

Invisible

Lumières sur la matière noire

Laura Baudis, Zurich
astrophysicienne

SCIENCES

« La Nature aime à se cacher », disait déjà le philosophe Héraclite d'Éphèse à la fin du VI^e siècle av. J.-C. Un aphorisme qui se prête bien à la recherche en physique des particules élémentaires. Prenons la matière noire. Invisible, elle composerait pourtant 27 % de l'Univers (CERN). Petit tour dans la face « sombre » du cosmos avec Laura Baudis.

Laura Baudis est professeure de physique à l'Université de Zurich. Ses recherches portent sur la matière noire et la physique des neutrinos. Elle est impliquée dans les expériences liées aux détecteurs XENON. Elle a été membre du Comité scientifique du CERN de 2016 à 2018.

De quoi est fait notre cosmos ? Nous ne le savons pas. Pendant des millénaires, nous avons fait l'expérience de l'Univers à travers la lumière. La lumière du spectre visible. Avec Galilée, nous avons commencé à utiliser des télescopes pour observer le ciel nocturne et une nouvelle cosmologie, qui place le Soleil et non la Terre au centre de notre Univers, a rapidement vu le jour. Au cours des siècles suivants, nous avons construit des télescopes de plus en plus sophistiqués, capables de cartographier non seulement le système solaire, mais aussi notre propre galaxie et l'Univers plus lointain à travers de

nombreuses longueurs d'onde de la lumière. Nous avons appris que le Soleil se trouve à la périphérie de la Voie lactée et que notre galaxie n'est qu'une des 2000 milliards de galaxies de l'Univers observable.

Nous avons également construit des détecteurs à grande échelle capables d'observer les particules cosmiques chargées jusqu'à des énergies dix millions de fois supérieures à celles produites dans l'accélérateur de particules le plus puissant du CERN. Et, plus récemment, un aspect jusqu'ici silencieux de notre Univers a été révélé, avec la mesure des ondes gravitationnelles provenant de la fusion de trous noirs et d'étoiles à neutrons, cette dernière s'accompagnant de l'observation de presque toutes les longueurs d'onde de la lumière.

Malgré cela, l'un des plus grands mystères reste à élucider : l'identification de la nature de la matière noire, cette substance invisible qui régit les masses des galaxies, les amas de galaxies et qui façonne les structures cosmiques observées à leurs plus grandes échelles. Ce problème représente un énorme défi mais aussi une occasion en or pour les chercheurs de divers domaines qui unissent leurs efforts pour résoudre l'une des plus grandes énigmes du XXI^e siècle.

Les preuves de son existence

Il y a environ 90 ans, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky utilisait un télescope de l'Observatoire du Mont Wilson, en Californie, pour mesurer la vitesse des galaxies de Coma, un riche amas de galaxies situé à environ 320 millions d'années-lumière de la Terre. Les vitesses se révélèrent étonnamment grandes, indiquant que la densité de l'amas était beaucoup plus élevée que celle dérivée de la seule matière lumineuse. Il conclut que « si cela s'avérait vrai, le résultat surprenant

qui s'ensuivrait serait que la matière noire est présente à une densité beaucoup plus élevée que la matière rayonnante».

Dans les années 1970, Vera Rubin et son équipe ont mesuré les courbes de rotation des galaxies spirales et ont également découvert des preuves de l'existence d'une composante de masse manquante : les courbes de rotation étaient en effet plates et ne diminuaient pas dans leur périphérie, contrairement aux prédictions de la distribution de la seule matière lumineuse. Une dizaine d'années plus tard, la preuve de l'existence de cette matière non lumineuse dans les galaxies était fermement établie.

La question de la nature de la matière noire est intrinsèquement liée à la physique de l'Univers énergétique et primitif, où une telle espèce noire aurait pu être produite.

Depuis, l'existence de la matière noire a été déduite à l'aide d'observations de plus en plus diverses et précises. L'étude du fond diffus cosmologique, un fond quasi uniforme de micro-ondes qui nous parvient de toutes les directions du ciel, apporte l'une des plus fortes indications sur la matière noire, nous donnant une carte précise de la densité de matière dans l'Univers primitif. En analysant ce rayonnement résiduel du Big Bang, les cosmologistes ont pu déterminer qu'environ 85 % de toute la matière de l'Univers est noire, soit invisible.

Quelle est sa nature ?

En dépit de ce vaste ensemble de preuves, la matière noire n'est observée qu'indirectement : par son influence gravitationnelle sur la matière lumineuse. Notre compréhension de sa quantité et de sa distribution à diverses échelles astrophysiques, y compris dans notre propre galaxie, s'est accrue au fil

des ans, mais il nous incombe encore de répondre à la question la plus essentielle : quelle est sa nature ? comment interagit-elle avec la matière visible ?

Les conjectures sur la nature de la matière noire portent sur plus de quatre-vingts ordres de grandeur en terme de masse - des particules de matière noire ultra-légères aux trous noirs primordiaux pouvant atteindre des dizaines de masses solaires - et sur plusieurs ordres de grandeur en terme de forces d'interaction avec la matière visible. Bien qu'aucune particule connue ne soit une bonne candidate, tout prétendant doit être compatible avec un vaste éventail d'observations astrophysiques et cosmologiques.

La question de la nature de la matière noire est intrinsèquement liée à la physique de l'Univers énergétique et primitif, où une telle espèce noire aurait pu être produite en même temps que des neutrinos, des électrons, des quarks, des photons et d'autres particules connues. Cette espèce noire a fourni une force gravitationnelle supplémentaire, permettant aux structures de se former à partir de petites irrégularités initiales dues aux fluctuations quantiques, et conduisant notamment à la formation de galaxies spirales comme la nôtre.

La structure lumineuse de la Voie lactée réside dans un halo de matière noire étendu et grossièrement sphérique, impliquant une masse totale de $\sim 10^{12}$ masses solaires. À partir de la courbe de rotation galactique mesurée et du mouvement des étoiles utilisées comme traceurs de matière invisible, les astronomes peuvent déduire la densité et la vitesse des particules de matière noire

Invisible

Lumières sur la matière noire

- des données nécessaires à la construction de détecteurs de matière noire.

Détection dans la Voie lactée

La principale technique de détection de la matière noire dans la Voie lactée en laboratoire est appelée détection directe. Les physiciens expérimentaux cherchent à enregistrer ces occasions ultra-rares où une particule invisible se disperse dans un matériau cible. Lorsque nous nous déplaçons, avec le Soleil, autour du centre galactique et à travers le halo de matière noire, nous rencontrons un vent de particules de matière noire. Leur densité et la distribution de leur vitesse, ainsi que leur masse et leurs forces d'interaction déterminent les taux de dispersion attendus dans un détecteur, ainsi que les énergies déposées. Par exemple, pour une masse de particules de matière noire égale à 100 fois la masse de l'atome d'hydrogène, le flux attendu sur la Terre est d'environ 100 000 particules par centimètre carré et par seconde.

Ce flux nous permet en principe de détecter ces particules invisibles lorsqu'elles traversent les noyaux atomiques dans un détecteur terrestre et se dispersent. Toutefois, les taux de survenue d'événements prévus sont inférieurs à une dispersion par tonne de matériau de détection et par an. Il s'agit de taux faibles, presque impensables, des millions de fois inférieurs à ceux attendus des

interactions des rayons cosmiques à la surface de la Terre. Cela implique que les détecteurs soient exploités dans les profondeurs, en utilisant la Terre comme un filtre.

Plus d'une douzaine de laboratoires sont construits sur notre planète, certains dans d'anciennes mines, voire dans des mines en activité, d'autres spécialement à proximité des tunnels routiers ou ferroviaires traversant les montagnes. Situé dans un tunnel protégé par quelque 1400 mètres de roche du Corno Grande, le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie, en est un bon exemple.

Le silence est de mise, mais pas seulement

Un emplacement souterrain est cependant loin d'être suffisant. Les expériences doivent également avoir lieu dans des environnements extrêmement calmes et silencieux, car elles doivent être préservées de la radioactivité naturelle de leur environnement immédiat et débarrassées des nucléides potentiels. Ceux-ci sont susceptibles, d'une part, d'émettre des rayonnements alpha, bêta et gamma lorsqu'ils se désintègrent à l'intérieur du matériau cible et, d'autre part, d'imiter éventuellement le signal attendu de la matière noire. Pour maximiser la probabilité d'une détection, les expériences doivent présenter non seulement un bruit de fond très faible, mais aussi un seuil d'énergie très bas et une masse cible aussi grande que possible.

Après plusieurs décennies de développement, deux grandes technologies atteignent des sensibilités sans précédent dans la recherche d'interactions avec la matière noire : les détecteurs de gaz nobles ultra-purs et liquéfiés utilisant de l'argon et du xénon liquides, et les cristaux fonc-

tionnant à quelques dizaines de degrés seulement au-dessus du zéro absolu.

Dans leur phase liquide, les éléments nobles que sont l'argon et le xénon sont utilisés pour construire de grands détecteurs pouvant atteindre des niveaux de bruit de fond ultra-faibles en leur cœur. La détection simultanée de la lumière et de la charge lorsqu'une particule se disperse dans le détecteur et les informations sur la position permettent de distinguer un signal de matière noire du bruit de fond. Les grandes expériences qui recueillent actuellement des données (LUX-ZEPLIN aux États-Unis, XENONnT en Europe et PandaX-4T en Chine, qui utilisent toutes plusieurs tonnes de xénon) ou sont en cours de construction (DarkSide-20k, en Europe, qui utilise de l'argon) et celles actuellement en projet (DARWIN, avec 50 tonnes de xénon liquide et ARGO, avec 300 tonnes d'argon liquide) auront une bonne chance de dévoiler les premiers faibles signaux d'interactions de la matière noire.

Les expériences cryogéniques fonctionnant à très basse température sont optimisées, de leur côté, pour la détection de particules légères de matière noire, globalement plus légères que quelques atomes d'hydrogène. Ces détecteurs de matière noire basés sur des cristaux lisent également l'ionisation dans les semi-conducteurs (EDELWEISS, en Europe, et SuperCDMS, en Amérique du Nord) ou la lumière de scintillation dans un cristal transparent (CRESST, en Europe), dans la mesure où le rapport des deux signaux permet une fois de plus de différencier un signal potentiel de matière noire des interactions de fond.

Ces technologies de détection, ainsi que de nombreuses autres, sont dans la course pour détecter les premiers signes d'interactions entre des particules de matière noire. Une fois que cette preuve directe d'un signal de matière noire aura été fermement établie, l'accent sera mis sur la mesure des propriétés détaillées de leurs espèces et, finalement, sur leur distribution détaillée dans la Voie lactée.

Une énorme opportunité

Un siècle après sa découverte, la composition de la matière noire - ou matière invisible - reste une énigme. Nous vivons dans un vaste océan de matière noire, mais des décennies de recherches intensives ont surtout permis d'établir ce qu'elle n'est pas. Comprendre sa nature représente donc un formidable défi pour la physique contemporaine. Les théoriciens, les expérimentateurs et les observateurs déploient des efforts considérables pour mieux comprendre et délimiter le problème, et l'on peut espérer qu'une découverte sera faite dans un avenir pas si lointain.

La recherche constante de la nature de la matière noire représente non seulement un défi, mais aussi une opportunité en or : la compréhension du problème pourrait constituer l'une des grandes avancées de la physique du XXI^e siècle, et révéler de nouvelles symétries, de nouveaux types de particules fondamentales et de nouvelles forces, tout en ouvrant un nouveau domaine: l'astronomie de la matière noire. ■