

Ces ondes finissent par se dissiper, ce qui conduit à une hausse de la température du milieu. Celle-ci est minuscule et sa mesure requiert d'utiliser des systèmes de cryogénie avec des détecteurs refroidis à quelques centièmes de kelvin, c'est-à-dire proches du zéro absolu.

Dans le cas du processus de scintillation, le noyau est excité par sa collision avec le WIMP. Il peut se désexciter en émettant de la lumière par fluorescence, phénomène qu'on nomme scintillation lorsqu'il se produit dans un milieu transparent comme les cristaux d'iodure de sodium (NaI), le xénon liquide ou l'argon liquide. Des photodétecteurs mesurent alors la lumière émise.

Les quantités d'ionisation, d'élévation de température ou la longueur d'onde des photons émis sont reliées à l'énergie que le WIMP transfère au noyau lors de la collision. Cette information permet de calculer la masse du WIMP. La fréquence des interactions des particules de matière

noire dans le détecteur donne accès à la section efficace d'interaction. Les chercheurs se concentrent sur la mise en évidence d'un signal et la mesure de ces deux paramètres : la masse et la section efficace.

Des dispositifs variés

La conception du détecteur est cruciale. Selon les équipes de physiciens, les dispositifs réalisés sont variés. On trouve des expériences dont le matériau qui constitue la cible est composé d'atomes lourds ou légers, en phase solide ou formant un système à deux phases, liquide et gazeux. Des atomes légers, par exemple, permettent d'obtenir un recul plus important, mais leur probabilité d'interaction avec le WIMP est plus faible. Il faut opter pour un compromis entre ces deux effets. Le choix est compliqué par le fait que pour les noyaux légers de spin non nul, l'interaction WIMP-noyau peut être importante, mais seulement pour certains types de WIMP.

Toutes ces idées ont mis une trentaine d'années à se mettre en place. Au début des années 1990, les premières expériences ont utilisé des scintillateurs à cristaux d'iodure de sodium (NaI). Cela a permis de développer de nouvelles stratégies de détection s'appuyant sur la détection de la scintillation. Les progrès ont ensuite suivi plusieurs directions : la taille ou la masse des détecteurs a augmenté (jusqu'à 1000 kilogrammes aujourd'hui), et l'on combine différents types de signaux (scintillation, ionisation, calorimétrie) pour améliorer l'analyse des données, suivant des méthodes inspirées de la physique des particules (voir la figure 2). Certaines expériences couplent la détection de la scintillation et de l'ionisation (ZEPLIN, XENON, LUX), de la scintillation et des phonons (CRESST, Rosebud) ou de la scintillation et des phonons (Edelweiss, CDMS, EURECA).

Certaines équipes ont mis en place des dispositifs très originaux. Dans l'expérience ORPHEUS, on prépare des granules dans un état supraconducteur tel qu'ils peuvent

DAMA, UN SIGNAL ANNUEL QUI INTRIGUE

DAMA désigne deux expériences de recherche de matière noire conduites au Laboratoire italien du Gran Sasso, situé à proximité d'un tunnel autoroutier, sous une épaisseur d'environ 1400 mètres de roche. La première, DAMA/NaI, utilisait comme détecteurs neuf scintillateurs d'iodure de sodium (NaI) dopé au thallium, d'environ 10 kilogrammes chacun. Les physiciens de l'expérience ont observé une modulation annuelle du signal sur les sept ans de prise de données. Le résultat final fut publié en 2003. La seconde génération de l'expérience, DAMA/LIBRA, est toujours en cours et confirme cette observation (a).

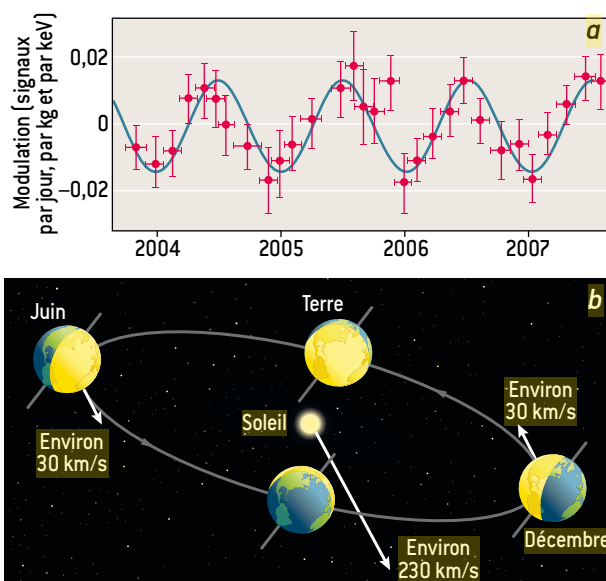
Ce résultat a soulevé beaucoup d'enthousiasme, car un signal de matière noire devrait avoir cette propriété. En effet, à cause du mouvement du Système solaire dans la Galaxie, les détecteurs se déplacent par rapport à la matière noire galactique. Le mouvement de la Terre autour du Soleil fait

varier cette vitesse relative de quelques pour cent sur une année. Ainsi, de façon analogue à quelqu'un qui se mouille davantage en marchant contre le vent un jour de pluie, la probabilité de détection varierait légèrement au cours de l'année (b).

Mais, en 2010, l'expérience XENON100, également au Gran Sasso mais fondée sur un principe de détection différent, a exclu le résultat de DAMA comme étant lié à de la matière noire. La modulation annuelle observée par DAMA est bien présente, mais son interprétation divise les spécialistes. Pour comprendre ce désaccord, il faut revenir sur le principe des expériences : DAMA compte toutes les particules qui atteignent le détecteur, en faisant le pari que si le bruit de fond est constant, alors toute variation du nombre total de particules observées sera la preuve d'une variation de la composante due à la matière noire. Les expériences XENON et LUX, quant à elles,

rejetent de façon plus sévère le bruit de fond, pour ne garder que les événements qui seraient dus à la matière noire. Les contradicteurs des résultats de DAMA soulignent que l'hypothèse selon laquelle le bruit de fond est constant demande à être vérifiée de façon plus précise : DAMA ne

verrait peut-être que la variation du bruit de fond. Une piste possible est la variation en fonction de la température saisonnière de la densité de l'atmosphère, qui bloquerait plus ou moins de muons cosmiques, une modulation annuelle effectivement mesurée par ailleurs.



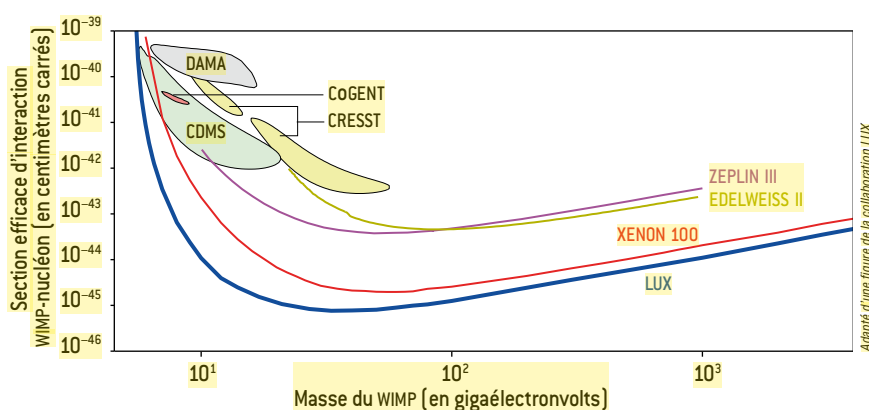
Shutterstock.com/Redsapphine (en bas) - R. Bernabé et al./Collaboration DAMA (en haut)

subir une transition de phase vers l'état conducteur normal au passage d'un WIMP. Cette transition est alors détectable par ses effets magnétiques. Dans d'autres expériences comme SIMPLE, COUPP ou PICASSO, on adapte le principe de la chambre à bulles : le détecteur est un fluide surchauffé, c'est-à-dire dans un état instable où il reste liquide à une température plus importante que sa température de vaporisation à pression ordinaire. Le recul d'un noyau induit par le passage d'une particule déstabilise le milieu et conduit à la formation brutale d'une bulle. Le processus s'accompagne d'une onde sonore qui peut être détectée grâce à des microphones, et l'analyse du son permet de déterminer si la bulle a été formée par un événement de bruit de fond (la désintégration alpha d'un atome environnant, dans ce cas) ou si il peut s'agir d'un WIMP.

Rejeter le bruit de fond

On compte aujourd'hui plusieurs dizaines d'expériences de recherche de matière noire par détection directe. Mais détecter une particule n'est pas suffisant, il faut aussi s'assurer qu'il s'agit bien de celle qu'on cherchait. La radioactivité naturelle et les rayons cosmiques nous bombardent constamment de particules « ordinaires » : des électrons, des positrons, des protons, des muons, des neutrons, des rayons gamma, etc. Ils peuvent aussi faire réagir les détecteurs comme s'il s'agissait de WIMP. C'est le « bruit de fond ». Il faut s'en affranchir ou s'en accommoder. Le développement des expériences de détection directe s'accompagne de nombreuses innovations dans la détection et le contrôle des faibles niveaux de radioactivité pour identifier ce bruit de fond.

Il est impossible de s'affranchir totalement du bruit de fond, mais on peut le limiter. D'une part, les expérimentateurs s'efforcent d'augmenter la pureté des matériaux utilisés, en s'assurant qu'ils contiennent le moins possible d'isotopes radioactifs. D'autre part, pour réduire le flux de rayons cosmiques, on les place sous une grande quantité de roche, en les enterrant profondément (dans un site minier abandonné) ou en les installant sous une montagne (dans un tunnel routier) qui joue le rôle de bouclier. C'est très efficace pour bloquer les particules cosmiques chargées : au Laboratoire souterrain de Modane, situé dans le tunnel du Fréjus sous 1 700 mètres de roche, la quantité incidente de muons est



3. LES RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES sont présentés sur un graphique où la masse de la particule de matière noire est en abscisse et sa section efficace d'interaction avec un noyau atomique est en ordonnée. Les expériences ayant un signal potentiel (DAMA, CRESST, etc.) dessinent des surfaces correspondant aux caractéristiques possibles de leur candidat à la matière noire. Les expériences qui n'ont rien détecté (LUX, XENON 100, ...) excluent les régions au-dessus des courbes. On notera la tension entre les deux types de résultats, les seconds excluant les premiers.

diminuée d'un facteur de plus d'un million par rapport à la surface.

Ensuite, les détecteurs sont entourés d'un blindage pour limiter l'exposition à la radioactivité naturelle, dont celle des roches. Des plaques de plomb offrent une protection assez efficace, mais elles présentent elles-mêmes un niveau de radioactivité gênant à cause de l'isotope instable ^{210}Pb . Pour pallier ce problème, on utilise parfois du plomb dit archéologique, obtenu en fondant des briques de plomb découvertes dans des navires coulés au fond des océans depuis plusieurs siècles : la radioactivité du plomb est principalement due à son exposition au rayonnement cosmique, qui transforme certains noyaux stables en isotopes radioactifs. La mer a protégé le plomb de cette activation. Et les espèces radioactives présentes dans le plomb avant le naufrage se sont désintégrées depuis (la demi-vie du plomb 210 est de 22,3 ans). Par exemple, les physiciens de l'expérience *Edelweiss* ont récupéré 22 tonnes de plomb dans un navire romain coulé au large de la Bretagne vers l'an 400.

D'autres blindages sont aussi utilisés : la paraffine bloque des neutrons rapides issus de la roche, le cuivre ou un bassin d'eau pure dans lequel est plongé le détecteur peuvent remplacer le plomb, des détecteurs de muons placés au-dessus du dispositif signalent le passage des rayons cosmiques qui n'ont pas été absorbés par la roche.

Mais cette protection n'est pas parfaite. Les détecteurs restent soumis à un bruit de fond résiduel qui peut créer des signaux ressemblant à ceux dus à la matière noire. La principale difficulté est là : comment

distinguer une particule de matière noire d'une particule ordinaire qui a déjoué les précautions des expérimentateurs ? Les pistes sont multiples.

Dans certaines expériences sensibles à la scintillation (par exemple DAMA ou DEAP) ou à l'ionisation (par exemple CoGENT), on s'appuie sur l'évolution temporelle du signal (l'éclair lumineux ou la charge électrique), qui diffère pour les événements du bruit de fond et pour un recul nucléaire dû à un WIMP. Dans beaucoup d'expériences, ce tri s'appuie sur le fait que l'importance relative de différents signaux (ionisation, chaleur, scintillation) dépend du type de particule : un photon gamma émis par un élément radioactif produit plus d'ionisation qu'un recul nucléaire.

Une situation confuse

Que détecte-t-on ? Pour résumer en un mot la situation expérimentale actuelle : elle est confuse, même pour les spécialistes du domaine. D'un côté, des expériences très performantes et très sensibles, telles *Edelweiss*, *XENON*, *LUX* ou d'autres, n'ont détecté aucune particule de matière noire, après des années de fonctionnement. Même s'il peut apparaître frustrant, ce résultat présente un grand intérêt scientifique, car il permet d'éliminer certaines particules candidates au titre de matière noire, d'exclure certains modèles théoriques ou de contraindre les paramètres qui décrivent ces modèles (voir la figure 3). Ces expériences continuent d'améliorer leurs performances d'année en année et parviennent aujourd'hui