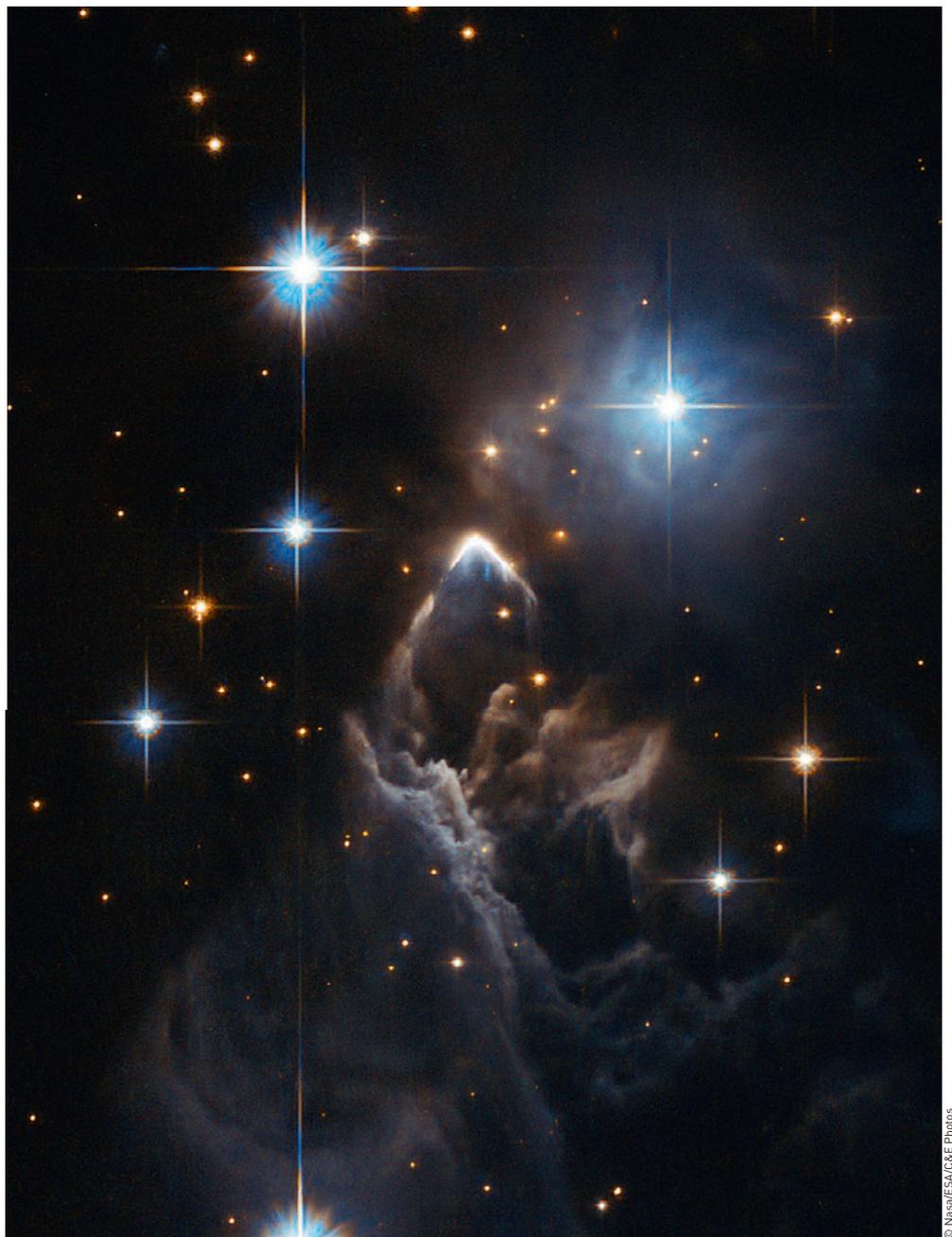


POURQUOI IL FAUT TROUVER LA MATIÈRE NOIRE

Annonces de découvertes, confirmations, démentis : la course à la matière noire s'est nettement accélérée ces derniers mois. Pour les astrophysiciens, il faut la trouver vite ! Car l'enjeu est de taille : conforter le meilleur édifice théorique censé expliquer l'existence d'une mystérieuse masse cachée, omniprésente dans l'Univers.

David Fossé

Évanescente, obscure, insaisissable, la matière noire est beaucoup plus étrange que les nuages sombres qui flottent dans la Galaxie (ci-contre). Selon les physiciens, elle est constituée de particules d'un genre nouveau, qui restent à découvrir.



© Nasa/ESA/C&E Photos

“**S** I d’ici cinq ans nous ne trouvons rien, moi, j’arrête.” L’astrophysicien Pierre Salati ⁽¹⁾ résume en quelques mots l’état d’esprit de beaucoup de ses confrères. Depuis huit décennies les indices s’accumulent en faveur de l’existence d’une masse cachée dans l’Univers. Depuis trente ans, les astronomes peaufinent le portrait-robot de cette “matière noire”, qui leur est désormais indispensable (lire “Les cinq piliers de la matière noire”, p. 28). Mais voilà : leurs moyens de la trouver (voir p. 26) ne sont devenus assez sensibles que depuis peu ! Dans l’espace, sous terre, en Antarctique ou encore à bord de la station internationale, la traque de la matière noire s’est vraiment accélérée depuis seulement un an. “*Nous recherchons des particules nommées wimps*”, précise Éric Aubourg (laboratoire Astroparticules et cosmologie, Paris). Autrement dit, des particules dont la masse est capable d’attirer la matière par sa force de gravité, mais qui n’entrent pratiquement jamais en collision entre elles ni avec la matière ordinaire (celle dont nous sommes faits, ainsi que les étoiles, les planètes, etc.).

© R. Gendler/ESO/NOA/JC&E Photos



Après avoir échoué à trouver la matière noire sous forme d’étoiles obscures et autres trous noirs, les astrophysiciens se sont donc tournés vers l’infiniment petit. La majorité d’entre eux est maintenant convaincue que nous baignons dans un fluide de wimps. L’une de ces particules est leur candidate préférée : le neutralino, la plus légère des particules prédites par la supersymétrie, elle-même issue de notre modèle le plus solide pour décrire le monde des particules.

Invisible mais indispensable

Les scientifiques sont persuadés que, sans matière noire, l’Univers ne serait pas tel qu’il est. “*La matière noire compte pour 80 % du total de la matière dans l’Univers. C’est grâce à son abondance et à sa force d’attraction que la matière ordinaire a pu se rassembler et former les galaxies*”, explique Johann Cohen-Tanugi, du laboratoire Univers et particules de Montpellier. C’est aussi elle qui permet d’expliquer pourquoi les étoiles

des galaxies spirales tournent plus vite qu’elles ne devraient, pourquoi les galaxies dans les amas sont si véloces, ou encore pourquoi ces amas sont des loupes si efficaces pour observer l’Univers lointain (lire p. 28). Autant dire que, s’ils ne la trouvent pas, les astrophysiciens seront sévèrement sonnés...

Maintenant que les diverses méthodes de détection arrivent à maturité, le sprint est lancé. “*Depuis le printemps 2011, la recherche de la matière noire s’est intensifiée*”, raconte Éric Aubourg. Jusqu’alors, seule l’équipe de l’expérience Dama affirmait détecter un signal dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie). Personne n’y croyait vraiment. “*Puis les membres de l’expérience Cogent ont fait une annonce similaire, et les choses se sont emballées.*” Le principe de ces expériences est simple. Si la Voie lactée baigne dans un halo de matière noire, alors le Système solaire doit être balayé par un vent de particules

L’essentiel de la masse contenue dans l’Univers est invisible. Cette galaxie, comme les autres, est enveloppée dans un vaste halo massif de matière noire.

80 %

C’est la proportion de matière noire dans l’Univers. Invisible à nos télescopes, cette “matière noire” ne trahit sa présence que par des effets gravitationnels dus à sa masse. Quelle est sa nature ? Mystère.

Wimp

Cette particule hypothétique est notre meilleure candidate pour la matière noire. Massive, elle peut attirer la matière par sa gravité, mais interagit faiblement avec elle. Wimp (“mauviette” en anglais) est l’acronyme de *weakly interacting massive particle*.

Supersymétrie

Propriété qui découle du modèle actuel de la physique des particules. À chaque particule de matière ordinaire serait associée une particule hypothétique, dite supersymétrique. Le neutralino, un wimp, est l’une d’entre elles.



© D. Fossé/C&E Photos

“ La matière ordinaire a pu se rassembler et former les galaxies grâce à l’abondance et à la force d’attraction de la matière noire ”

JOHANN COHEN-TANUGI
Physicien au Laboratoire Univers et particules de Montpellier

supersymétriques dans son trajet au sein de la Galaxie. Et comme la Terre tourne autour du Soleil, la “force” de ce vent doit varier avec une période d’un an. Précisément, l’expérience Dama enregistre depuis 1998 une variation annuelle de son signal. À la fin de chaque printemps, le taux de collisions de particules sur ses cristaux est 7 % plus élevé que six mois plus tôt. Il y a un an, Cogent a enregistré à peu près le même effet dans sa mine de Soudan (Minnesota). Et depuis, une troisième expérience a détecté elle aussi des collisions suspectes. La matière noire serait-elle enfin tombée dans les filets des physiciens ? Certains d’entre eux le souhaitent si fort qu’ils s’en sont persuadés. Au laboratoire Fermilab (Illinois), Dan Hooper la voit même déjà au cœur de notre

galaxie. Avec son collègue Tim Linden, il a publié en septembre 2011 une analyse des observations du satellite Fermi. L’engin de la Nasa est un excellent chasseur de matière noire car, lorsque deux wimps entrent en collision — un événement rare —, ces particules sont censées émettre des rayons gamma, auxquels est sensible le satellite. Et justement, il y aurait un rayonnement gamma diffus, d’origine inconnue, en direction du centre galactique !

Bizarries dans la Voie lactée

Si l’on accepte qu’il soit dû à l’annihilation de wimps, alors on explique d’un coup deux autres bizarreries du cœur de la Voie lactée, souligne Dan Hooper : l’origine des filaments radio qui le traversent, un vieux mystère, et celle du “brouillard” micro-onde découvert par le satellite WMAP en 2005. L’un comme l’autre seraient liés aux électrons produits eux aussi lors des annihilations. L’idée qu’il existe une accumulation de matière noire au centre de la Voie lactée n’est pas choquante. Les simulations de formation de galaxies montrent même que c’est indispensable. Et pourtant, la majorité des astrophysiciens ne partage pas du tout l’enthousiasme de Hooper... “La direction du centre galactique est peuplée de restes de supernovae, de pulsars et d’étoiles binaires compactes qui sont extrêmement lumineux en rayons gamma”, prévient Johann Cohen-Tanugi.

PORTRAIT-ROBOT DE LA MATIÈRE NOIRE



ELLE EST INVISIBLE car elle n’émet ni n’absorbe de lumière. Excepté dans un cas : lorsqu’elle s’annihile et se transforme en rayons gamma (les puristes préfèrent ainsi parler de matière “sombre”).

+



ELLE POSSÈDE UNE MASSE. Elle est donc capable d’influencer la matière ordinaire par sa force gravitationnelle. Une “masse cachée” dans l’Univers trahit l’existence de la matière noire.

+



ELLE EST CAPABLE DE TRAVERSER la matière ordinaire. C’est un fluide qui nous baigne, mais que nous ne ressentons pas. Les chances pour qu’une particule de matière noire frappe un atome sont infimes.

+



ELLE EST CAPABLE DE SE TRAVERSER elle-même. Les chances pour qu’une particule de matière noire frappe une autre particule de matière noire sont aussi infimes.

+



ELLE SE DÉPLACE LENTEMENT. Bien moins vite, en tout cas, que la lumière. Sinon, par sa gravité, elle aurait gommé les petits grumeaux de l’Univers primordial d’où sont nées les galaxies.

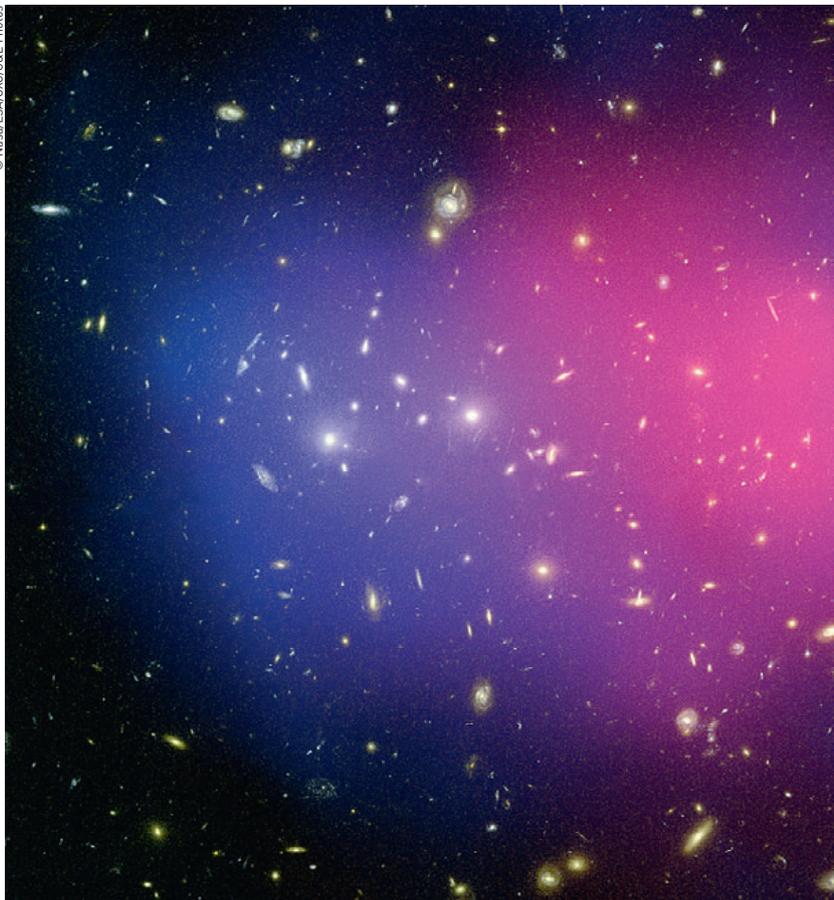


=

WIMP. Les particules répondant à ces critères sont des wimps ⁽¹⁾. Le favori parmi eux est le neutralino.

(1) *Weakly Interacting Massive Particle, ou Particule massive qui interagit faiblement.*

© Nasa/ESA/CXC/C&E Photos



Il suffit de mal prendre en compte ces sources pour se retrouver avec une émission diffuse inexplicable. D'autres observations de Fermi en direction d'une dizaine de galaxies naines contredisent d'ailleurs le chercheur américain. "Ces galaxies sont doublement intéressantes : elles sont composées à 99,9 % de matière noire et elles ne possèdent pas de sources gamma qui pourraient polluer nos observations", explique le Français. Fermi a passé deux ans à les étudier... mais n'a rien vu ! Et puis surtout, les conclusions encourageantes de Dama et de Cogent ont été contestées par deux autres expériences au moins aussi sensibles, Edelweiss 2 et Xenon 100, fragilisant nettement les indices en faveur des wimps.

Les cosmologistes et les astrophysiciens peuvent-ils pourtant faire l'économie de ces particules fugitives ? La plupart pensent que non. Depuis la composition chimique de l'Univers jusqu'au mouvement des étoiles dans les galaxies, il y a trop d'observations en faveur de l'existence de la matière noire. Peut-être aussi ont-ils déjà trop investi dans sa recherche pour la jeter aux orties... Une chose semble certaine en tout cas : si la matière noire est constituée de neutralinos — l'espoir numéro un de la physique ! — "nous le saurons d'ici cinq ans grâce au LHC", souligne Pierre Salati. En 2017, le puissant accélérateur du Cern aura accumulé deux ans de données à pleine puissance. Il aura

réalisé assez de collisions à l'énergie phénoménale de 13 TeV⁽²⁾ pour valider la supersymétrie et créer, s'ils existent, ces fameux wimps après lesquels tout le monde court. Par ailleurs, dans cinq ans, les expériences souterraines seront devenues beaucoup plus sensibles, et Fermi aura accumulé encore plus de mesures.

Mais si rien n'est vu nulle part ? Il y aura à coup sûr une grande vague de découragement... "Chercher sans jamais rien trouver, évidemment ce n'est pas très motivant", confie Johann Cohen-Tanugi. Et comme il n'y aura pas grand monde pour défendre la construction d'une expérience dix fois plus sensible ou dix fois plus puissante — en tout cas, dix fois plus chère —, les astrophysiciens n'auront d'autre choix que de se tourner vers d'autres types de matière noire plus exotiques encore... ou de rejoindre les rangs de ceux qui affirment qu'elle n'existe pas⁽³⁾. Pour Gianfranco Bertone, de l'Institut de physique théorique de l'université d'Amsterdam, ce serait un crève-cœur : "Les wimps sont une façon élégante de résoudre plusieurs problèmes que nous rencontrons en astronomie. Ce serait vraiment dommage qu'une si belle idée ne soit pas validée par la nature."

(1) Du Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules.

(2) Un téraélectronvolt (TeV) vaut 10^{12} eV.

(3) Pour le physicien israélien Mordehai Milgrom, une modification de la loi de gravitation à grande échelle suffit à expliquer les observations attribuées à la matière noire. C'est l'hypothèse Mond.

CHRONOLOGIE

1933 Fritz Zwicky constate que l'amas galactique de Coma est des centaines de fois plus massif que son éclat ne le laisse paraître. Il suggère la présence de matière invisible.

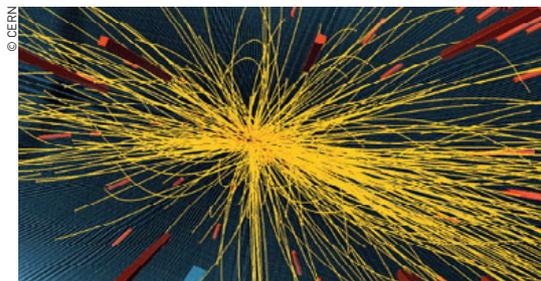
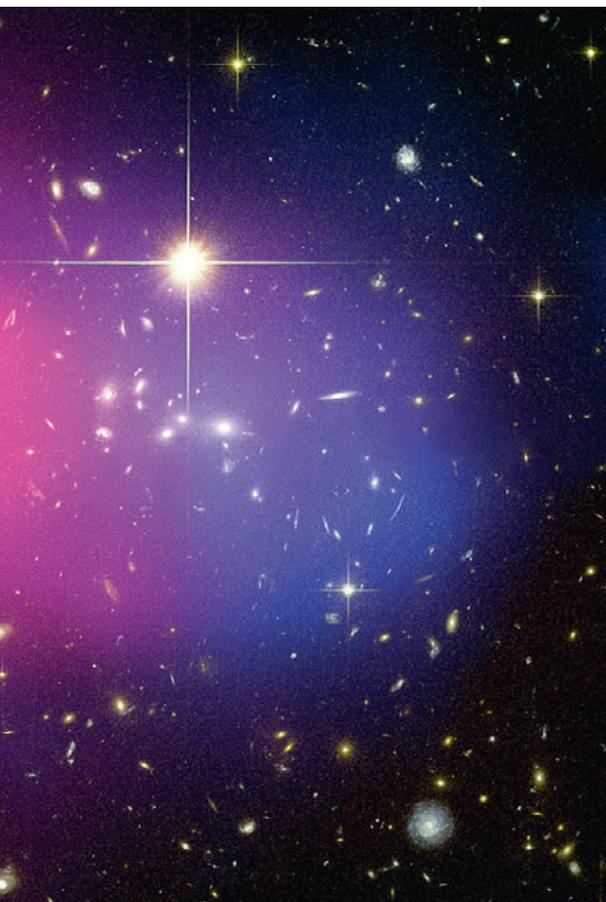
1970 Vera Rubin note que les étoiles de la périphérie de la galaxie d'Andromède se comportent comme si elles baignaient dans un halo massif invisible.

1973 Ramanath Cowsik et John McClelland, les premiers, suggèrent que des particules invisibles constituent l'essentiel de la masse de l'Univers.

1993 Après avoir fouillé le ciel pendant un an, les astronomes de l'expérience Macho annoncent que la matière noire n'est pas constituée de corps célestes sombres.

1998 L'expérience Dama enregistre des collisions, extrêmement rares mais modulées sur un an, comme si la Terre tournait dans un bain de particules furtives... Une première !

2011 Après Dama, les expériences Cogent et Cressit II enregistrent à leur tour un signal. Mais plusieurs autres expériences au moins aussi sensibles font chou blanc.



Lors de la collision de deux amas de galaxies, leur gaz (en rose) s'entrechoque, mais leur matière noire (en bleu) se traverse sans se voir.

Dans le LHC, le plus puissant accélérateur du Cern, une collision à haute énergie de particules ordinaires pourrait faire surgir une particule de matière noire.



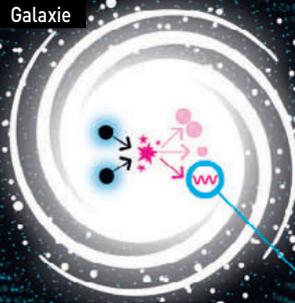
“ Si la matière noire est faite de neutralinos, nous le saurons d'ici cinq ans grâce au grand accélérateur de particules du Cern, le LHC ”

PIERRE SALATI
Astrophysicien au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules

COMMENT DÉTECTER LA MATIÈRE NOIRE

La matière noire est un fluide de particules ? Alors on doit la trouver partout dans l'Univers : dans les galaxies, au cœur des étoiles, dans le Système solaire, et même nous baignons dedans ! Ces particules, les wimps, n'ont toutefois rien à voir avec la matière ordinaire. Elles sont pratiquement insaisissables. Pour les débusquer, les chercheurs utilisent trois types de méthodes : certains tentent d'en déceler l'impact sur les noyaux de matière ordinaire (Xenon 100, par exemple) ; d'autres essaient de voir les produits de leur annihilation (Fermi, AMS, Ice Cube) ; d'autres enfin espèrent les créer en laboratoire (LHC) !

Galaxie



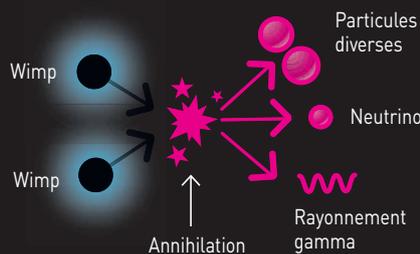
DÉTECTION INDIRECTE DANS LES GALAXIES

Le satellite américain Fermi tente de détecter les rayons gamma produits lors des collisions rarissimes entre particules de matière noire (annihilation). Ses cibles privilégiées : certaines galaxies naines et le cœur de la Voie lactée.

Satellite Fermi



LES TROIS PRODUITS DE LA COLLISION DES WIMPS



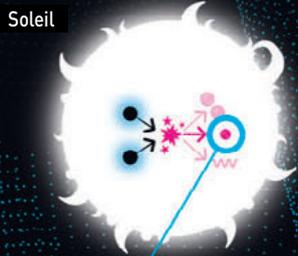
Trajet des neutrinos à travers la Terre

Ice Cube

Détecteur creusé dans la glace de l'Antarctique

**DÉTECTION INDIRECTE
AU CŒUR DU SOLEIL**

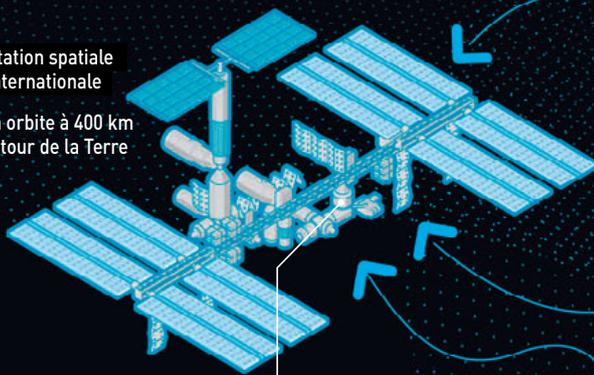
Par sa seule masse, le Soleil a pu capturer de grandes quantités de matière noire pendant ses 4,5 milliards d'années d'existence. Les détecteurs comme Ice Cube peuvent être utilisés pour mettre en évidence les neutrinos produits par l'annihilation de cette matière noire.



**DÉTECTION INDIRECTE
DANS LES RAYONS COSMIQUES**

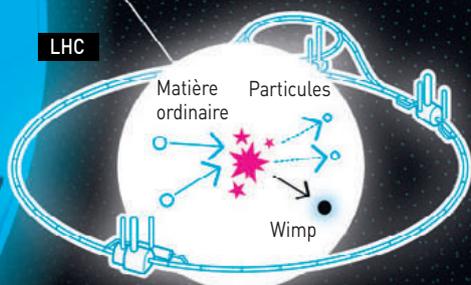
La détection d'un excès de positrons ou d'antiprotons dans le rayonnement cosmique — le flux de particules qui bombarde la Terre — pourrait trahir la matière noire. En effet, ces particules doivent aussi être produites lors de son annihilation.

Station spatiale internationale
En orbite à 400 km
autour de la Terre



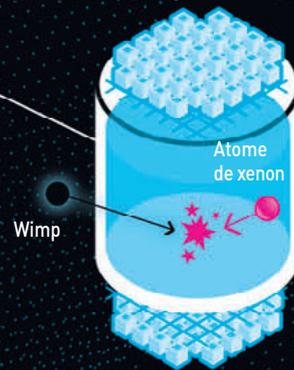
Expérience AMS

LHC



Accélérateur de particules
construit sous la
frontière franco-suisse

Expérience Xenon 100



Expérience
au laboratoire du
Gran Sasso, sous
les Apennins

**DÉTECTION INDIRECTE
DANS LE LHC AU CERN**

Le grand accélérateur construit près de Genève est théoriquement capable de créer des particules de matière noire. Celles, du moins, qui ont aujourd'hui la faveur des physiciens. Elles apparaîtraient comme un déficit inexplicable dans le bilan énergétique d'une collision de particules ordinaires.

**DÉTECTION DIRECTE
EN LABORATOIRE SOUTERRAIN**

Dama, Cogent, Edelweiss, Xenon100 (ci-dessus)... De nombreuses expériences ont été conçues pour enregistrer le choc d'un wimp sur un atome de matière ordinaire. Ces détecteurs souterrains sont particulièrement isolés du rayonnement ambiant car l'événement est rarissime.

LES CINQ PILIERS DE LA MATIÈRE NOIRE

Des particules d'un genre nouveau : c'est ce que doit être la matière noire, insaisissable depuis des décennies. Cette certitude des astronomes repose sur cinq points.

1 LES GALAXIES NE TOURNENT PAS ROND

Depuis les années 1970 et les travaux de l'Américaine Vera Rubin, les astronomes savent que les galaxies tournent sur elles-mêmes plus vite qu'elles ne le devraient. Si leur masse était vraiment celle donnée par leur éclat — donc, si elle n'était que la somme de la masse de leurs étoiles —, leur rotation serait bien plus lente. Par exemple, dans les bras de la galaxie M 33, la vitesse des étoiles est deux à quatre fois plus importante que les modèles ne le prédisent. C'est que cette petite galaxie est beaucoup plus massive qu'on ne le croit !

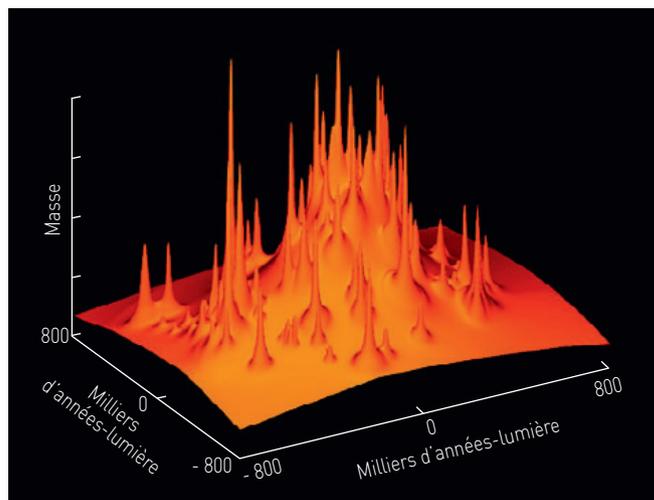
Où se trouve la "masse manquante" des galaxies, comme on l'a appelée jusque dans les années 1990 ? Dans un halo de matière invisible qui

les baigne, expliquent les astronomes. Dans les années 1930, l'existence de cette masse cachée avait déjà été suggérée par Fritz Zwicky. Là encore pour des raisons liées à la dynamique : l'astrophysicien avait remarqué que le déplacement des galaxies dans les amas était trop rapide, compte tenu de la masse estimée de ceux-ci.

Cette masse manquante se trouve-t-elle sous forme d'une multitude d'astres peu lumineux, baptisés machos (acronyme de *massive astronomical compact halo objects*) ? Non, permet de répondre la chasse aux machos menée dans la Voie lactée au cours des années 1990. De tels astres sont trop peu nombreux pour constituer la matière noire.

2 LES AMAS DE GALAXIES SONT DES LOUPES TROP EFFICACES

Nous le savons depuis Albert Einstein : toute masse déforme l'espace-temps. Elle est donc capable d'infléchir le cheminement des rayons lumineux, voire de les concentrer comme une loupe. Cet effet de lentille gravitationnelle nous permet de "peser" les amas de galaxies qui focalisent la lumière d'une source lointaine. Grâce à lui, les astronomes ont pu confirmer dès les années 1980 l'intuition de Fritz Zwicky (voir Chronologie p. 25) : il y a dix fois plus de masse invisible dans les amas de galaxies que de masse visible. Grâce à la puissance de calcul des ordinateurs, on sait même aujourd'hui dessiner la forme de ces concentrations de matière fantôme, en étudiant la façon dont l'image d'une galaxie d'arrière-plan est déformée et amplifiée. De plus, les nuages de gaz chaud qui englobent les amas de galaxies ne suffisent pas pour induire un tel effet. Pas de doute : dans les amas, les galaxies sont plongées dans un bain vaporeux, invisible, mais beaucoup plus massif qu'elles !



La façon dont un amas de galaxies (ci-contre, en jaune) déforme l'image d'une galaxie d'arrière-plan (en bleu) nous renseigne sur la répartition de la masse dans l'amas (ci-dessus). Sur ce graphique, les pics correspondent aux galaxies de l'amas. Surprise : entre ces pics, au centre, apparaît une masse diffuse, invisible sur la photo.



3 LE COSMOS EST PLEIN DE GRUMEAUX

Galaxies, amas, superamas et filaments : l'Univers possède une structure à grande échelle que les relevés comme le Sloan Digital Sky Survey ne cessent de préciser. Comment est-elle apparue ? Sous l'effet d'une part de l'expansion de l'Univers, qui tend à disperser la matière, et d'autre part de la force de gravité de cette matière, qui tend au contraire à la rassembler. En reproduisant l'évolution du cosmos, les simulations numériques indiquent que la force d'attraction de la matière ordinaire ne suffit pas à assembler celle-ci en galaxies et en amas de galaxies. Il leur faut invoquer un supplément de masse, une substance dont la force de gravité a facilité la concentration de la matière ordinaire. Pour expliquer la distribution des galaxies et des amas, cette matière noire doit par ailleurs posséder deux propriétés bien particulières : elle doit être constituée de particules beaucoup moins rapides que la lumière ("froides", dans le jargon des physiciens) et elle doit être insensible aux frottements ("non dissipative"). La première propriété explique pourquoi les galaxies se forment avant les amas. Sans la seconde, les disques des galaxies seraient beaucoup plus nombreux et étendus.

4 IL MANQUE UN INGRÉDIENT DANS LA RECETTE DE L'UNIVERS

Tous les éléments chimiques que l'on rencontre aujourd'hui ont été fabriqués il y a 13,7 milliards d'années, lorsque l'Univers était bien plus chaud, ou sont des descendants directs de ces éléments, recuits dans les étoiles ou le gaz interstellaire. En mesurant l'abondance de certains atomes (par exemple, le deutérium) dans des galaxies de plus en plus lointaines, les cosmologistes ont même pu estimer la densité de toute la matière ordinaire dans l'Univers. Le résultat est problématique : cette densité est sept fois plus faible que la densité de matière déduite de la façon dont se rassemblent les galaxies ! L'existence de la matière noire, différente de toutes les formes de matière connues à ce jour, et qui n'aurait pas été fabriquée dans la même casserole qu'elles, comble naturellement ce hiatus...

Les étoiles et le gaz interstellaire, même peu lumineux, ne comptent que pour 20 % de la matière de l'Univers. La matière noire n'est pas simplement de la matière que l'on ne voit pas. Sa nature est exotique.



© Nasa/ESA/C&E Photos

5 LA CARTE DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE POSSÈDE UNE TEXTURE PARTICULIÈRE

Où que vous regardiez, l'Univers semble baigné dans le rayonnement d'un corps à 3 K (-270 °C). C'est le vestige de la première lumière émise par l'Univers, 380 000 ans après le big bang. À première vue, la température de ce "fond diffus cosmologique" est homogène sur tout le ciel. Mais en réalité, elle présente de toutes petites fluctuations, de l'ordre d'un cent-millième de degré.

Directement liées aux variations de densité de l'Univers primordial, ces fluctuations sont l'eldorado des cosmologistes. Leur taille et leur amplitude montrent que, voici 13,7 milliards d'années, la densité de matière ordinaire du cosmos était six fois plus faible que la densité totale de matière. D'où provient donc la différence ? De la matière noire, assurent les astrophysiciens. ●

ALLER PLUS LOIN

UN PODCAST À ÉCOUTER

"Fermi à la recherche de la matière noire", avec Johann Cohen-Tanugi sur www.cieletespaceradio.fr/mai.849