

Matière noire

**Participation à la réalisation d'un banc d'essai
pour des scintillateurs dans le cadre de l'expérience
EDELWEISS**

Anne BONNIN

Travail tutoré par Philippe Di Stefano

Travail effectué en 2004 par Anne Bonnin

Sous la responsabilité de

Matière Noire

(Aperçu dans le cadre de l'expérience Edelweiss)

I Introduction

La recherche de la matière noire n'a pris véritablement naissance comme but scientifique que dans les années 70, grâce à Vera Rubin, s'appuyant sur les travaux de Fritz Zwicky.

Depuis de nombreuses hypothèses se sont succédées. Aujourd'hui, les Wimps, principaux candidats, semblent être la réponse. Le groupe de recherche Edelweiss est un de ces "traqueurs" de matière noire. Aujourd'hui, la résolution des appareils doit être telle, que la recherche de cristaux scintillants les plus performants s'impose.

Après un chapitre consacré à la matière noire, nous aborderons les différentes méthodes de détection, et en particulier celle employée par EDELWEISS.

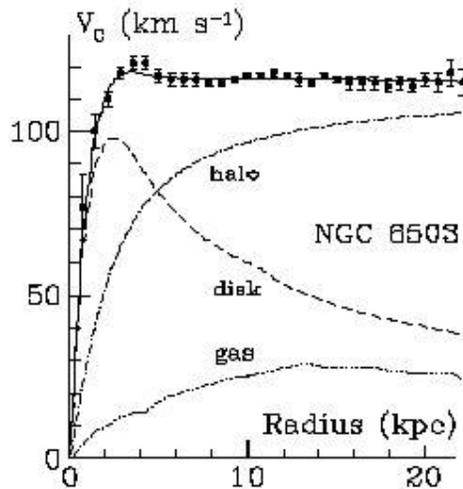
II La masse manquante

1) Existence

a) Découverte

En 1933, l'astronome suisse installé aux Etats-Unis, Fritz Zwicky souhaita peser l'amas de Coma, en étudiant le mouvement de sept de ses galaxies, grâce aux lois de Newton *cf*{art5}. Il remarqua que l'agitation cinétique des galaxies impliquait que la masse totale de l'amas était près de cent fois plus grande que celle due aux seules étoiles.

L'astronome américaine Vera Rubin, dans les années 70, observa les étoiles situées très loin du centre galactique d'Andromède *cf*{art6}. Normalement, la vitesse de rotation des étoiles et des nuages d'hydrogène autour du bulbe galactique devrait chuter, or cette dernière apparaît comme constante en fonction de la distance au centre. (Fig. : rotation)



La vitesse de rotation reste voisine de 120 km/s sur une très longue distance, alors même qu'il n'y a pratiquement plus d'étoiles au delà de quelques kiloparsecs (kpc). La courbe marquée "disk" indique la vitesse que l'on devrait mesurer si la masse était due aux seules étoiles observées, et montre la décroissance "képlérienne".

Une contribution supplémentaire à la masse vient des nuages diffus de gaz (essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium) qui s'étendent plus loin que les étoiles (courbe marquée "gas"). Ces nuages sont également en rotation et on mesure leur vitesse (l'hydrogène atomique est détecté en radioastronomie à 21 cm de longueur d'onde). Mais la masse de gaz est insuffisante pour rendre compte des vitesses de rotation observées.

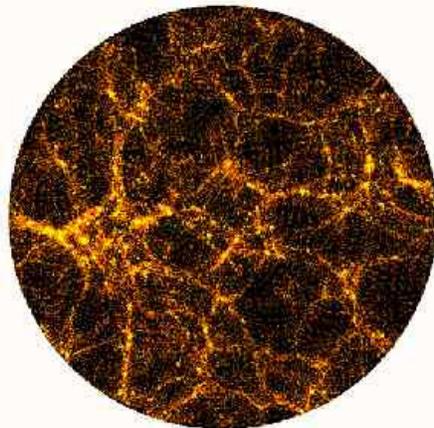
Les observations s'expliquent si l'on suppose que la galaxie visible est enfouie dans un gigantesque halo sombre et massif (la contribution marquée "halo" ci-dessus). Ce halo s'étendrait beaucoup plus loin que les quelques kiloparsecs de la partie "visible" des galaxies, peut-être jusqu'à plusieurs centaines de kiloparsecs.

Sous l'effet de l'attraction gravitationnelle et selon les lois de Newton, la vitesse devrait décroître en fonction de la distance. Si ce n'est pas le cas, c'est que l'on ne voit pas la totalité de la matière constituant les galaxies. Ainsi naquit la matière noire appelée encore sombre, cachée, ou manquante. La première estimation de la matière noire serait énorme : plus de dix fois la masse lumineuse, soit 90% de la matière totale des galaxies! (cf Fig : fluctuation)

Il fallu près de quarante ans, pour que la plupart des scientifiques admettent son existence, sous réserve que les lois habituelles de la gravité ne soient pas modifiées à partir d'une certaine distance (cf Théorie de MOND, Modified Newtonian Dynamics) cf(art4)

b) Autres preuves

Dans les années 80, les astronomes français Y. Mellier, B. Fort et G. Soucail observent des galaxies complètement distordues sur leurs clichés. En fait, ce sont des lentilles gravitationnelles, quantités de matières invisibles entre les galaxies et nous. Elles sont la preuve de l'existence des Machos (cf. 1.2.1). La relativité générale prédisait ce phénomène, suggéré, par Fritz Zwicky dès 1937. Une masse M dévie les rayons lumineux (passant à une distance D de la masse invisible) d'un angle $\alpha = 4GM/C^2D$. Dans la ligne de visée d'une étoile, l'image aura un anneau de rayon angulaire θ_E appelé le rayon d'Einstein.



2) Hypothèses

a) Les Machos ou matière noire baryonique

Ce sont des assemblages d'hydrogène et d'hélium, mais qui n'ont pas eu de masses suffisantes pour déclencher le processus de réaction nucléaire d'une étoile. On les appelle des naines brunes le plus souvent. Les expériences de Eros et Macho ont récolté dix fois moins de microlentilles que prévu, soit 15 % de la masse manquante.

De même, les planètes extrasolaires sont aussi en trop faible quantité par rapport à la masse manquante. Abandonnée aussi, l'idée de trous noirs super massifs : ils auraient créés de tels bouleversement dans les trajectoires des étoiles, qu'ils auraient été repéré depuis bien longtemps.

Le satellite Rosat, dans les années 90 révéla au sein des amas la présence de gigantesques nuages de gaz ionisé, à plusieurs millions de degrés (10^6 K), responsable de rayonnement X. La masse de ce gaz est comparable à la masse des étoiles visibles de notre Galaxie. Cependant les astronomes aujourd'hui pensent qu'il ne constitue pas cette fameuse matière noire : il est chaud car les particules qui le composent sont soumises à un champ de gravité intense, et, le compte n'y est pas. En effet, il faudrait à peu près trois fois plus de matière qu'on n'en a sous forme de gaz pour rendre compte des courbes de rotation. Il faudrait observer un rayonnement X bien supérieur à ce qui est observé.

Un phénomène est intéressant à noter : plus les galaxies sont lumineuses, c'est-à-dire plus elles ont d'étoiles, moins elles ont de matière noire, et vice versa. Ce qui voudrait dire qu'il existe un certain équilibre entre les deux. D'ou l'hypothèse de gaz d'hydrogène, cette fois très froid, et qui n'émettrait pas de rayonnement et qui ne serait donc pas décelable avec les moyens actuels d'observation. Mais cela reste à prouver...

b) La Matière noire non baryonique

Toutes les expériences montrent que d'une manière ou d'une autre, cette matière invisible est forcément constituée de matière qu'on ne connaît pas encore. La théorie du Big Bang définie des quantités précises de protons et de neutrons au moment de la nucléosynthèse primordiale, et il en faudrait dix fois plus pour que les baryons soient à l'origine de la matière noire. Cette dernière ne peut donc pas être "classique".

Le neutrino constitua la principale hypothèse dans les années 80 à 90. Il s'observe couramment dans les expériences de laboratoire, et forme, avec les photons, le fond diffus cosmologique. Cependant sa masse très faible ne peut représenter que 20% de la masse manquante de l'Univers, et il ne pourrait pas expliquer les irrégularités de la distribution de matière noire.

Pour expliquer les mouvements galactiques et la structure de l'Univers, les astrophysiciens ont recours à la matière noire. Les physiciens nucléaires ont, eux, développé une nouvelle théorie pour palier les insuffisances du modèle standard. La théorie de la Supersymétrie (Susy). Cette théorie associe à chaque fermion connu un nouveau boson partenaire et inversement. Dans ce modèle, la LSP (super-particule la plus légère), serait la plus répandue. Électriquement neutre, d'une masse de quelques dizaines de fois la masse du proton, et très peu interactive avec les

autres particules, la LSP correspond en caractéristique aux Wimps (Weakly Interactive Massive Particules) recherches par les astrophysiciens pour la masse manquante...

Les Wimps regroupent toutes les particules possibles : photinos, gravitinos, neutralinos. Leur distribution se ferait en halo autour de la galaxie, mais ils feraient aussi partie intégrante des galaxies, comblant les vides de la matière ordinaire. Cependant, il n'y a plus de créations de Wimps. Ils se sont formés à l'origine de l'Univers. Le plus dur reste à les détecter.

Deux méthodes peuvent alors être employées : les créer artificiellement comme au futur accélérateur du Cern le LHC, ou alors de les traquer, comme le font les expériences Edelweiss (France), Dama (Italie), ou encore CDMS (Stanford, Californie).

3) Matière noire et Univers

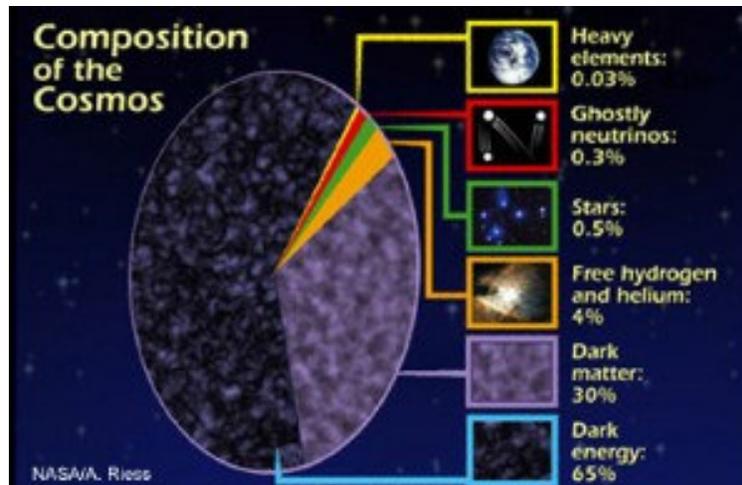
Il est essentiel de connaître la matière noire. C'est grâce à elle que l'on pourra déterminer l'évolution de l'Univers.

On sait aujourd'hui que l'Univers est plat et en expansion, mais les quantités de matière mis en jeu décideront, qui de la gravitation ou de l'expansion, aura le dernier mot. On pourra ainsi définir si l'Univers sera en expansion infinie, se stabilisera, ou alors se recroquevillera sur lui-même dans un Big Crunch. Pour cela, on doit calculer la densité de matière dans l'univers.

Selon les expériences Boomerang, Cobe et Maxima, l'une des composantes de la matière noire serait liée à l'énergie du vide. Effectivement, l'observation de la luminosité apparente des supernovae de type Ia a montré que celle-ci diminuait en fonction de la distance. Ainsi l'association de cette mesure et des résultats de Boomerang montre que la matière noire possède deux composantes.

La densité de la première composante varie comme l'inverse du volume lors de l'expansion de l'Univers $\Omega_m=0.3$ (où Ω_m représente le rapport de la densité de masse totale à la densité critique, pour laquelle l'énergie d'attraction gravitationnelle et l'énergie cinétique liées au mouvement d'expansion se compensent exactement). Ce $\Omega_{\text{matière}}$ serait constitué à 90% de matière noire.

La seconde composante correspond à une substance dont la densité varie très peu en fonction du temps. Ce serait la fameuse constante cosmologique d'Einstein, $\Omega_\lambda = 0.7$. Les chercheurs ont d'ailleurs remarqué que les mesures sur les vitesses mesurent seulement le Ω_m , alors que les mesures basées sur le fond cosmologique mesurerait la somme $\Omega = \Omega_m + \Omega_\lambda = 1$. La figure de la composition représente la proportion de chaque composants de l'Univers.



L'énergie du vide et la masse manquante représentent donc 90% de l'Univers. Les Wimps constituent la principale hypothèse de cette masse manquante, soit le $\Omega_m=0.3$.

III Detection

1) Le traqué

Masse du suspect : 40 à 1000 fois celle du proton

Charge : nulle

Vitesse : 270 km/s par rapport à la Terre

Flux : une centaine par seconde par centimètre carré de l'espace $\sim \text{cite}{art4}$

Production : en grande quantité au moment du Big Bang

Section efficace (surface de l'intensité de l'interaction dont dépend la fréquence des collisions): ordre de 10^{-36} cm²

Energie reçue par le noyau sous l'impact d'un neutralino : 10 à 100 keV $\sim \text{cite}{art1}$

2) Détection

a) Détection indirecte

La situation la plus étudiée est celle de Wimps s'annihilant dans le halo sombre de la Galaxie. La section efficace d'annihilation est fixée, pour une masse donnée, par la densité relic. On connaît la densité du halo, on peut donc en tirer le flux des produits d'annihilation atteignant un détecteur.

Ainsi, les photons gamma produits directement par l'annihilation de Wimps, ou d'un flux de neutrinos d'énergie élevée provenant du centre de la Terre ou du Soleil seraient une belle signature de matière noire.

Une autre méthode pourrait être de détecter les rayons gammas, résultat de l'annihilation des Wimps dans les trous noirs.

b) Détection directe

Les détecteurs doivent avoir un fond radioactif aussi faible que possible, avoir un seuil bas, et une masse importante. Pour le fond radioactif, on se place sous terre ainsi on se protège des muons, ensuite le blindage permet de se protéger des neutrons qui créent un recul d'électrons (bruit de fond). Le signal de wimps causent des reculs nucléaires : on l'observe par ionisation ou scintillation grâce aux phonons ou aux photons.

Un cristal scintillant est un absorbeur, il doit avoir une masse entre 1 et 10 kg. Il permet de capter le recul de la particule, du aux photons. Les photomultiplicateurs captent la scintillation et le transforme en un signal. Les scintillateurs dopés permettent de récolter plus de lumière à faible température. On cherche donc à détecter les reculs des noyaux, dus aux Wimps et aux neutrons. On les discrimine ensuite par le fait que les Wimps sont plus lourds.

Différentes méthodes de détection directe

Il existe différentes manières de détecter le recul des noyaux touchés :

1/ les scintillateurs qui détectent l'énergie d'ionisation dans un bloc de germanium ou de silicium, ionisation due à une collision qui a excitée les électrons d'un noyau cristallin ;

2/ les calorimètres (ou bolomètres) qui détecte les phonons d^u au réchauffement du noyau ;

3/ les scintillations de cristaux d'iodure de sodium(NaI) dans des cryostats.

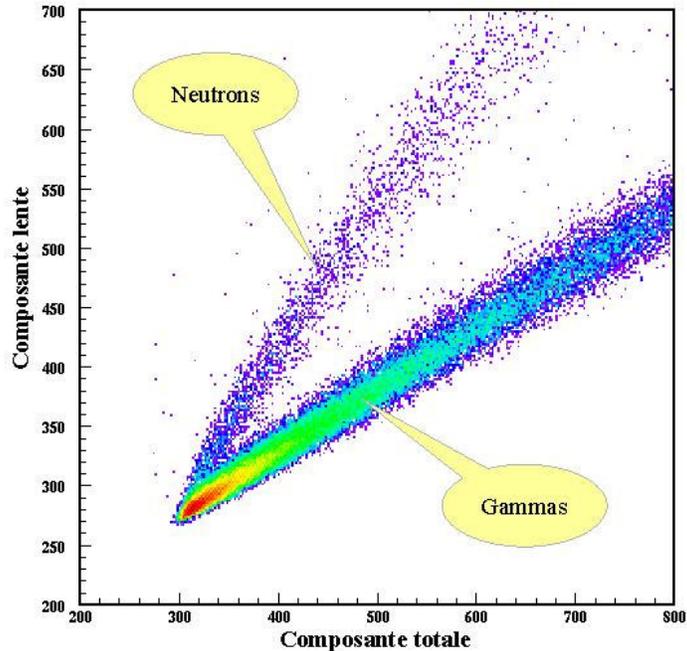
Discrimination de particules

L'analyse de la forme du signal émis par la particules incidente permet, dans certains scintillateurs, de déterminer le type de la particule. Le temps d'émission de la lumière est caractéristique de chaque interaction, et diffère donc suivant la particule.

Le gamma interagit avec un électron, qui excitera les molécules scintillantes, qui émettront de la lumière en se désexcitant.

Le neutron interagira avec le noyau. Ce noyau se chargera positivement, et en reculant, il va exciter les molécules autour.

L'interaction des neutrons est plus longues que celle des gammas. Cette différence vient du fait que le proton est 2000 fois plus lourd que l'électron. Cela permet donc de les discriminer comme le montre la figure (gamma).



Dans la recherche pour les Wimps, la meilleure façon de les observer serait de cumuler les deux méthodes suivantes :

chaleur et ionisation :

C'est la méthode employée dans l'expérience Edelweiss I. Les scintillateurs utilisés sont trois bolomètres de 320g, placés dans un cryostat à une température de 10mK. On mesure alors à la fois la chaleur et la scintillation. Ces deux mesures permettent de distinguer les reculs dus aux Wimps (χ) et aux neutrons (n) de ceux dus aux électrons (e) et aux photons (γ). (Fig. ion)

Les sections efficaces des neutrons et des Wimps sont très différentes. Ainsi on peut déjà discriminer les neutrons des Wimps. Mais ce serait encore mieux d'ajouter la chaleur et la scintillation.

chaleur et scintillation :

On sait que la section efficace des Wimps $\sigma_{\chi} \sim A^2$. Donc si on mesure simultanément la chaleur et l'ionisation pour un noyau de faible A, alors on ne verra quasiment pas de wimps, et on pourra soustraire cette courbe à la courbe de scintillation et ionisation pour n'en ressortir que les Wimps. (cf Fig. ~\ref{fig : scin}). C'est pour cette raison que l'on souhaite étudier des cristaux scintillant de faible masse atomique.

Les différents groupes de recherches et leurs méthodes

Le Groupe Edelweiss utilise des bolomètres en Germanium.

Le Groupe CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) utilise en complémentarité des détecteurs au Silicium et au Germanium.

Le Groupe Dama (Dark Matter experiment), utilise quand à lui des détecteurs de iodure de Sodium, mais il n'observe que la scintillation des wimps.

3) La méthode d'Edelweiss : les traqueurs

Sous 1600 m de roche

Ecran de paraffine de 30cm d'épaisseur

Blindages de cuivre et de plombs

Probabilité : 1 choc /jour/kg de germanium

Bolomètre entre 10 à 20 millikelvin.

Dans l'expérience Edelweiss I, on étudiait la chaleur et l'ionisation grâce à des semi-conducteurs de germanium. Dans Edelweiss II, on étudiera encore la chaleur et l'ionisation. Cependant si la réalisation du banc d'essai pour tester les cristaux scintillants donne de bons résultats, alors on pourra ajouter la scintillation. Mais pour cela, il faut obtenir un très bon cristal scintillant à basse température (quelques millikelvin).