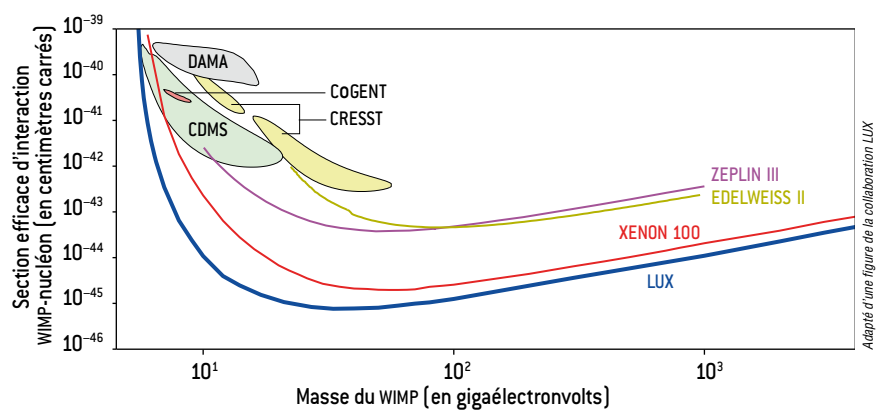


subir une transition de phase vers l'état conducteur normal au passage d'un WIMP. Cette transition est alors détectable par ses effets magnétiques. Dans d'autres expériences comme SIMPLE, COUPP ou PICASSO, on adapte le principe de la chambre à bulles : le détecteur est un fluide surchauffé, c'est-à-dire 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 s'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 1700 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

Des dispositifs directionnels : d'où vient le WIMP ?

La plupart des expériences mesurent l'énergie déposée par le WIMP lors de sa collision avec un noyau atomique. On tente aujourd'hui d'aller plus loin et de mesurer précisément la direction du recul du noyau, ce qui renseignerait sur la direction d'arrivée du WIMP.

Les particules de matière noire se déplaceraient dans le halo galactique avec des vitesses de l'ordre de 200 kilomètres par seconde dans des directions aléatoires. Le Système solaire se déplace dans la Galaxie, dans la direction de la constellation du Cygne, avec une vitesse du même ordre de grandeur. La matière noire se présente alors

comme un vent ayant une direction privilégiée du point de vue des détecteurs terrestres. Il est ainsi plus probable qu'une particule de matière noire provienne de la région du Cygne que de la direction opposée. En revanche, le bruit de fond est beaucoup plus isotrope.

L'idée d'utiliser l'information de la direction du signal a été

proposée par l'astrophysicien américain David Spergel en 1988, mais il a fallu attendre de nombreuses années avant de disposer de détecteurs permettant de la mettre en œuvre. C'est aujourd'hui le cas et plusieurs expériences sont dédiées à la détection directionnelle : *Mimac* conçu au LPSC à Grenoble, DMTPC aux États-Unis, *NewAge* au Japon. Pour déterminer la direction du vent de matière noire, les chercheurs veulent mesurer la direction de recul des noyaux dans les détecteurs, ce qui permettrait de distinguer de façon efficace

un signal de matière noire d'un phénomène terrestre mal compris.

Malheureusement, les contraintes expérimentales sont draconiennes : le détecteur doit contenir un gaz léger sous basse pression, pour que l'on puisse mesurer non seulement le recul, mais aussi et surtout la trace des particules. Cette contrainte limite fortement le nombre d'événements attendus, à moins d'équiper de capteurs des volumes immenses. Par exemple, *Mimac* envisage une cible gazeuse de 50 mètres cubes.

à éliminer certains candidats prévus par la supersymétrie.

Cependant, certaines expériences obtiennent des signaux troublants. En 1998, l'équipe de l'expérience DAMA, située au Laboratoire italien du Gran Sasso, a annoncé qu'elle enregistrait un signal périodique qui varie au rythme des saisons. DAMA enregistre *a priori* tous les signaux : bruit de fond et signal de matière noire. Les physiciens s'attendent à mesurer un signal lié à la matière noire qui présente une modulation annuelle, du fait du mouvement relatif de la Terre et du Soleil dans la Galaxie (voir l'encadré page 34). L'expérience a été améliorée au fil des années, et le résultat initial a persisté : le nombre de particules reçues varie périodiquement, avec un maximum en été, conformément à ce qu'on attend d'un signal dû à la matière noire.

D'autres expériences ont annoncé avoir observé chacune quelques événements que l'on pourrait interpréter comme des détections directes de particules de matière noire : CoGENT, CRESST et CDMS. Toutefois, les résultats de ces trois expériences ne sont pas compatibles entre eux en termes de caractéristiques du WIMP. Les masses déduites des mesures sont comprises entre quelques gigaélectronvolts et plusieurs dizaines de gigaélectronvolts et les sections efficaces couvrent trois ordres de grandeur.

Le désaccord entre ces résultats, ceux qui ne voient rien et ceux qui voient des choses différentes, est difficile à interpréter. En effet, les expériences s'appuient sur

des techniques variées. Les conférences internationales auxquelles participent les physiciens de ces expériences peuvent être houleuses lorsque les chercheurs confrontent leurs points de vue !

Par exemple, les physiciens n'ont pas tous la même analyse des mesures de DAMA. Certains avancent que l'hypothèse d'un bruit de fond constant – faite par l'équipe de DAMA – n'est pas correcte.

Dans plusieurs expériences, une variation annuelle du flux des muons (qui contribuent au bruit de fond) atteignant la surface de la Terre a été mesurée ; elle est due aux variations de température, et donc de densité, de l'atmosphère. Dans l'hémisphère Nord, le flux de muons est maximal en été et cet effet coïncide avec la modulation annuelle attendue pour des WIMP. En revanche, pour une expérience similaire à DAMA effectuée dans l'hémisphère Sud, cet effet devrait être décalé de six mois. Une telle expérience permettrait de déterminer si la modulation annuelle vient des variations atmosphériques ou des WIMP. L'expérience DM-ICE, un détecteur d'iodure de sodium au fond d'un puits de l'expérience *IceCube*, au pôle Sud, et le projet de laboratoire souterrain ANDES, qui sera installé dans un tunnel sous la Cordillère des Andes entre le Chili et l'Argentine, permettront d'identifier la source de la modulation annuelle du signal.

Jusqu'à présent, les expériences de détection directe n'ont pas mis en évidence de particules de matière noire de façon indis-

cutable. Cependant, les résultats négatifs permettent de contraindre avec une précision accrue les caractéristiques de ces éventuelles particules. L'expérience LUX, aux États-Unis, qui est aujourd'hui le dispositif le plus sensible, a ainsi éliminé de nombreux scénarios de WIMP supersymétriques.

Combiner les divers axes de recherche

La détection directe n'est pas la seule piste explorée dans la recherche de la matière noire. Le collisionneur LHC, au CERN, pourrait produire ces particules et apporter d'autres indices sur les théories allant au-delà du modèle standard. Par exemple, la découverte du boson de Higgs en 2012 et la mesure de sa masse – de l'ordre de 126 gigaélectronvolts – ont fourni des contraintes sur les modèles théoriques possibles.

La détection indirecte est encore une autre voie de recherche. Des détecteurs sont pointés vers les régions de la Galaxie potentiellement riches en matière noire. Dans ces zones, les annihilations entre WIMP donneraient naissance à d'autres particules que l'on peut espérer détecter – des anti-protons, des positrons, des photons, etc.

En combinant les résultats de la détection directe, de la détection indirecte et du LHC, les scientifiques parviennent à faire un certain tri parmi les modèles de la matière noire. Mais malgré plusieurs décennies de traque, la matière noire garde encore ses mystères. ■