

Les filaments et grumeaux galactiques de matière noire

La détection directe de matière noire n'est possible que si la Terre traverse une région de la Galaxie contenant une densité suffisante de matière noire. Cependant, les physiciens ne connaissent pas la répartition de la matière noire galactique, et utilisent donc des modèles théoriques.

La distribution de la matière noire serait sphérique – ce qu'on nomme le halo de matière noire – avec une concentration plus importante au centre de la galaxie et plus faible en périphérie.

Les modèles donnent tous, pour la position du Système solaire, une densité moyenne de quelques particules de matière noire (d'une masse de 100 gigaelectronvolts) par litre. Mais même si la densité moyenne de matière noire était bien connue

en fonction de la distance au centre galactique, cela ne donnerait aucune information sur la densité locale. En effet, le halo ne serait pas homogène : les simulations montrent que la matière noire forme des structures en filaments et des grumeaux (voir la simulation *Aquarius* ci-contre, où les points lumineux sont des grumeaux de matière noire). La Terre pourrait être située dans un de ces filaments, ou au contraire se trouver dans une région pauvre en matière noire.

Un autre paramètre entre en compte dans l'estimation du nombre de particules de matière noire que l'on pourrait détecter : la distribution des vitesses de ces particules dans la Galaxie. Elle pourrait différer sensiblement de celle, très simple, que considèrent en général les théoriciens, faute de

mieux. Les scientifiques n'ont à ce jour aucun moyen de connaître la vitesse et la direction des particules. Cette incertitude pèse à la fois sur l'estimation des capacités de détection directe et sur les conclusions que l'on peut tirer de l'absence de détection par une expérience.



Volker Springel/Consortium Virgo

probabilité d'interagir avec d'autres particules). Si l'abondance de particules WIMP doit être égale à la densité de matière noire moyenne dans l'Univers, il en résulte des contraintes supplémentaires sur la masse et la section efficace de ces particules.

Comment mesurer avec précision leurs caractéristiques ? Les expériences de détection directe sont une voie dont l'idée a émergé dans les années 1980, une décennie après les travaux des astrophysiciens sur la dynamique des galaxies. Ces travaux avaient montré que le mouvement des étoiles dans les galaxies ne pouvait être compris que si les galaxies sont entourées d'un nuage, ou halo, sphérique de matière noire (voir l'encadré ci-dessus).

Détecter le recul de noyaux atomiques

Dans ce cas, des particules de matière noire sont présentes dans le voisinage de la Terre et traversent notre planète à chaque instant sans interagir, ou de façon exceptionnelle. En 1985, Mark Goodman et Edward Witten, de l'Université Princeton aux États-Unis, ont proposé de concevoir des dispositifs capables de détecter ces particules. Dès l'année suivante, plusieurs équipes ont réalisé qu'elles pouvaient reprendre assez directement et à peu de frais des techniques qui avaient

été développées pour la recherche d'un processus nucléaire rare (la désintégration double bêta sans émission de neutrinos).

Le principe consiste à observer la trace laissée par un WIMP lors de son passage dans un détecteur. Lorsqu'un WIMP atteint un bloc de matière (la cible), la probabilité qu'il interagisse avec un atome du milieu est extrêmement faible et, la plupart du temps, le WIMP traverse le milieu sans le perturber. Mais, parfois, un WIMP percute un noyau (typiquement une interaction tous les dix jours dans un kilogramme de germanium). Il lui communique un mouvement de recul, comme au billard. Ce recul peut déclencher trois processus différents que les instruments pourraient détecter : l'ionisation, l'élévation de température ou la scintillation (voir la figure 2).

Dans le processus d'ionisation, des électrons sont arrachés à l'atome dont le noyau a été percuté par le WIMP. Un champ électrique appliqué au matériau les conduit vers des électrodes. On mesure alors la charge totale recueillie par le détecteur.

Dans le cas d'une élévation de température, le WIMP cède son énergie par collision à un atome, qui lui-même le transmet à d'autres atomes du milieu *via* son mouvement de recul. Cette agitation des atomes se traduit par une vibration qui prend la forme d'ondes acoustiques (phonons).

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 4 septembre 2014, de 14h à 15h, Richard Taillet reviendra sur la recherche de la matière noire dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences** sur France Culture. www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

L. E. Strigari, **Galactic searches for dark matter**, *Physics Reports*, vol. 531(1), pp. 1-88, 2013.

R. Sanders, **À la recherche de la matière noire**, De Boeck, 2012.

M. Trodden et al., **Matière noire, un Univers caché**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

T. J. Sumner, **Experimental searches for dark matter**, *Living Reviews in Relativity*, vol. 5, n° 4, 2002.

S. van den Bergh, **A short history of the missing mass and dark energy paradigms**, *Historical Development of Modern Cosmology*, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 252, 2001.

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).

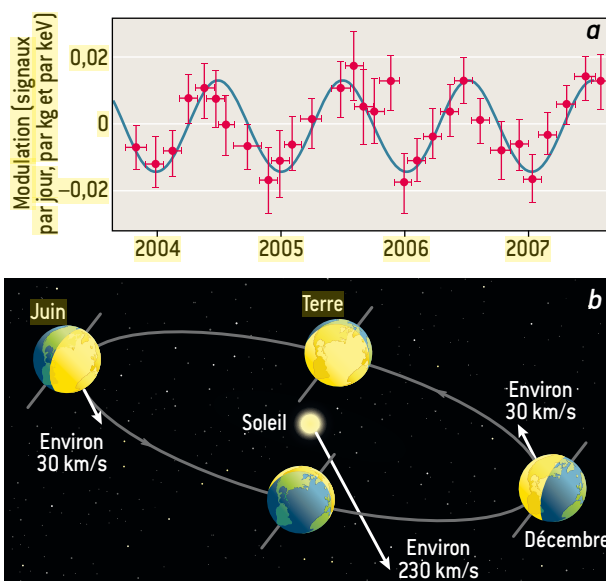
Ce résultat a soulevé beaucoup d'enthousiasme, car un signal de matière noire devrait avoir cette propriété. En effet, à cause du mouvement du Système solaire dans la Galaxie, les détecteurs se déplacent par rapport à la matière noire galactique. Le mouvement de la Terre autour du Soleil fait

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. Bernabè et al./Collaboration DAMA (en haut)