière noire peut être la mise en évidence d'une modulation annuelle du taux d'événements dans le détecteur : la variation sur Terre du flux des particules du halo, due à la variation au cours de l'année de la vitesse de la Terre dans le système de coordonnées galactiques, atteint 10% entre juin et décembre. Pour faire apparaître cette variation, un ordre de grandeur doit être gagné sur la masse du détecteur. Aussi les projets de recherche avec des scintillateurs sont basés sur l'utilisation de 100 kg d'iodure de sodium, ceux avec des diodes semi-conductrices vont jusqu'à envisager l'utilisation de plusieurs tonnes de germanium, quant aux projets bolométriques, ils prévoient l'utilisation d'une dizaine de kg de germanium sous la formes de mosaïques de bolomètres.

D'autres projets portent sur une détection indirecte des WIMPs : lors des annihilations avec leurs antiparticules, il y a émission de neutrons énergétiques. Des expériences se développent pour détecter le signal lumineux émis dans une cible d'eau par les particules chargées issues des interactions de neutrinos (effet Cerenkov). Un projet européen démarre au large de Marseille à une profondeur de 4000 m alors que le projet américain prend pour cible en profondeur les glaces de l'Antarctique.

Notes :

1 - Par opposition à la matière noire baryonique, matière ordinaire composée de protons et de neutrons.

2 - cf. Potins CC86.

3 - L'expérience aurait observé le passage ("oscillation") de neutrinos de type muonique ν_μ vers le type tauique ν_τ .

(cf. F. Vanucci, La Recherche 312, septembre 1998).

Pour en savoir plus :

"Naissance et histoire du Cosmos"

La Recherche, Hors-série, avril 1998. ■