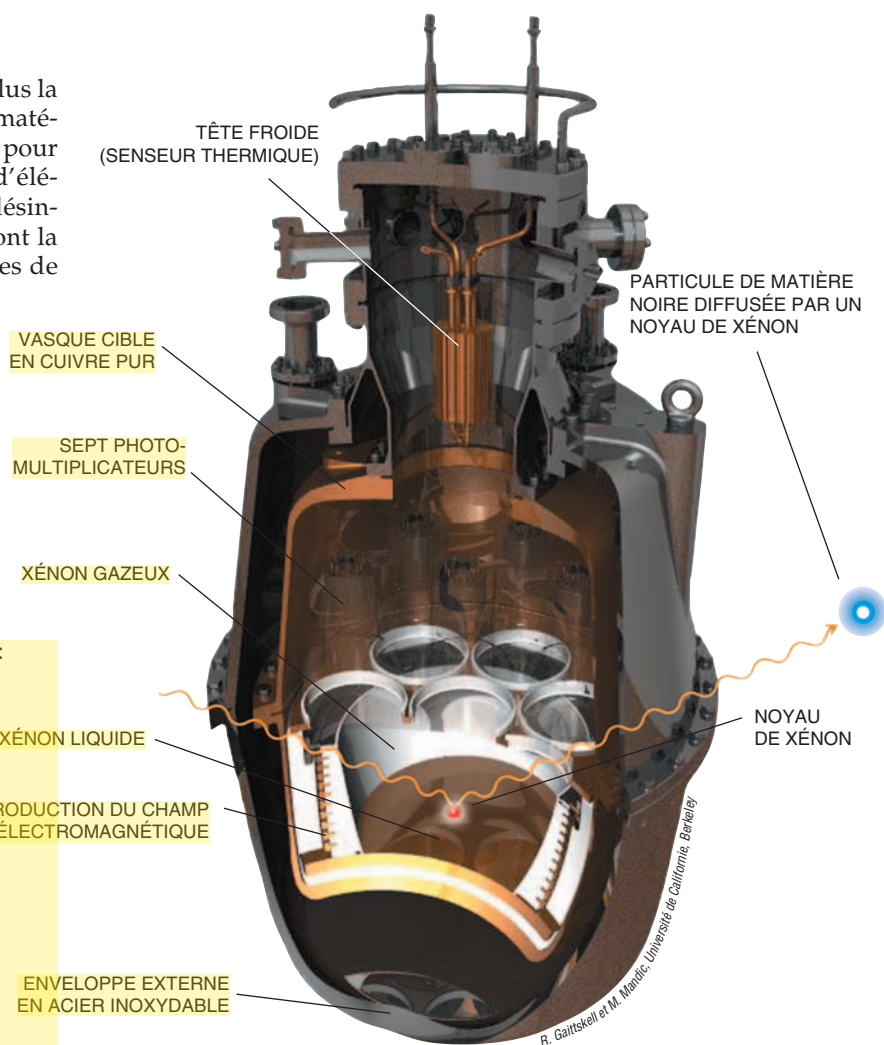


À ce stade, la difficulté principale ne concerne plus la sensibilité des détecteurs, mais leur pureté. Tous les matériaux qui constituent la Terre (y compris ceux utilisés pour construire les détecteurs), contiennent des traces d'éléments radioactifs, tels l'uranium ou le thorium. La désintégration de ces éléments produit des particules dont la signature pourrait être prise pour celle de particules de matière noire. En fait, la radioactivité naturelle terrestre est environ dix fois supérieure au signal que l'on attend de la part des neutralinos. De plus, si les détecteurs sont situés à la surface de la Terre, les rayons cosmiques produisent un signal encore dix fois plus puissant. Pour identifier des particules de matière noire, les chercheurs doivent impérativement diviser ce bruit de fond par un million.

La traque a commencé

Les physiciens sont donc confrontés à deux défis : détecter une interaction, par définition très faible, et supprimer le bruit assourdissant susceptible d'en masquer la signature. En ce qui concerne le premier défi, plusieurs propriétés de la matière peuvent être utilisées pour enregistrer le recul d'un noyau qui vient d'être frappé par un neutralino. Parmi toutes les méthodes envisageables, la plus simple est de mesurer l'échauffement qui se produit lorsqu'en reculant le noyau se fraye un chemin dans la matière qui l'entoure et lui cède de l'énergie cinétique, élevant ainsi légèrement la température du détecteur. Pour mesurer cet échauffement, il est d'abord nécessaire que le matériau soit à très basse température, de l'ordre de quelques millikelvins : c'est la température de fonctionnement des détecteurs cryogéniques. Les détecteurs cryogéniques utilisés par deux des principaux programmes de recherche, le CDMS (sigle de *Cryogenic Dark Matter Search*, recherche cryogénique de matière noire) et l'expérience française *Edelweiss* sont conçus pour mesurer des phonons isolés, ou quanta de chaleur, déposés dans une certaine quantité de matériau. Ils fonctionnent à une température d'environ 25 millikelvins et utilisent des thermistors pour enregistrer les augmentations de température dans les différentes parties du dispositif avec une précision de l'ordre de un millionième de kelvin. Les détecteurs individuels ont une masse de quelques centaines de grammes, et les chercheurs peuvent en empiler un assez grand nombre, jusqu'à atteindre une masse totale de plusieurs kilogrammes, ce qui augmente la probabilité d'enregistrer un événement.

L'autre méthode consiste à déceler l'ionisation de la matière sur le chemin du noyau propulsé par l'effet de recul après l'interaction avec un neutralino. Le noyau en mouvement arrache quelques électrons aux atomes environnants, ce qui produit des ions excités que l'on nomme « excimers » (acronyme anglais pour *excitation dimmers*, variateurs d'excitation). Par la suite, ces ions capturent un nouvel électron et retrouvent leur état normal. On cherche à mesurer les petits courants électriques (de quelques centaines d'électrons) provoqués par ces événements ou à détecter la faible lumière dite de scintillation qu'ils produisent dans certains matériaux,



5. LE DÉTECTEUR ZEPLIN II contiendra 30 kilogrammes de xénon liquide dans une enceinte maintenue à basse température. Lors d'une collision entre une particule de matière noire et un noyau de xénon, des charges seront produites par le noyau reculant sous le choc ; ces charges seront accélérées et focalisées par un champ électromagnétique. Elles provoqueront dans le xénon gazeux qui le surplombe une cascade comparable à celle d'un tube au néon. Cette scintillation sera enregistrée par sept photomultiplicateurs situés au-dessus du xénon. L'étude de la forme de l'impulsion enregistrée et la mesure de l'ionisation produite par le recul du noyau devraient permettre de distinguer un événement provoqué par une authentique particule de matière noire d'événements plus banals, tels une désintégration radioactive ou un rayon cosmique.

essentiellement des gaz rares à l'état liquide. Dans le xénon liquide, par exemple, la lumière est très intense et dure environ dix nanosecondes, de sorte qu'un photomultiplicateur peut l'amplifier jusqu'à des niveaux détectables.

Au début des années 1990, l'équipe que je dirigeais avec Hanguo Wang à l'Université de Californie, ainsi que celle de Pio Picchi à l'Université de Turin, ont développé des détecteurs à xénon dans le cadre du projet ZEPLIN. Ces instruments amplifient la lumière en introduisant une couche de gaz traversée par un champ électrique ; le champ accélère les électrons repoussés par le noyau lors de son recul, et ces électrons ionisant d'autres atomes du gaz créent une avalanche de particules plus aisément détectable. À terme, il devrait être possible de construire un détecteur à xénon liquide de dix tonnes, qui serait sensible aux neutralinos, même si leur probabilité d'interaction est très faible.

Il n'est pas indispensable que le xénon soit liquide. Certains détecteurs l'utilisent à l'état gazeux. Bien qu'un gaz ait une densité plus faible qu'un liquide, il révèle plus facilement les traces laissées par le recul du noyau. La trajectoire indique le point d'entrée de la particule, ce qui permet d'identifier la région du ciel d'où elle est venue et de vérifier si le responsable est un neutrino galactique. Des détecteurs de ce type sont en cours de développement dans les laboratoires souterrains de Boulby, en Grande-Bretagne.

L'emploi du xénon est commode parce que cet élément ne possède pas d'isotope radioactif naturel à longue durée de vie (ce qui réduit le bruit de fond) et qu'on le trouve facilement dans l'atmosphère terrestre (après purification, c'est-à-dire élimination du krypton radioactif introduit dans l'air par les essais nucléaires). Toutefois, ce n'est pas le seul matériau capable de scintiller au passage de particules. Le détecteur italien DAMA utilise un autre matériau, l'iodure de sodium. Avec une masse de 100 kilogrammes, DAMA est, aujourd'hui, le plus grand détecteur du monde.

Un peu de discernement

Le second grand défi est l'atténuation du bruit de fond dû à la radioactivité naturelle et aux rayons cosmiques. On prend en général trois mesures pour y répondre. Tout d'abord, les physiciens filtrent les rayons cosmiques en enterrant profondément leurs détecteurs sous plusieurs centaines de mètres de roche, et en les enfermant

dans des boucliers spéciaux. Le dernier-né des détecteurs du programme CDMS, qui a commencé à fonctionner à la fin 2002, est situé dans la mine de Soudan, dans le Minnesota. L'expérience *Edelweiss*, est installée depuis 1994 sous le mont Fréjus, en France. Quant au DAMA, ses instruments sont installés sous le Gran Sasso, dans le Parc national des monts de la Laga, près de Rome. La seconde mesure consiste à purifier le matériau du détecteur afin de réduire au maximum les signaux provoqués par la désintégration des noyaux radioactifs tapis au sein même du détecteur.

Toutefois, ces deux premières mesures ne suffisent pas à éliminer le bruit et la nouvelle génération de détecteurs utilise également des techniques de discrimination des événements afin de discerner les particules de matière noire des particules ordinaires. On peut, par exemple, mettre en évidence une variation annuelle du signal reçu. En effet, le flux de matière noire dans l'hémisphère Nord devrait être plus important l'été, lorsque le mouvement orbital de la Terre s'ajoute au mouvement du Système solaire à travers la galaxie, et moins important pendant l'hiver, quand le mouvement de la Terre va à l'encontre de celui du Système solaire (voir la figure 3). L'amplitude de cette oscillation annuelle du signal pourrait atteindre quelques pour cent.

Par ailleurs, les projets les plus avancés ajoutent au détecteur principal une ligne de détection secondaire construite sur un principe différent et qui réagit de manière distincte à des types de particules distincts. Ainsi, par exemple, les particules ordinaires (qui constituent le bruit

L'état de l'art de la chasse à la matière noire

PROJET	LOCALISATION	DATE DE MISE EN ROUTE	DÉTECTEUR PRIMAIRE	MATÉRIAU CONSTITUANT LE DÉTECTEUR PRIMAIRE	MASSE (en kilogrammes)	MÉTHODE DE DISCRIMINATION
UKDMC	Boulby, Grande-Bretagne	1997	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	5	AUCUNE
DAMA	Gran Sasso, Italie	1998	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	100	AUCUNE
<i>Rosebud</i>	Rosebud	1998	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE BISMUTH ET DE GERMANIUM	0,02	THERMIQUE, SCINTILLATION
PICASSO	Sudbury, Canada	2000	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
SIMPLE	Rustrel, France	2001	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
DRIFT	Boulby, Grande-Bretagne	2001	IONISATION	XÉNON (GAZEUX)	0,003	TRAJECTOIRE
<i>Edelweiss</i>	Fréjus, France	1994	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	1,3	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN I	Boulby, Grande-Bretagne	2001	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	5	ÉVOLUTION TEMPORELLE
CDMS II	Soudan, Minnesota, USA	2003	CRYOGÉNIQUE	SILICE ET GERMANIUM	10	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN II	Boulby, Grande-Bretagne	2003	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	30	IONISATION
CRESST II	Gran Sasso, Italie	2004	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE CALCIUM ET TUNGSTÈNE	10	SCINTILLATION
<i>Edelweiss II</i>	Fréjus, France	2004	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	30	IONISATION, THERMIQUE

6. LES PROGRAMMES DE DÉTECTION en fonctionnement ou en projet (en gris, en bas) utilisent différentes techniques pour détecter l'énergie déposée dans la matière ordinaire lorsqu'une particule de matière noire percute un noyau atomique. Certains instruments enregistrent les impulsions lumineuses émises par les atomes excités lors du recul du noyau (scintillation). D'autres mesurent la très faible élévation de température qui s'ensuit (méthode thermique dans les détecteurs cryogéniques). Les systèmes à gouttes liquides sont maintenus en état de

surfusion et visent à observer le passage du liquide à l'état gazeux sous l'effet de la très faible perturbation induite par la matière noire. Les détecteurs modernes disposent également de méthodes de discrimination grâce auxquelles ils éliminent les événements provoqués par des rayons cosmiques ordinaires. Ils peuvent, par exemple, étudier l'évolution du signal au cours de l'année, la direction d'où proviennent les particules ou comparer leur signature thermique à l'ionisation ou à la scintillation qu'elles induisent dans la matière.