

1. L'EXPÉRIENCE LUX,
aux États-Unis, traque depuis 2013
les rares interactions des particules
de matière noire avec le xénon
liquide contenu dans la cuve
du détecteur.



Carlos H. Falgarra

tion et son histoire) est dans une situation paradoxale et embarrassante. D'une part, en s'appuyant sur la théorie de la relativité générale d'Einstein et la physique des particules, deux solides piliers de la physique fondamentale, elle rend compte de façon très précise et quantitative d'un grand nombre d'observations astronomiques. D'autre part, ce succès repose sur une hypothèse hardie, elle aussi confortée indirectement par de nombreuses observations astrophysiques, mais qui n'a encore jamais pu être vérifiée directement : l'Univers serait rempli d'une grande quantité de matière noire, c'est-à-dire d'une substance qui n'émet ni n'absorbe la lumière (elle est transparente plutôt que noire) et qui échappe donc à l'observation à travers les télescopes (voir l'article de V. Springel page 22). L'Univers contiendrait aussi une seconde substance hypothétique, l'«énergie sombre», mais dont on ne traitera pas ici (voir l'article de C. Deffayet page 38).

La physique des particules donne de bonnes raisons de penser que la matière noire pourrait être constituée de particules nouvelles, différentes de celles que l'on connaît aujourd'hui. Cette hypothèse est confortée par l'étude de la formation des noyaux atomiques dans l'Univers primordial, qui montre que la matière ordinaire ne représente qu'un cinquième de la masse qui emplit l'Univers. Le reste serait donc de la matière noire.

La matière noire se manifeste par ses effets gravitationnels à grande échelle. Mais si elle est constituée de particules, les physiciens espèrent la détecter comme on le fait avec les particules créées lors de collisions dans les accélérateurs. Depuis environ 30 ans, les astrophysiciens et les physiciens des particules ont développé des expériences pour mettre en évidence des particules de matière noire avec des techniques dérivées de celles utilisées dans les grands collisionneurs. On parle de recherche de matière noire par détection directe.

Le succès de ce type de recherche est conditionné par plusieurs facteurs que nous allons passer en revue : l'abondance des

particules de matière noire qui traversent la Terre, leur capacité à interagir avec la matière ordinaire (pour concevoir des détecteurs efficaces) et la nécessité d'avoir des outils performants d'analyse de données pour trier, parmi les particules détectées, celles qui relèvent de la matière noire.

Le premier est un facteur astrophysique sur lequel les expérimentateurs n'ont aucun contrôle : si les particules de matière noire sont nombreuses, les chances d'en détecter augmentent. Le deuxième dépend d'une part de la nature de la particule recherchée et d'autre part du dispositif expérimental – sa taille, le choix des matériaux, la durée

de prise de données... Le troisième facteur constitue le cœur de métier de la physique expérimentale : identifier la source de chaque signal, éliminer le bruit de fond qui comprend tous les signaux masquant les traces de la matière noire.

Ces dernières années, les physiciens ont amélioré la sensibilité de leurs dispositifs, ce qui permet de restreindre l'éventail des possibilités et des hypothèses. La difficulté principale est que, contrairement à la plupart des situations que l'on rencontre en physique des particules, on ignore la nature de la particule que l'on cherche à détecter. Imaginez la chasse d'un animal dont vous ne connaissez pas la taille, les habitudes, ni même s'il vole, rampe,

ou galope ! On dispose tout de même de certaines contraintes théoriques, comme nous le verrons.

Que savons-nous de la matière noire ? Elle ne fait pas partie du modèle standard de la physique des particules qui décrit les forces fondamentales et les constituants élémentaires connus de la matière. Ce modèle explique un très grand nombre de résultats expérimentaux, mais il présente aussi plusieurs défauts. C'est pourquoi les physiciens explorent des extensions possibles du modèle standard. Certaines de ces théories prédisent l'existence de nouvelles particules qui interagissent très faiblement avec la matière et qui sont donc d'excellents candidats pour la matière noire.

L'ESSENTIEL

■ **Les particules de matière noire, si elles existent, interagissent très rarement avec la matière ordinaire.**

■ **Les physiciens tentent de les mettre en évidence au moyen de détecteurs souterrains.**

■ **Certains dispositifs présentent un signal interprété comme de la matière noire, d'autres excluent ces résultats.**

■ **Malgré de tels résultats contradictoires, les chercheurs cernent de mieux en mieux les caractéristiques possibles de la matière noire.**

Ces particules portent le nom générique de WIMP, acronyme anglais de *Weakly Interacting Massive Particle*, qui signifie aussi « mauviette ». Les scientifiques francophones ont gardé le terme de WIMP. La supersymétrie, une de ces extensions théoriques, suscite un intérêt particulier depuis que les cosmologistes ont observé une coïncidence troublante, dont l'explication nécessite de revenir brièvement sur l'histoire de l'Univers.

Depuis les âges les plus reculés de l'Univers, l'abondance des différents types de particules évolue au cours du temps pour deux raisons. D'une part, l'Univers est en expansion, ce qui dilue la matière. D'autre part, quand l'Univers était suffisamment chaud et dense, les particules entraient en collision et interagissaient – elles s'annihilaient, se détruisaient et produisaient d'autres particules.

Cependant, pour chaque type de particule, il arrive un moment où la dilution due à l'expansion de l'Univers réduit drastiquement la probabilité que cette particule interagisse avec d'autres. Il n'y a alors plus de destruction ou de production de ce type de particules, dont le nombre

L'AUTEUR



Richard TAILLET est professeur à l'Université de Savoie. Il effectue ses recherches

en astrophysique au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique.

EN VIDÉO



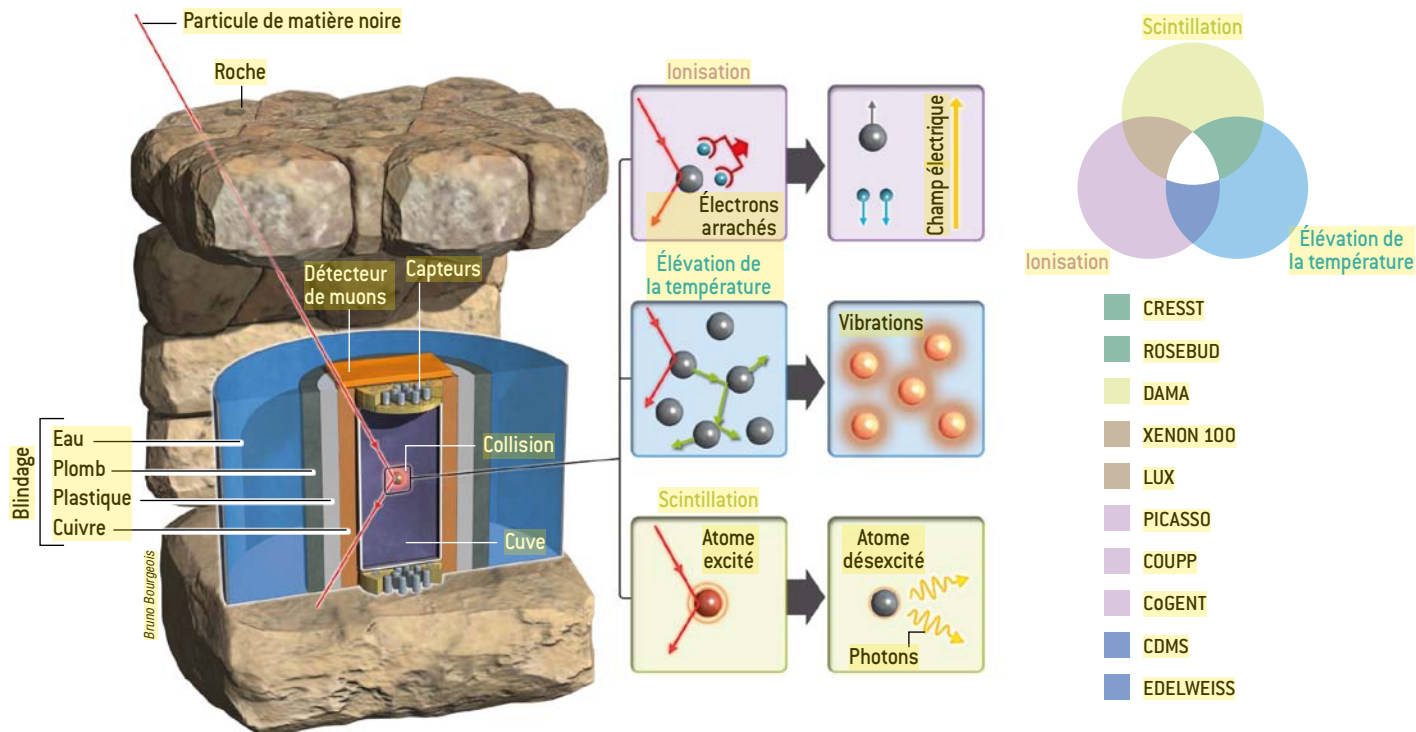
Deux physiciens, Daniel Whiteson et Jonathan Feng, parlent de la matière noire, avec Jorge Cham au dessin : https://www.youtube.com/watch?v=8kCti0S_F_M

total se fige. La densité de ces particules n'évolue plus que par dilution.

Les physiciens se servent des modèles cosmologiques pour calculer avec précision le moment où ce phénomène survient pour chaque type de particule, dont celles qui pourraient constituer la matière noire. Ils comparent l'abondance obtenue avec celle déduite des observations astrophysiques.

Or plusieurs des candidats au titre de la matière noire fournis par la physique des particules, en particulier le neutralino prédit par les théories supersymétriques, donnent naturellement lieu à des abondances « reliques » dont l'ordre de grandeur correspond justement à la valeur estimée de la densité moyenne de matière noire dans l'Univers ! Cette particularité du neutralino a conforté l'idée qu'il est un bon candidat pour la matière noire. Les physiciens ont donc entrepris de détecter cette particule.

Le fait de se fixer une hypothèse (le neutralino dans un modèle supersymétrique ou tout autre candidat à la matière noire) contraint certaines propriétés de la particule recherchée : son spin (moment cinétique intrinsèque), sa masse et sa section efficace d'interaction (une grandeur donnant la



2. DANS UN DÉTECTEUR DE MATIÈRE NOIRE, la particule entre en collision avec un noyau atomique du dispositif. En fonction de la nature du matériau dans la cuve, trois processus sont possibles : l'ionisation (des électrons sont arrachés à l'atome), l'élévation de température (l'agitation thermique des atomes augmente) ou la scintillation (le noyau atomique excité émet des photons). Des capteurs situés au-des-

sus et au-dessous de la cuve enregistrent les signaux. Pour limiter l'influence du bruit de fond parasite, le détecteur (la cuve et les capteurs) est protégé par un blindage qui bloque la radioactivité naturelle et les rayons cosmiques. Les divers détecteurs existants (*colonne de droite*) reposent sur des concepts différents. Ils sont sensibles à un ou deux des trois processus liés à la collision.

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/Censurium 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.