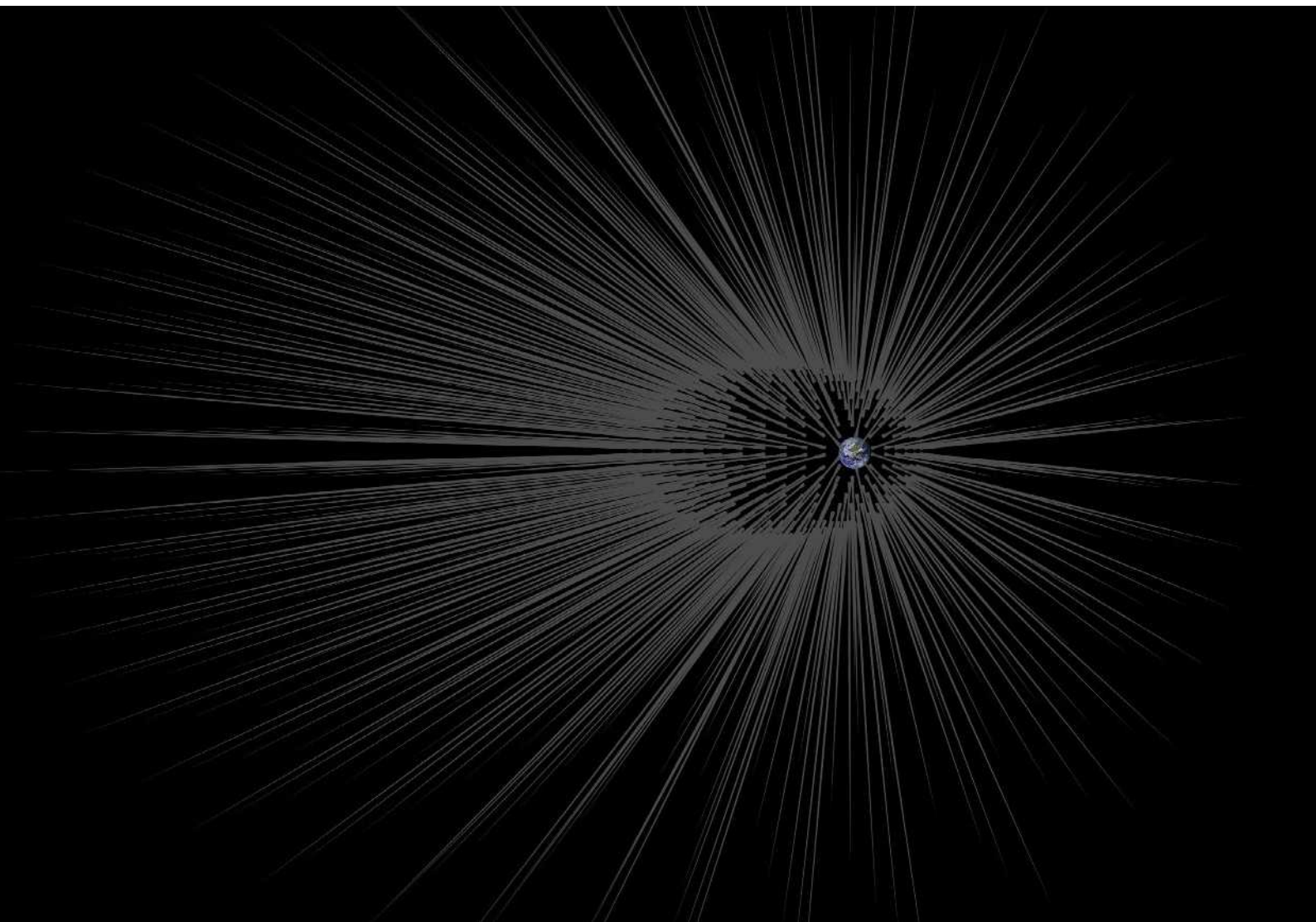




La matière noire est partout,
Elle traverse la Terre, et donc
nous-mêmes, à tout instant.

ce n'est pas faute d'avoir essayé! Petit panorama de la plus grande quête inachevée de la physique moderne.

TROIS MÉTHODES

Depuis trois ou quatre décennies, astronomes et physiciens des particules ont été amenés à échauffer plusieurs techniques, assez complémentaires, pour mettre en évidence cette matière noire autrement que par ses effets gravitationnels. On peut classer ces méthodes en trois grands groupes: la production dans les accélérateurs de particules, la détection directe, et la détection indirecte (on parle aussi de détection astrophysique).

La première méthode est sans doute la plus naturelle pour les physiciens des particules. Il

s'agit de détecter les particules de matière noire de la même façon que l'ont été la majorité des particules du modèle standard: en les produisant lors de collisions de haute énergie. On peut aussi imaginer détecter les conséquences de leur existence dans ces collisions, par exemple en constatant qu'une partie de l'énergie de la collision a disparu, emportée par une particule invisible. Pendant longtemps, s'est imposé un « candidat naturel » à la matière noire, lié à une hypothèse particulièrement séduisante, la supersymétrie. L'idée principe de cette dernière rappelle celle de l'antimatière, qui à chaque particule connue associe un *alter ego* aux propriétés proches ou opposées. Par exemple, les antiparticules ont la même masse, mais une charge électrique opposée à >

➤ celle de leurs «sœurs». Avec la supersymétrie, c'est la nature de la particule qui change.

Toutes les particules connues se répartissent en deux groupes: les bosons (photon, boson de Higgs...) et les fermions (électrons, neutrinos...). En simplifiant beaucoup, les premiers sont plutôt grégaires, alors que les seconds semblent ne pas vouloir partager des caractéristiques trop semblables avec une particule voisine du même type. La supersymétrie, où le préfixe «super» renvoie à l'idée de «supplémentaire», associe à un fermion du bestiaire des particules connues une particule supersymétrique, une «sparticule», dont la principale différence est qu'elle est un boson, et *vice versa*. Cette hypothèse s'inscrivait dans la lignée de plusieurs découvertes en physique des particules fondées sur des principes de symétrie sous-jacentes.

Dans la version la plus simple du modèle, particules ordinaires et supersymétriques ont des masses identiques. Dans un tel cas, les sparticules auraient alors été facilement fabriquées dans les accélérateurs de particules. D'évidence, ce n'est pas advenu, et l'on en déduit que toutes les sparticules sont dotées d'une masse importante, une propriété qui tombe à point nommé pour la matière noire. En effet, à l'instar de beaucoup de particules ordinaires, une particule supersymétrique peut

d'annihilation massive quand la température de l'Univers diminuait. Mais dans un Univers en expansion, certaines auraient survécu à un tel Armageddon, l'expansion finissant par rendre nulles les chances de rencontre.

L'abondance en masse des particules supersymétriques restantes dépend, dans les cas les plus simples, de deux paramètres: la section efficace et leur masse, qui déterminent respectivement la probabilité d'interaction entre ces particules et l'époque où commence leur annihilation. Miracle! Si on imagine que la section efficace est celle des particules ordinaires les plus évanescentes, les neutrinos, et que la masse est d'environ celle du boson de Higgs (de l'ordre d'un téraélectronvolt, ou TeV), alors la masse résiduelle sous la forme de matière noire coïncide avec ce qu'indiquent les observations astronomiques!

ÉLUSIVES MAUVIETTES

La matière noire serait donc, peut-être, composée de ces sparticules massives, regroupées sous le terme de «wimps», acronyme de *weakly interacting massive particles*. C'est aussi un clin d'œil à l'agaçante propriété évasive de ces particules, car le mot anglais *wimp* signifie «mauviette». Les détecter semblait, il y a une quinzaine d'années, n'être qu'une question de temps: la masse de ces wimps ne pouvait être trop élevée, sans quoi leur abondance, prédite par la supersymétrie, aurait été incompatible avec la quantité de matière noire déduite des observations, et les accélérateurs de particules, au premier rang desquels le LHC, allaient finir par les produire.

Cette idée prévalait en septembre 2008 lors de la mise en service du LHC. Où en sommes-nous dix ans plus tard? À l'évidence, le «candidat naturel» a perdu de sa superbe, une issue que quelques cassandres annonçaient depuis longtemps. De fait, les seuls arguments en faveur de la supersymétrie reposaient sur la sémantique utilisée précédemment: il semblait «naturel» qu'une théorie «élégante» fût certainement vraie. Des fondations bien faibles, pour ne pas dire naïves. À l'heure actuelle, le LHC est toujours à la recherche de particules de matière noire. Mais la supersymétrie ne s'étant pas manifestée aux échelles d'énergie du boson de Higgs, la motivation n'y est plus.

Faute d'arriver (pour l'instant?) à fabriquer la matière noire, pourrait-on tenter de détecter des particules existantes avec l'appareillage adéquat? Cette solution serait encore plus simple, car cette matière noire est *a priori* abondante. En imaginant que les particules qui la composent ont une masse comparable à celle d'un proton, alors on en trouve dans l'Univers en moyenne un peu plus d'une par mètre cube. Et au sein d'une galaxie comme la nôtre, sa densité est de plusieurs centaines de milliers

LE FLUX DE NEUTRINOS EN PROVENANCE DU SOLEIL FINIRA PEUT-ÊTRE PAR BROUILLER TOUTE TENTATIVE DE DÉTECTION DE MATIÈRE NOIRE DEPUIS LA TERRE

être instable, mais elle ne peut se désintégrer qu'en particules ordinaires. Cela signifie donc, en l'absence de détection des particules ordinaires issues de sparticules, qu'il existe au moins une particule supersymétrique stable. Dotée d'une masse non nulle, elle pourrait «naturellement» constituer la matière noire.

Cerise sur le gâteau, on peut calculer par des principes très généraux l'abondance envisageable de cette matière noire. De la même façon que les particules ordinaires, les particules supersymétriques coexistaient probablement avec leurs *alter ego* d'antimatière, des «antiparticules», très tôt dans l'histoire de l'Univers, et qu'elles connurent une période



Le détecteur de l'expérience **Cresst** est enterré sous la chaîne des Apennins, en Italie, dans le laboratoire Gran Sasso. Il guette la matière noire, à l'abri des parasites de la radioactivité naturelle et des rayons cosmiques.

de fois supérieure. Ajoutons que la vitesse de ces particules au sein de notre Galaxie est sans doute comparable à celle des étoiles (quelques centaines de kilomètres par seconde), et l'on obtient qu'à chaque seconde, une section de 1 mètre carré est traversée par 100 milliards de particules de matière noire !

Dès lors, même si la matière noire interagit peu, un détecteur dédié finira bien, s'il est suffisamment gros et opérationnel pendant longtemps, par détecter l'improbable interaction entre l'une de ces particules et un atome du détecteur. Ce principe n'est pas nouveau : c'est celui des détecteurs de neutrinos. En pratique, un tel détecteur est composé d'une vaste cuve remplie d'un liquide et tapissée de photomultiplicateurs qui vont patiemment attendre d'enregistrer un photon né de la collision entre un neutrino et un atome de la cuve. Le choc produit aussi une particule chargée, identifiée par diverses méthodes. La coïncidence des deux événements et leurs propriétés respectives trahissent l'interaction recherchée. Les problématiques pour les neutrinos ou la matière noire sont ainsi assez semblables : les événements rares que l'on cherche à détecter ne doivent pas être pollués par des phénomènes plus communs, mais sans intérêt. Lesquels ?

D'abord, la radioactivité naturelle, c'est-à-dire la désintégration spontanée de certains noyaux atomiques, se traduit parfois par des événements pouvant être confondus avec de possibles signaux de la matière noire. L'autre

source de nuisance vient des rayons cosmiques, ces particules très énergétiques qui heurtent la haute atmosphère en produisant quantité de particules secondaires. Parmi celles-ci, les muons (des cousins éloignés de l'électron) sont particulièrement gênants, car proches de la signature attendue de la matière noire. Produits à plusieurs kilomètres d'altitude, leur durée de vie relativement courte (2 microsecondes) ne devrait en principe pas les autoriser à parcourir plus de 600 mètres et donc d'atteindre le sol. C'est sans compter l'effet de dilatation des durées de la relativité restreinte, selon lequel une particule se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière voit sa durée de vie apparente augmenter pour un observateur immobile, par exemple situé sur Terre. Les muons peuvent donc rejoindre la surface terrestre.

SIX (MILLE) PIEDS SOUS TERRE

Et plus encore... car leur caractéristique la plus nocive est leur fort pouvoir pénétrant. Ils peuvent traverser plus d'un kilomètre de roche avant d'interagir avec la matière. Tout détecteur de matière noire (ou de neutrinos, du reste) se doit d'être enterré afin de s'affranchir des muons. Ces dispositifs sont donc hébergés dans des puits de mine ou des tunnels routiers. Un des hauts lieux de la recherche de matière noire est le laboratoire national du Gran Sasso, en Italie. Il a été aménagé à partir du tunnel autoroutier du même nom, sous environ 1 400 mètres de roches de la chaîne des Apennins.

> Qu'ont révélé ces expériences? Malgré des détecteurs de plus en plus gros, de plus en plus sensibles, avec des durées de fonctionnement de plus en plus longues, tous les espoirs d'une possible détection ont été douchés. Au début des années 2000, l'expérience *Dama* repérait un signal présentant une modulation annuelle, comme ç'aurait pu être le cas si, du fait de son déplacement autour du Soleil, la Terre voyait sa vitesse varier par rapport au courant local de matière noire.

Des années après, c'est l'expérience *Cresst* qui semblait détecter un autre signal du même type, confirmant le résultat d'une autre expérience, *CoGeNT*, mais au final aucun de ces espoirs ne résista à l'épreuve du temps. On ne doit pas en conclure que la matière noire est hors de portée. Peut-être même sa détection sera-t-elle annoncée d'ici un an ou deux, mais le temps commence à presser.

UN DÉTECTEUR SUR MARS OU SUR PLUTON

Car s'il reste encore possible de tenter l'aventure avec des détecteurs plus grands, plus profonds, mieux protégés de la radioactivité ambiante..., un moment viendra où la traque deviendra inutile, car les particules recherchées auront alors des caractéristiques telles qu'on ne pourra pas échapper à une autre source de nuisance que rien ne pourra écarter: les neutrinos issus du Soleil, qui n'ont aucune difficulté à traverser la Terre entière. Quand ce « plancher des neutrinos » sera atteint, il n'y aura guère d'espoir de détecter la matière noire, sauf à imaginer limiter le flux de neutrinos reçus par le détecteur, par exemple en l'enterrant sous la surface de... Mars ou, qui sait, Pluton. Un beau projet... pour le *xxi^e* siècle!

Faute de pouvoir mettre en évidence la matière noire sur Terre, il reste un dernier atout dans la manche des astrophysiciens: détecter dans le cosmos la trace de cette matière noire au-delà de sa seule présence gravitationnelle. L'idée est de supposer que la matière noire, même si elle est distribuée de façon très diffuse, comporte des zones suffisamment denses et étendues pour que des particules de matière noire puissent parfois interagir. Le centre des galaxies est la cible de choix. À quoi peut ressembler la signature d'une interaction de deux particules de matière noire?

En postulant que la matière noire est composée d'une particule qui est aussi sa propre antiparticule (comme c'est le cas du photon), alors une collision entre deux particules de matière noire produit une paire de photons ou bien une autre paire particule-antiparticule, par exemple un électron et un positon. Dans le premier cas, l'objectif est de chercher un excès de photons. Or comme les particules de



CHERCHER LA MATIÈRE

NOIRE S'APPARENTE AUJOURD'HUI

À CHERCHER UNE AIGUILLE

DANS PLUSIEURS BOTTES DE FOIN

SANS AVOIR D'IDÉE PRÉCISE

SUR LA FORME DE L'AIGUILLE,

NI MÊME S'IL Y EN A VRAIMENT

UNE À TROUVER



On a cru un temps que le télescope spatial *XMM-Newton* avait détecté de la matière noire via la désintégration de particules la composant. Mais non.

matière noire sont sans doute dotées d'une vitesse faible, on s'attend que leur annihilation mutuelle donne naissance à des photons situés dans une bande d'énergie relativement étroite. C'est à la recherche d'une sorte de raie d'émission plus ou moins marquée que se consacrent de nombreux astrophysiciens, mais là encore, la difficulté est d'extraire un signal de matière noire du «bruit» de haute énergie produit par des processus astrophysiques bien plus conventionnels.

On s'attend que le signal dû à de la matière noire soit relativement homogène en direction du centre galactique, puisque la distribution de matière noire a des chances de l'être également. À l'inverse, une origine astrophysique de photons de haute énergie serait plus probablement un ensemble de sources individualisées comme les pulsars. Distinguer entre ces deux hypothèses nécessite donc de pouvoir cartographier un éventuel excès de photons de haute

énergie avec une bonne résolution angulaire, mais malheureusement les télescopes qui pourraient convenir comptent parmi les plus myopes qui soient, même pour le plus performant d'entre eux, le télescope spatial américain *Fermi*. La recherche d'un excès de photons de haute énergie est à ce jour elle aussi une succession d'espoirs plus ou moins lucides douchés les uns après les autres. Depuis le début des années 2010, plusieurs annonces ont été faites, principalement par l'américain Dan Hooper. Si sa première annonce fut accueillie avec un prudent enthousiasme, son invalidation, suivie de plusieurs autres annonces toutes aussi infondées ont peu à peu convaincu la communauté que Dan Hooper ne voyait probablement que ce qu'il avait envie de voir.

PLUSIEURS ESPOIRS DOUCHÉS

Plus récemment, un autre résultat a été obtenu dans une bande d'énergie jusque-là assez peu explorée, dans le domaine du kiloelectronvolt. Là encore un possible excès à une énergie précise (3,5 keV) avait, pensait-on, été détecté par plusieurs télescopes X, l'europpéen *XMM-Newton* puis le japonais *Hitomi*, entre 2014 et 2016. Était-ce dû à des particules de matière noire de faible masse ou bien à des processus atomiques faisant intervenir du phosphore, du soufre ou du chlore fortement ionisés? Les analyses ont depuis tranché... pas de matière noire.

Qu'en est-il des potentielles paires particule-antiparticule nées de la collision entre deux particules de matière noire? Là encore, n'oublions pas que de l'antimatière peut être produite en faibles quantités par des processus conventionnels. Comme pour la détection de photons énergétiques, celle de l'antimatière ne peut se faire que dans l'espace. En quelques occasions, avec le détecteur PAMELA puis plus récemment avec l'expérience AMS, un début de semblant d'excès d'antimatière sembla se manifester, mais l'information ne fut pas plus confirmée que les autres.

Que penser de tous ces résultats négatifs? Du temps où les wimps apparaissaient, de loin, comme le candidat le plus prometteur, chercher la matière noire s'apparentait à chercher une aiguille dans une botte de foin. Avec la diversification des candidats et des méthodes de détection, il s'agit désormais de chercher une aiguille dans plusieurs bottes de foin, et sans avoir d'idée précise sur la forme, la taille, la composition et la couleur de l'aiguille... et sans même savoir s'il y en a vraiment une à trouver. Une quête vaine et sans espoir? L'optimisme est certainement moins de mise qu'il y a dix ou quinze ans. Que ce soit là un simple passage à vide ou les prémices de l'abandon d'une quête trop ardue pour notre époque reste une question ouverte. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. POUNDS ET AL., An ultrafast inflow in the luminous Seyfert PG1211+143, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 481(2), pp. 1832-1838, 2018.