

Investigation of the muon-induced background of the EDELWEISS-II experiment*

par Astrid Chantelauze

Le problème de la matière noire

Depuis que Copernic et Galilée ont suggéré que la Terre n'était pas le centre de l'univers, l'humanité a lentement mais sûrement perdu sa position dominante d'un point de vue cosmologique. D'abord nous ne sommes plus au centre de notre système solaire, puis notre Soleil devient une étoile quelconque de la Voie Lactée, notre galaxie. Nous ne sommes même pas au centre de cette galaxie, une galaxie qui n'a d'ailleurs rien de spécial, une parmi tant d'autres dans l'univers. Et maintenant on nous dit que nous ne sommes même pas composés de la même façon que la majorité de l'univers, qui serait principalement sombre.

Car de l'univers, nous ne connaissons finalement bien que ce que nous en voyons, c'est-à-dire un ensemble de planètes, d'étoiles, regroupés en galaxies, elles-mêmes regroupées en amas ou superamas de galaxies. C'est leur lumière émise qui nous renseigne de prime abord sur cette présence de matière, loin dans le cosmos. En prenant comme masse d'une galaxie, la somme des masses des étoiles visibles, il est possible de calculer la vitesse que devrait avoir une étoile au sein de cette galaxie; et à plus grande échelle, de calculer la vitesse des galaxies au sein d'un amas. Et cette vitesse estimée peut être confrontée à une mesure plus directe. Or, les vitesses mesurées des étoiles au sein de galaxies, ou des galaxies entre elles, sont bien trop grandes par rapport à celles estimées des masses observées, *cf.* Figure 1. Et plus on s'éloigne du centre vers la périphérie du disque galactique, plus l'écart est important. Alors que, selon la loi de la gravitation, les étoiles devraient tourner moins vite au bord du disque, puisqu'il y a moins de matière qu'au centre, elles tournent beaucoup plus vite ! S'il n'y pas assez de masse lumineuse pour expliquer cet effet, il y a pourtant quelque chose qui contribue à la masse. Et une

* Étude du bruit de fond induit par les muons dans l'expérience EDELWEISS-II

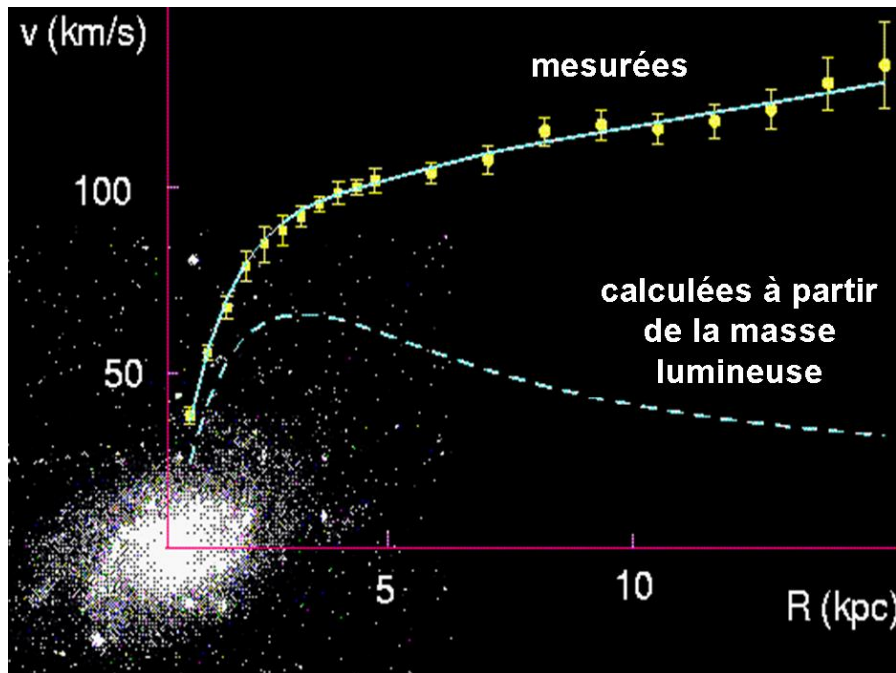


Figure 1 : Vitesse de rotation des étoiles au sein de la galaxie M33. Plus les étoiles sont éloignées du centre de la galaxie (éloignées d'une distance R), plus leur vitesse v augmente. Théoriquement, il y a moins de lumière, donc moins de matière, au bord du disque galactique qu'au centre, les étoiles du bord devrait alors tourner plus lentement. C'est une indication de la présence d'une matière supplémentaire non lumineuse et pour le moment indétectée, appelée matière noire.

explication de cette masse manquante serait l'existence d'une matière non lumineuse invisible, appelé matière noire.

C'est en 1933 que, pour la première fois, un tel comportement des galaxies au sein de l'amas de Coma a été observé par l'astronome suisse Fritz Zwicky. Beaucoup plus tard, dans les années 70, l'astronome Vera Rubin observera le même résultat pour la vitesse de rotation des étoiles de la galaxie d'Andromède (M31). De nombreuses mesures de galaxies et d'amas s'ensuivront confirmant les précédents résultats et constituant l'argument le plus robuste en faveur de la matière noire en tant que nouvelles particules distribuées en halo autour de tous les corps célestes.

Combinées à d'autres observations telles que, par exemple, l'étude minutieuse du bruit de fond cosmologique, ou la mesure de luminosité de lointaines supernovae, un nouveau modèle cosmologique appelé Λ CDM (« Lambda CDM ») a depuis été

établi. Dans ce modèle, la densité d'énergie de l'univers serait composée principalement (73%) de la constante cosmologique Λ , appelée aussi énergie noire. La matière ordinaire, telle que nous la connaissons, contribuerait seulement à 4%, tandis que la seconde plus grande partie (23%) serait de la matière noire (CDM - Cold Dark Matter).

Mais quelle est donc cette matière noire qui serait la matière dominante dans l'univers ? Comme déjà suggéré, la matière noire serait distribuée en halos uniformes de nouvelles particules autour des différents corps célestes. Des particules inconnues, présentes depuis le Big Bang, dont le candidat le plus souvent évoqué est le WIMP (acronyme anglais pour particule massive faiblement interactive), qui est une particule

- *stable*, qui a survécu depuis le Big Bang jusqu'à maintenant sans se désintégrer pour former de nouvelles particules,
- *peu dense*, on attend un WIMP par tasse de café, contrairement aux neutrinos reliques du Big Bang qui seraient 60 000 à se serrer dans les mêmes 20 cl,
- *froide*, qui se déplace lentement et non pas à des vitesses relativistes comme le fait la lumière,
- *non baryonique*, c'est-à-dire qui ne correspond pas à la matière ordinaire, comme les protons ou les neutrons,
- *massive*, la masse du WIMP est estimée entre 50 et 1000 GeV (giga-électronvolts) – un proton correspond à une masse d'un peu moins de 1 GeV, un électron à une masse de 0.0005 GeV,
- et *très faiblement interactive*, qui interagit très faiblement avec la matière ordinaire. On attend moins d'1 événement par kilogramme de détecteur par an.

Ces WIMPs, capables de traverser la matière, sont des particules prévues par des modèles théoriques, notamment celui dit de "supersymétrie" (une extension du modèle standard qui prédit et explique toutes les particules connues à ce jour). La supersymétrie fournit un candidat au WIMP, le neutralino, particule supersymétrique la plus légère. Quels qu'ils soient, les WIMPs n'ont pas encore été détectés physiquement.

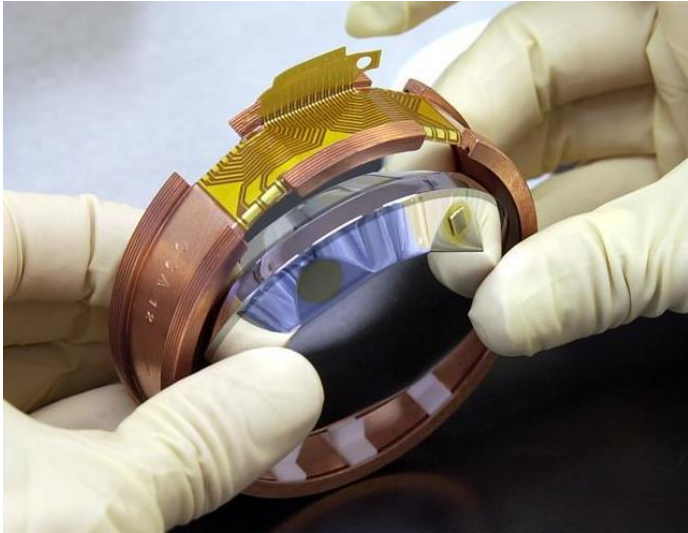


Figure 2 : Photographie d'un bolomètre de l'expérience EDELWEISS. Le cristal de germanium de 320g, d'un diamètre de 7 cm, repose dans sa structure en cuivre. Le petit carré de 4x4 mm², collé sur un support en or sur la partie nivelée du cristal, est le thermomètre.

L'expérience EDELWEISS

L'expérience EDELWEISS (Expérience pour DETecter Les WIMPs en Site Souterrain) utilise la détection directe pour rechercher les WIMPs. La détection directe consiste à mesurer l'énergie libérée lors d'un recul nucléaire produit par la collision élastique d'un WIMP du halo galactique dans de la matière ordinaire. Comme lors d'un jeu de billard, le WIMP va heurter une particule de matière ordinaire de la cible et repartir dans une autre direction. Au cours de la collision, de l'énergie est transférée du WIMP à la particule heurtée, qui va alors s'agiter pour retourner à son état initial en émettant de l'énergie sous forme de lumière (scintillation), de charges électriques (ionisation) et de chaleur.

Les détecteurs utilisés par l'expérience EDELWEISS sont des bolomètres : des cristaux de germanium ultra-purs de 320 g, cf. Figure 2, permettant une mesure simultanée de l'élévation de température et de l'ionisation. Les bolomètres sont placés dans un cryostat permettant d'atteindre une température de 20 millikelvins (soit près de -273°C). La température étant le reflet de l'état d'agitation atomique, à cette température très proche du zéro absolu, il n'y a plus d'autre agitation dans le germanium que celle provoquée par le passage d'une particule. Le choc d'un WIMP avec la cible de germanium, qui devrait produire un infime réchauffement de l'ordre du millionième de degré, pourra être mesuré.

Tandis que la chaleur reflète l'énergie totale déposée par le WIMP, l'ionisation dépend fortement du type de particule. Cette double mesure ionisation-chaleur permet d'atteindre une efficacité, pour distinguer les WIMPs des parasites éventuels, meilleure que 99,98%. Car, c'est évidemment là que le bât blesse, comment détecter sans aucun doute possible un signal aussi faible et aussi rare que celui du WIMP dans un environnement naturellement bruyant ?

Réduire le bruit de fond

Impossible d'écouter le tic-tac de sa montre à la sortie des écoles avenue Carnot. Pour l'entendre, il faut se placer dans un autre lieu silencieux et calme. Dans le cadre de l'expérience EDELWEISS-II, c'est un peu la même chose. Pour détecter les WIMPs, il faut d'abord éliminer tous les rayonnements parasites, ceux provenant de l'univers et dont la terre est bombardée en permanence, ceux produits également par la terre elle-même et les différentes matières qui la constituent et même ceux que nous produisons nous-mêmes, en tant que matière vivante (le corps humain génère environ 8 000 désintégrations radioactives par seconde).

Une solution simple pour s'isoler du rayonnement cosmique provenant de l'espace est d'enterrer l'expérience au sens propre. EDELWEISS se situe au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) sous 1700 m de roche des Alpes françaises dans le tunnel autoroutier du Fréjus. Si l'on transforme cette roche en eau, on obtient une équivalence de 4600 m de protection, soit le plus profond laboratoire d'Europe.

Afin de s'isoler de la radioactivité naturelle provenant de la roche que constitue les parois du laboratoire, les bolomètres sont protégés par une épaisseur de plomb et de polyéthylène, cf. Figure 3, et tout matériel qui doit les approcher est sujet à des restrictions en terme de radio-protection. L'air même est épuré du radon, un gaz naturel radioactif émanant du sous-sol. Seuls les WIMPs doivent passer.

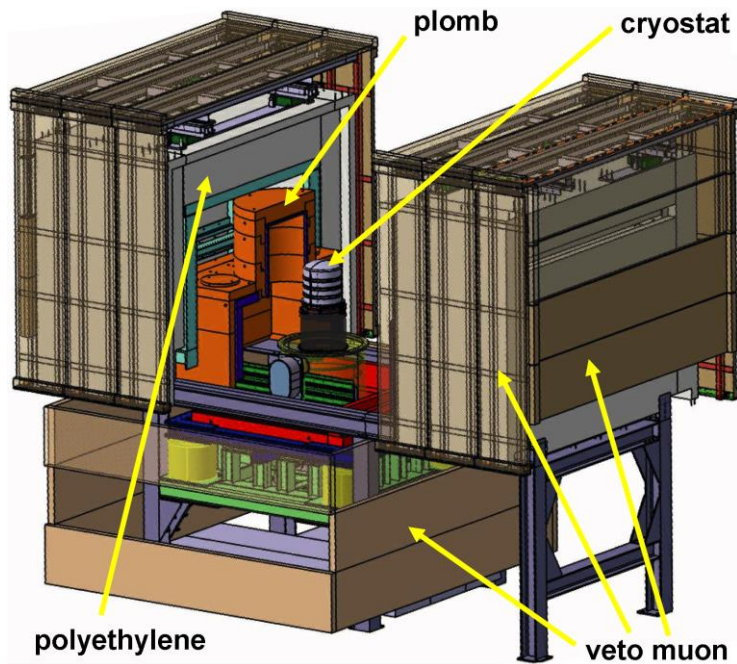


Figure 3 : Schéma de l'expérience EDELWEISS-II. Le cryostat peut accueillir jusqu'à 120 bolomètres, qui sont protégés du bruit de fond par un blindage de plomb et de polyéthylène, et par le veto muon.

Cependant malgré toutes ces protections, il existe un type de particule qui survit à la traversée de la roche et aux blindages de l'expérience. Cette particule est un muon, particule chargée du même type que l'électron mais 200 fois plus massive. Les muons sont issus de la désintégration des rayons cosmiques lors des collisions avec des particules de l'atmosphère terrestre, ceux de faible énergie seront arrêtés par la roche, mais un nombre conséquent atteindra les bolomètres.

Le veto muon

En lui-même, le muon n'est pas tellement un problème. Le signal déposé dans les bolomètres sera très énergétique à l'opposé de ce que l'on attend d'un WIMP. Mais le long de son passage, lors de collisions avec la matière, le muon va produire de la lumière et des neutrons. Si les particules de lumière, les photons, sont identifiées comme telles grâce à la mesure d'ionisation-chaleur qui ne correspond pas à celle attendue pour le WIMP, *cf.* Figure 4, les reculs nucléaires induits par les neutrons peuvent imiter le signal d'une diffusion d'un WIMP sur un noyau de germanium. Les neutrons doivent alors être identifiés par d'autres moyens.

Les neutrons n'étant pas faiblement interactifs, ils vont généralement produire un signal dans différents détecteurs. Ce type d'évènement dit multiple permet d'éliminer une partie des neutrons. En cas de détection d'évènement simple, on va regarder s'il n'y aurait pas eu en même temps un muon détecté dans le détecteur véto muon.

Le véto muon a été développé par le Forschungszentrum Karlsruhe (nouvellement Karlsruhe Institut of Technology – KIT). Il est composé de 42 modules de scintillateur plastique qui entourent de façon quasi hermétique l'expérience afin de maximiser la détection des muons. Réparti sur deux niveaux, le véto muon est monté sur rail au premier niveau pour s'ouvrir en deux et accéder au cryostat qui contient les bolomètres. Au passage d'un muon, l'énergie déposée dans les modules traversés et la position de ce passage sont enregistrées.

Valider et optimiser les résultats du véto muon a constitué une première partie du travail de thèse. Le véto muon fonctionne depuis maintenant 3 ans et a déjà permis une bonne identification des muons et de leur gerbe (particules produites sur le passage des muons), en terme d'énergie et de trajectoire.

En coopération avec le CEA/Saclay, une deuxième partie du travail de thèse a été de synchroniser, non sans mal, la détection simultanée d'évènements dans le véto muon et les bolomètres. Et ainsi, dans un troisième temps, et pour la première fois, une analyse des évènements en coïncidence entre le véto muon et 14 bolomètres a été réalisée pour deux runs longs de 2007 et 2008. Des coïncidences ont été clairement identifiées, *cf.* Figure 4 et 5, avec un taux d'évènement et une distribution en accord avec la simulation précédemment réalisée. Le taux d'évènement en

coïncidence est de $\Gamma_{\text{coïnc}} = 0.043 \pm 0.015$ événement/kg/jour pour une énergie de recul $E_R < 250$ keV.

Jusqu'à présent aucun signal de WIMP n'a été clairement détecté par une expérience, EDELWEISS ou concurrente. Avec l'augmentation en masse (en nombre de détecteurs) et en sensibilité, il devient de plus en plus crucial de connaître et d'identifier le bruit de fond auquel sont soumis les détecteurs. La faisabilité d'une analyse de coïncidence entre les bolomètres et un détecteur de muon est donc prometteuse pour le futur, dans lequel le bruit de fond induit par les muons sera l'ultime facteur limitant.

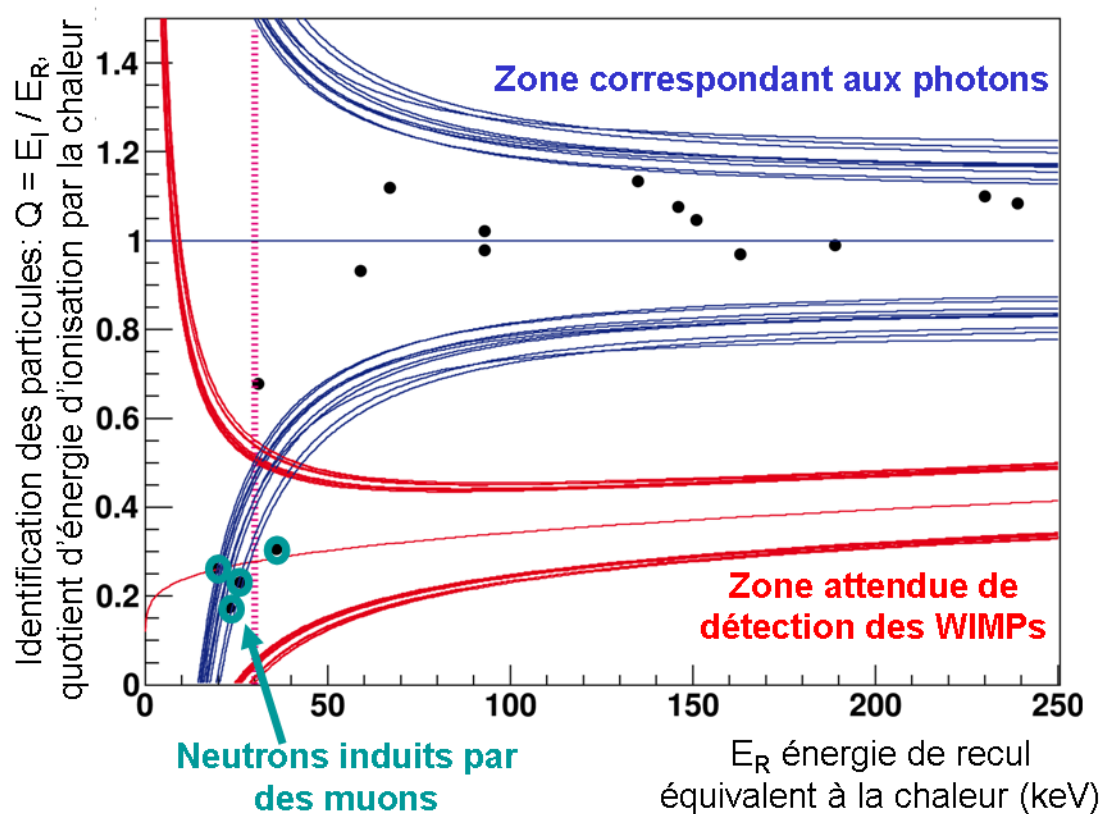


Figure 4 : Résultat de l'analyse des coïncidences entre le veto muon et les bolomètres. La ligne rose placée à 30 keV ne correspond pas à un seuil ou une coupure, mais est seulement là pour guider l'œil. Le bruit de fond de type électromagnétique tel que la lumière (photons) produit un signal d'ionisation et de chaleur dans les bolomètres qui situera l'évènement dans la zone délimitée en bleu. Dans la zone en rouge se trouvera le signal provenant des neutrons et des WIMPs. Après analyse, les 4 évènements de la zone rouge se trouvent être des coïncidences veto muon-bolomètres, c'est-à-dire des neutrons induits par des muons. Leur trajectoire peut être reconstruite comme montré dans la Figure 5.

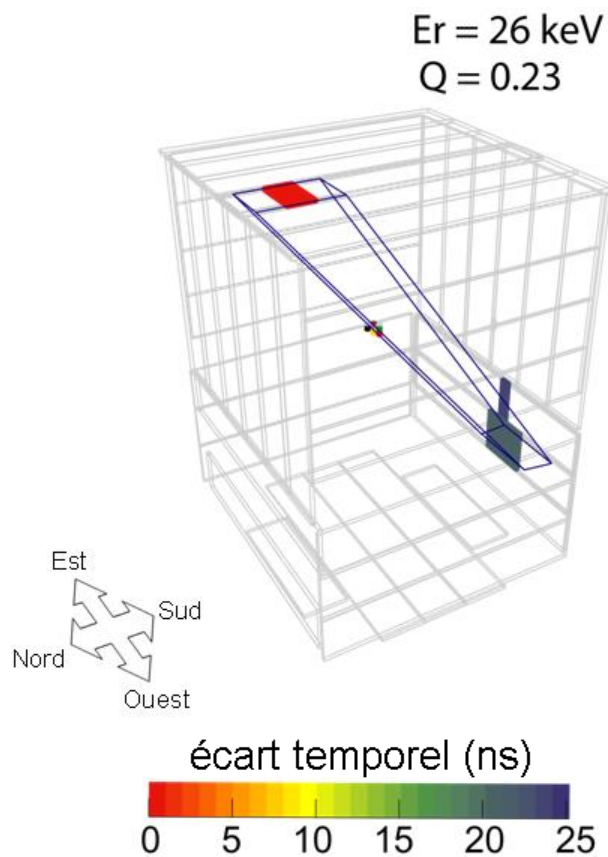


Figure 5 : Exemple de la reconstruction d'une trajectoire pour une coïncidence véto muon-bolomètres. L'énergie de recul, ou chaleur, déposée dans un unique bolomètre est de 26 keV pour un quotient d'identification de particule de 0.23. On a bien là un neutron induit par des muons comme montrés en vert dans la Figure 4. On observe aussi que le muon est entré par un module du toit et ressorti en tapant deux modules du niveau inférieur sur la face sud.