

DOSSIER POUR LA SCIENCE

GÉOMÉTRIE

Triangle, rectangle, cercle... Ils n'ont pas livré tous leurs secrets.

FRACTALES

À quoi ressemblent-elles ?
transformé en un tore
toutes les longueurs sont
conservées ?

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE - MATHÉMATIQUES - GÉOMÉTRIE - DESIGN - MORPHOGENÈSE - FRACTALES

Quand les MATHS prennent formes

Formes
élémentaires

Fractales

Naissance
des formes

AVANT-PROPOS
DE **CÉDRIC
VILLANI**



N° 91 Avril-Juin 2016

pouirlascience.fr

BEL : 8,5 € - CAN : 12,5 \$ CAD - DOMS : 1,9 € - ESP : 1,5 € - FR : 7,50 € - GR : 1,5 € - IRL : 1,5 € - IT : 1,5 € - JAP : 1,5 € - KOR : 1,5 € - LUX : 1,5 € - MAR : 1,5 € - MEX : 1,5 € - NED : 1,5 € - NOR : 1,5 € - POL : 1,5 € - PRT : 1,5 € - RUS : 1,5 € - SLO : 1,5 € - SWE : 1,5 € - SWI : 1,5 € - TUR : 1,5 € - UK : 1,5 € - USA : 1,5 \$

N° 91 - 120 pages - prix de vente : 7,50 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

LES MULTIPLES VISAGES DE LA MATIÈRE NOIRE

Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?



LA GALAXIE D'ANDROMÈDE, comme la plupart des galaxies spirales, tourne trop vite sur elle-même pour que la force gravitationnelle due à sa matière visible assure sa cohésion. Pour expliquer cette rotation rapide, les physiciens supposent que la galaxie est pimbée d'un halo sphérique de matière noire, une substance abondante dans l'Univers mais qui échappe à toute détection directe.

L'ESSENTIEL

- Les physiciens pensent que l'Univers contient de grandes quantités de matière noire.
- La recherche de matière noire s'est fondée sur des modèles à un seul type de particules, mais celles-ci restent indétectées.
- La matière noire pourrait contenir plusieurs types de particules interagissant à peine avec la matière ordinaire, ce qui expliquerait l'absence de détection.
- Dans certains scénarios, la matière noire formerait par exemple des « atomes », ou un disque à l'échelle de la galaxie.

La galaxie d'Andromède, notre voisine céleste, recèle un mystère. Elle tourne trop vite sur elle-même pour que les lois connues de la physique en maintiennent la cohésion. La gravité engendrée par la matière visible de la galaxie est trop faible pour retenir les étoiles à sa périphérie qui, filant à toute vitesse, devraient être projetées hors de la galaxie. Si la matière existante se résumait à la matière visible, Andromède, comme presque toutes les galaxies spirales, ne devrait tout simplement pas exister.

Les cosmologistes pensent qu'un type de matière invisible – de la « matière noire » – entoure et imprègne Andromède et les autres galaxies, apportant le supplément de force gravitationnelle nécessaire pour en maintenir la cohésion. Cette matière noire représenterait plus de 80 % de la matière contenue dans l'Univers.

Dans les théories les plus simples, la matière noire est composée d'un unique type de particules, qui reste à identifier. Mais en dépit de décennies de recherche, personne n'a pu obtenir de preuve directe de l'existence de la matière noire. De plus, quelques désaccords subsistent entre les observations astronomiques et cette théorie simple. Combinés, ces désaccords résiduels et l'échec de la détection de cette substance insaisissable amènent certains scientifiques à remettre en cause la piste d'un seul type de matière noire. En effet, l'absence de détection est une information en soi, dont on déduit des limites sur certaines propriétés de la matière noire. Par exemple, l'absence de signal permet de calculer une limite supérieure à la probabilité d'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire. Ces limites sont de plus en plus sévères et d'autant moins compatibles avec un modèle de matière noire à un seul type de particules.

Certains physiciens explorent des scénarios qui se dispensent de matière noire. Par exemple, ils étudient des théories où les lois de la gravitation sont modifiées et dont le comportement s'écarte de la mécanique newtonienne pour des accélérations extrêmement faibles (et non testées en laboratoire), comme dans les régions périphériques des galaxies. Cette approche reproduit de façon satisfaisante la rotation des galaxies spirales. Mais elle a ses défauts et requiert, par exemple, l'ajout de matière invisible pour décrire la dynamique des amas de galaxies.

De nombreux physiciens restent convaincus par l'hypothèse de la matière noire car

elle explique une grande variété d'observations astronomiques et cosmologiques : le mouvement des galaxies au sein des amas galactiques, la distribution de la matière à l'échelle de l'Univers, la dynamique de la matière lors d'une collision de deux amas ou le phénomène de lentilles gravitationnelles (l'amplification de la lumière émise par une source lointaine grâce à la déformation de l'espace-temps par la présence d'un objet massif dans la ligne de vue).

Dès lors, si l'hypothèse de la matière noire semble fondée, mais que le scénario à un seul type de particules n'est pas satisfaisant, il faut envisager que la matière noire puisse être plus complexe. Après tout, la matière ordinaire se présente bien sous de nombreuses formes – peut-être la matière noire est-elle tout aussi riche.

Ces dernières années, des physiciens ont envisagé cette possibilité. Cela pourrait s'accompagner d'un nouveau type de forces jusque-là insoupçonnées, agissant fortement sur la matière noire et très faiblement (ou pas du tout) sur la matière ordinaire. Des observations récentes de collisions de galaxies apportent peut-être un soutien préliminaire à cette hypothèse. De tels modèles expliqueraient de façon plus naturelle l'absence de signaux de la matière noire dans les différentes expériences actuelles et proposent des solutions à certaines difficultés théoriques posées par les modèles simples. Si la matière noire complexe existe, l'Univers est alors encore plus riche et fascinant que ne l'imaginaient les cosmologistes.

La part cachée de l'Univers

Bien que nous ne sachions pas encore de quoi est constituée la matière noire, nous en déduisons certaines propriétés grâce à son influence sur la matière ordinaire, par des observations ou des simulations numériques. Par exemple, les particules qui composent la matière noire sont probablement assez lourdes. Des particules de matière noire légères fileraient à une vitesse proche de celle de la lumière et ne se seraient pas accumulées dans des régions de l'Univers primordial qui sont à l'origine des grandes structures observées aujourd'hui.

Parce qu'elles n'absorbent pas de rayonnement électromagnétique et n'en émettent pas, elles doivent être électriquement neutres. Elles ne sont pas non plus

sensibles à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques ; si cela avait été le cas, nous en aurions vu des signes dans l'interaction de la matière noire avec les particules chargées de haute énergie que sont les rayons cosmiques. La matière noire pourrait cependant interagir avec la matière ordinaire *via* l'interaction faible, mais les expériences montrent que si de telles interactions sont possibles, elles sont extrêmement rares.

Nous savons aussi que la matière noire est stable aux échelles de temps cosmiques : elle ne se désintègre pas. En effet, la totalité de la matière noire a été produite dans les premiers instants du Big Bang, car nous ne connaissons pas de mécanisme qui aurait pu en produire en grande quantité depuis cette époque. Or, en principe, une particule massive se désintègre plus ou moins vite en particules plus légères. Si elle ne le fait pas, c'est qu'une certaine grandeur associée à cette particule doit être « conservée » (elle ne peut pas varier).

Illustrons ce principe avec l'électron. Il est électriquement chargé, et les seules particules plus légères connues, le neutrino et le photon, sont électriquement neutres. Des considérations énergétiques permettraient à l'électron de se désintégrer en ces particules, mais la conservation de la charge interdit de telles désintégrations. L'électron est, de fait, stable.

Dans la plupart des théories, les particules de matière noire ont une quantité conservée nommée « parité » qui vaut -1 , tandis que les autres particules connues ont une parité de $+1$. La désintégration d'une particule de matière noire en particules ordinaires ne conserverait pas la parité : la particule de matière noire est donc stable.

La théorie la plus simple, et satisfaisant à toutes les conditions listées ci-dessus, postule un unique type de particules formant la matière noire, le « wimp » (pour *weakly interacting massive particle*, soit particule massive interagissant faiblement). Le terme de « faiblement » est utilisé ici au sens large, et ne se réfère pas seulement à l'interaction faible. Plusieurs arguments théoriques sont en faveur de l'hypothèse des wimps (par exemple, la production de matière noire estimée dans les premiers instants de l'Univers est du même ordre de

■ LES AUTEURS



Bogdan DOBRESCU est physicien des particules au Fermilab, aux États-Unis.

Don LINCOLN est chercheur au Fermilab et travaille sur les données du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern.

grandeur que le recensement qu'on en fait dans l'Univers actuel). Mais si les wimps existent, leur détection semble plus difficile que les physiciens ne s'y attendaient.

Depuis les années 1990, les physiciens ont mis en place de nombreuses expériences pour détecter les wimps par le biais de leurs très rares interactions avec la matière ordinaire. Afin de parvenir à la sensibilité nécessaire, les détecteurs sont refroidis à des températures très basses et installés sous terre pour les protéger des rayons cosmiques. Malgré des expériences de plus en plus précises, aucun signe concluant de wimps n'a émergé. On peut supposer que les interactions sont si rares qu'elles restent en deçà du seuil de détection des expériences, mais de telles caractéristiques ne s'accordent pas de façon naturelle avec le modèle des wimps.

Par ailleurs, ce modèle prévoit que les petites galaxies satellites en orbite autour de la Voie lactée devraient être bien plus nombreuses que celles observées. Cependant, la situation évolue rapidement ; la découverte récente par la collaboration DES (*Dark Energy Survey*) de galaxies satellites supplémentaires suggère que les galaxies naines de la Voie lactée n'auraient tout simplement pas encore été trouvées.

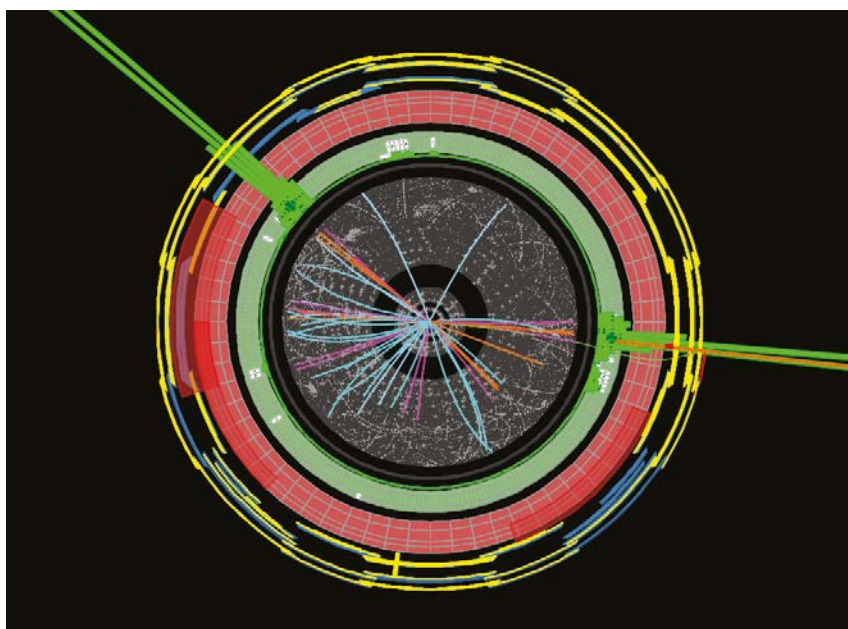
Pour expliquer de façon plus naturelle la non-détection de matière noire, certains physiciens ont commencé à explorer des modèles de matière noire moins classiques. Une piste consiste à supposer qu'il existe plus d'un type de particules de matière noire et que celles-ci seraient sensibles à une force qui n'agirait pas sur la matière ordinaire.

Dans ces modèles, ces particules porteraient, par exemple, un nouveau type de « charge sombre », attractive ou répulsive tout en les laissant électriquement neutres.

De la même façon que les particules ordinaires dotées d'une charge électrique peuvent émettre des photons (les particules de lumière, vectrices de l'interaction électromagnétique), ces hypothétiques particules dotées de cette charge sombre pourraient émettre des « photons sombres ».

On retrouve des lois qui rappellent celles de la matière ordinaire sans pour autant en être une réplique exacte. Par exemple, l'échange de photons noirs entre particules

La matière
noire, dans certains
modèles, formerait
**des sortes
d'atomes**
qui échangeraient
des photons
sombres



L'EXPÉRIENCE ATLAS DU LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, pourrait détecter des signaux (tels ci-dessus) trahissant la production de particules de matière noire et confirmer ou infirmer des modèles théoriques postulant l'existence de photons sombres.

de matière noire doit être moins fréquent que l'échange de photons pour la matière ordinaire. L'une des raisons est la suivante. Au sein de la matière ordinaire, l'émission de photons permet aux particules d'échanger de l'énergie. Cela a une conséquence importante sur la formation des galaxies. Les nuages de gaz au sein d'une galaxie en formation rayonnent de l'énergie, ce qui a pour effet d'agréger la matière au sein des nuages. La conservation du moment cinétique (qui mesure une rotation) empêche la matière de se contracter jusqu'à un certain point, et la structure forme un disque. Si les particules de matière noire émettaient des photons sombres comme la matière ordinaire échange des photons, on aurait aussi des disques de matière noire. Or pour expliquer la forme des galaxies, la matière noire devrait être plutôt distribuée sous la forme d'un nuage sphérique, le « halo ».

Avec des échanges de photons noirs limités, la perte d'énergie du halo de matière noire serait minime. On peut cependant imaginer des modèles où une petite fraction de la matière noire échange des photons noirs en grande quantité, tandis que la majeure partie se comporterait plutôt comme de simples wimps. Les théoriciens, dont l'un de nous (Bogdan Dobrescu), étudient ces différentes possibilités en prenant en compte les limites imposées par les expériences actuelles. L'un des scénarios les plus simples implique deux

sortes de particules de matière noire et offre un aperçu de la physique qui pourrait être à l'œuvre dans ce domaine.

Imaginez un univers où il existe une particule avec une charge sombre positive et son homologue de charge négative. Dans ce modèle, il y aurait une forme d'électromagnétisme sombre, conduisant les particules de matière noire à émettre et absorber des photons sombres. Et de la même façon qu'une particule de matière ordinaire et son homologue d'antimatière, de charge opposée, s'annihilent en libérant des photons, deux particules de matière noire de charges sombres opposées s'annihileraient en photons sombres.

Le côté obscur des photons

Comme nous l'avons vu, ces échanges de photons sombres influeraient sur la forme des galaxies. Les physiciens utilisent ces contraintes pour estimer l'intensité de l'interaction électromagnétique sombre et la fréquence à laquelle se produit l'annihilation de la matière noire. Cette interaction ne doit pas être trop forte pour maintenir un halo sphérique autour des galaxies. En 2009, Lotty Ackerman, Matthew Buckley, Sean Carroll et Marc Kamionkowski, tous alors à l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette contrainte implique que la charge liée à l'interaction

sombre doit être très petite, environ 1 % de la valeur de la charge électrique.

Jusqu'à présent, nous avons décrit une version de la matière noire comportant simplement une particule sombre chargée et son homologue de charge opposée, qui échangent des photons sombres. Ce scénario reste simple comparé à la complexité de la matière ordinaire. À quoi ressemblerait un univers de matière noire avec plus de particules dotées de charges sombres ?

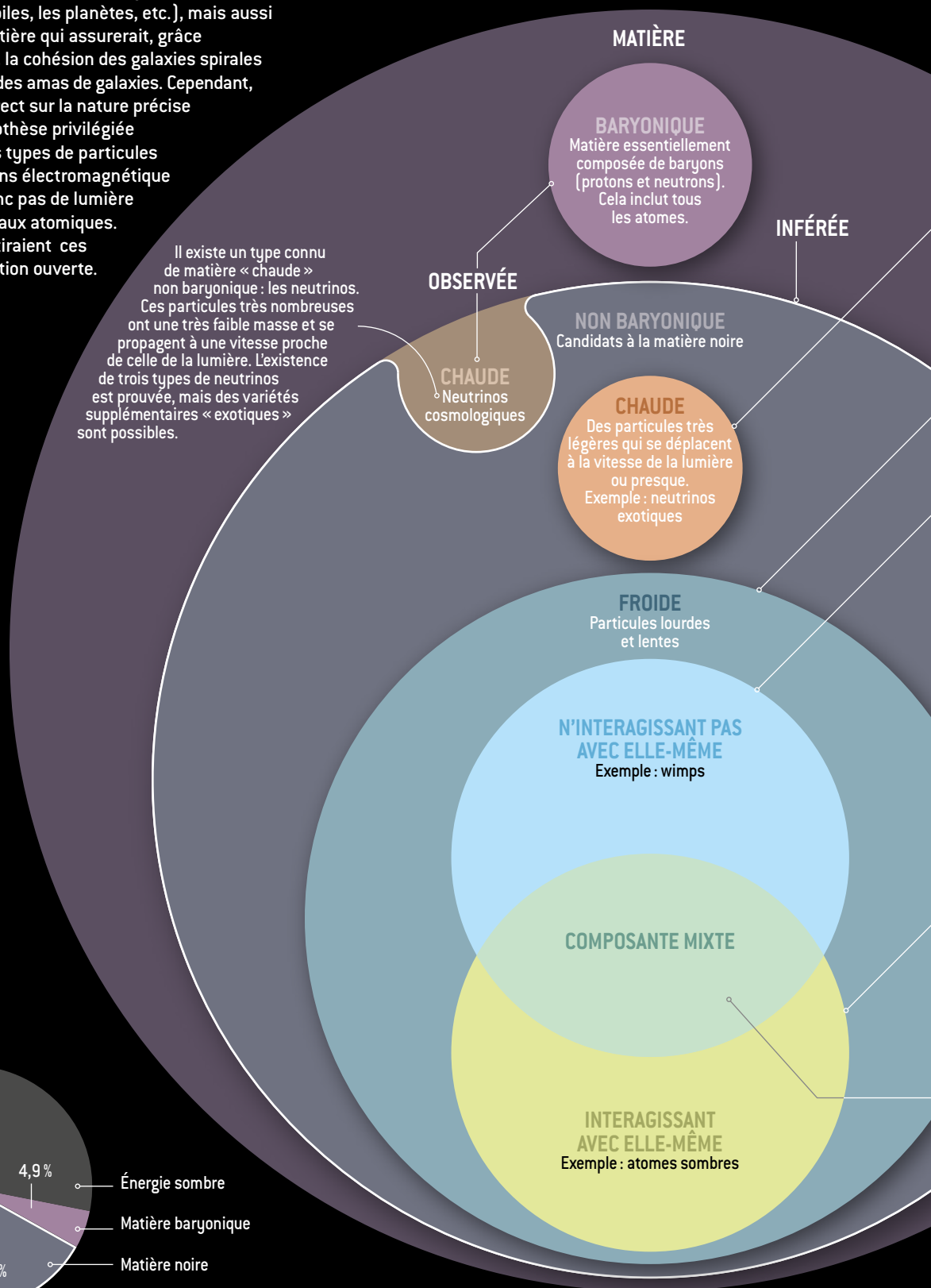
Un exemple intéressant a été proposé en 2013 à l'université Harvard par Jiji Fan, Andrey Katz, Lisa Randall et Matthew Reece. Ces chercheurs ont développé un scénario de « matière noire interagissant partiellement ». Ils ont supposé que l'essentiel de la matière noire était constitué de wimps, et qu'une petite composante comprenait deux types de particules, les unes lourdes et les autres légères. En outre, à l'instar des protons et des électrons, ces particules porteraient une charge sombre et échangeraient des photons sombres.

Il faut se garder de surinterpréter la correspondance, mais la situation proposée revient, à peu de chose près, à postuler un proton et un électron sombres, ainsi qu'un photon sombre pour porter l'électromagnétisme sombre qui les lie. Il n'est pas exclu que ces particules sombres se combinent pour créer des atomes sombres ou même des molécules sombres, avec toute une chimie associée.

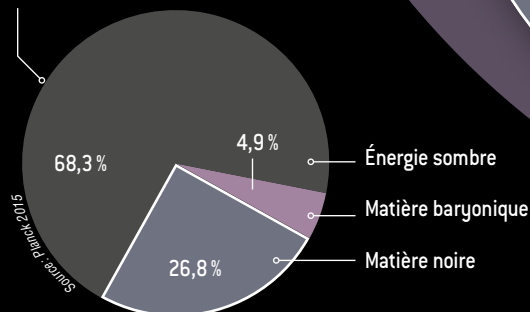
Les auteurs de ce modèle ont calculé une limite supérieure à la fraction de matière noire qui pourrait interagir avec les photons sombres, au regard des contraintes imposées par les observations astronomiques. Ils ont déterminé que cette part de la matière noire aurait une masse globale comparable à celle de toute la matière visible. Dans ce modèle, la Galaxie aurait trois composantes : un grand nuage sphérique de particules de type wimps, qui représente 70 % de toute la matière, et deux disques aplatis, contenant chacun 15 % de la matière, l'un en matière ordinaire (la Voie lactée que nous voyons, par exemple), l'autre en matière noire interagissant fortement avec elle-même. Les deux disques seraient alignés ou à peine inclinés l'un par rapport à l'autre. Ainsi, une « galaxie » de matière noire coexisterait dans le même espace que la Voie lactée. Cependant, dans cette galaxie sombre, la matière noire ne formerait ni étoiles sombres ni grosses planètes sombres. En effet, de tels objets massifs seraient aisément détectés

Le cosmos contiendrait de la matière « baryonique » ordinaire (celle qui compose les étoiles, les planètes, etc.), mais aussi une forme invisible de matière qui assurerait, grâce à la force gravitationnelle, la cohésion des galaxies spirales en rotation rapide et celle des amas de galaxies. Cependant, il n'existe aucun indice direct sur la nature précise de la matière noire. L'hypothèse privilégiée est celle d'un ou plusieurs types de particules insensibles aux interactions électromagnétique et forte, et n'émettant donc pas de lumière et ne se liant pas aux noyaux atomiques. La forme exacte que revêtiraient ces particules reste une question ouverte.

Il existe un type connu de matière « chaude » non baryonique : les neutrinos. Ces particules très nombreuses ont une très faible masse et se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière. L'existence de trois types de neutrinos est prouvée, mais des variétés supplémentaires « exotiques » sont possibles.



La masse étant reliée à l'énergie par la formule d'Einstein $E = mc^2$, l'énergie totale de l'Univers inclut la matière baryonique, la matière noire et l'énergie sombre, tenue pour être à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers.



LA MATIÈRE NOIRE DANS TOUS SES ÉTATS

CHAUDE

Si les particules de matière noire étaient rapides, elles ne se seraient jamais suffisamment agrégées pour former les nuages sphériques, ou halos, qui ont donné naissance aux galaxies individuelles. Cela n'exclut pas qu'une petite fraction de la matière noire totale puisse quand même être chaude.

FROIDE

Des particules de matière noire lentes rendent mieux compte des galaxies et de la distribution de la matière observée dans l'ensemble de l'Univers. Au moins 95 % de la matière noire est probablement froide.

N'INTERAGISSANT PAS AVEC ELLE-MÊME

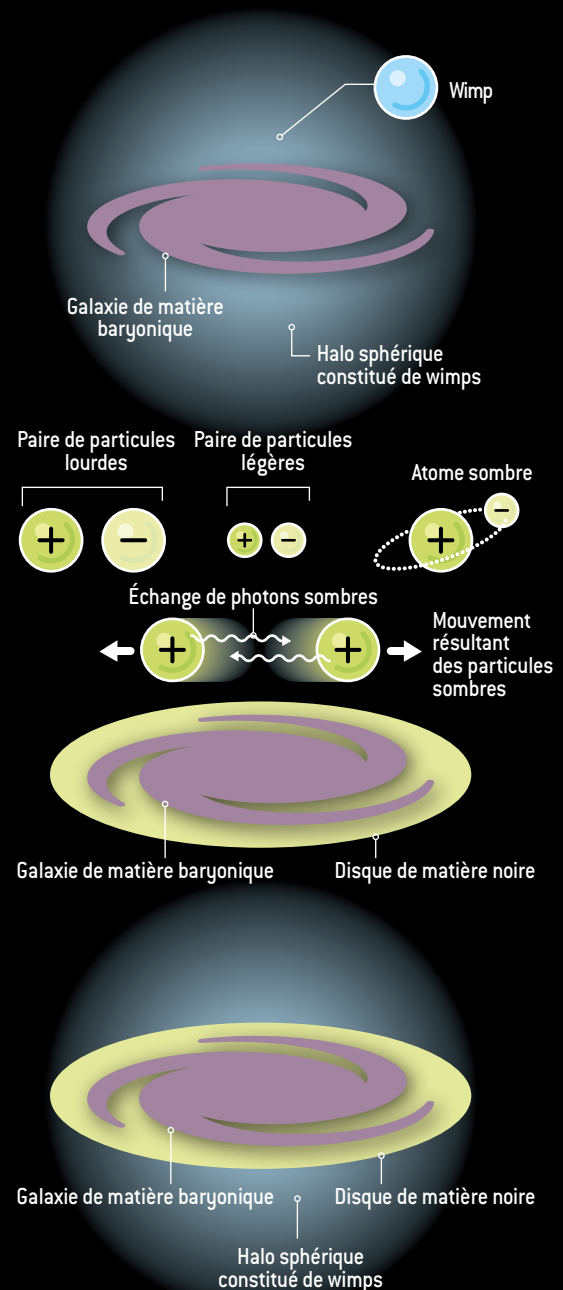
La forme la plus simple de particule de matière noire froide est une « particule massive interagissant faiblement », ou wimp, qui n'interagit que rarement voire jamais avec d'autres particules de sa propre espèce ou de matière ordinaire. Les wimps se rassemblent en halos sphériques qui attireraient la matière baryonique ordinaire par la force gravitationnelle et formeraient ainsi des galaxies.

INTERAGISSANT AVEC ELLE-MÊME

Si la matière noire interagit avec elle-même, elle doit le faire par l'intermédiaire d'une nouvelle force qui n'agit pas sur la matière baryonique. Cette interaction pourrait être une sorte d'électromagnétisme sombre : les particules portent une charge sombre, soit positive soit négative, et interagissent en échangeant des particules vectrices de l'interaction, les photons sombres. L'électromagnétisme sombre pourrait concerner de multiples types de particules sombres (certaines lourdes, d'autres légères) qui s'attirent les unes les autres et adoptent des configurations rappelant des atomes. Cette composante de la matière noire formerait, au sein des galaxies, un disque se superposant au disque à bras spiraux formés par la matière baryonique.

COMPOSANTE MIXTE

La matière noire pourrait être un mélange de deux types de particules froides, certaines n'interagissant pas avec elles-mêmes (comme des wimps) et d'autres interagissant avec elles-mêmes. Cela se traduirait à la fois par un halo sphérique de wimps autour des galaxies et un disque aplati de particules en auto-interaction.



par des effets de lentille gravitationnelle: en courbant localement l'espace-temps, ces astres sombres dévieraient la lumière qui nous parvient depuis des étoiles de matière ordinaire.

L'hypothèse d'un secteur sombre complexe offre de riches possibilités avec des conséquences astrophysiques intéressantes, mais comment tester ces modèles? Les physiciens recherchent la matière noire complexe de la même façon que les wimps: à l'aide de détecteurs souterrains. Un modèle où la matière noire interagit partiellement, tel celui proposé par Jiji Fan et ses collègues, présente un intérêt particulier pour les expériences de détection directe: le disque de matière noire situé dans le même plan que celui de la Voie lactée se traduit par une densité de matière noire plus importante que dans le simple modèle des wimps. Cela impliquerait des chances de détection plus élevées, même si l'absence de signal montre que cette probabilité est malgré tout très faible.

Outre les expériences de détection directe, les physiciens espèrent créer de la matière noire dans les accélérateurs de particules. Comme ils ont peu d'indications sur la façon dont la matière noire interagit avec

la matière ordinaire (et donc sur les processus spécifiques susceptibles d'en fabriquer dans l'accélérateur), ils étudient aussi bien des modèles à simples wimps que ceux à secteur sombre plus complexe.

Produire de la matière noire au LHC

Le LHC (grand collisionneur de hadrons) du Cern, près de Genève, est l'accélérateur le plus puissant du monde et peut donc sonder des scénarios à versions lourdes de la matière noire (plus une particule est massive, plus il faut d'énergie pour la produire dans un accélérateur). Ces particules de matière noire ne seraient pas directement visibles dans les détecteurs du LHC, car elles traverseraient les capteurs sans interagir. Les physiciens tentent de déduire leur présence de façon indirecte. Comme l'énergie est conservée, les chercheurs comparent l'énergie de la collision à celle de toutes les particules produites par la collision. S'il manque de l'énergie dans le bilan, c'est peut-être qu'une particule de matière noire non détectée a emporté l'énergie qui fait défaut. Une perte d'énergie peut avoir d'autres explications: une particule qui passe entre

les détecteurs, un neutrino qui n'interagit que rarement... Il n'est donc possible de conclure qu'en analysant un grand nombre de collisions. Concrètement, les physiciens calculent combien de collisions produisent une signature particulière d'énergie manquante, avec ou sans la présence de matière noire, et comparent aux données.

Jusqu'à présent, aucun signe de matière noire n'a été identifié au LHC, ce qui indique que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont très rares, si toutefois il s'en produit. Le LHC continue de prendre des données à plus haute énergie, ce qui augmente nos chances de découvrir un jour la matière noire.

Dans les expériences de détection directe et de production au LHC, les physiciens font l'hypothèse que les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire sont beaucoup plus fortes que la gravitation (la plus faible de toutes les interactions), mais assez faibles pour ne pas encore avoir été observées. Cette hypothèse est nécessaire, car si la matière noire n'interagit que de façon gravitationnelle – dans cette éventualité, on parle parfois de «superwimps» –, nous ne l'observerons jamais dans ces expériences.



DANS LA TRAQUE DE LA MATIÈRE NOIRE, l'expérience *Xenon1T* est l'une des plus sensibles. Inaugurée fin 2015, elle est composée d'une cuve [représentée à gauche, au centre de l'affiche montrant l'intérieur de la structure] contenant près de une tonne de xénon liquide.

Si une particule de matière noire entre en collision avec un atome de xénon, elle déclenche un signal enregistré par des capteurs. Si cette expérience ne détecte pas de matière noire, il en résultera des contraintes fortes sur les propriétés de cette dernière.

En plus des recherches de matière noire que nous venons de décrire, et qui conviennent à la fois pour trouver des wimps et de la matière noire complexe, certaines approches visent plus spécifiquement le secteur sombre complexe. Celles-ci ciblent en particulier le photon sombre qui, dans certains modèles, peut spontanément se transformer en photon ordinaire et se retransformer en photon sombre en vertu des lois de la physique quantique. Or le photon ordinaire est détectable.

De plus, si le photon sombre a une masse non nulle (le terme de « photon » est alors un peu abusif puisqu'un photon n'a *a priori* pas de masse), le photon ordinaire produit peut avoir assez d'énergie pour créer une paire constituée d'un électron et de son homologue d'antimatière, le positron, ou une paire muon-antimuon (le muon étant un cousin, plus lourd, de l'électron).

Partant de ce scénario, plusieurs collaborations expérimentales, dont une à laquelle participe l'un de nous (Don Lincoln), étudient la production de paires électron-positron ou muon-antimuon dans des accélérateurs de particules. Si des photons sombres existent et interviennent dans le processus, les caractéristiques des paires seront altérées. Des études de ce genre sont en cours au LHC et dans d'autres accélérateurs, tel le projet *KLOE-2*, en Italie, les expériences *HPS* et *BaBar*, aux États-Unis.

Le Fermilab, près de Chicago, offre une autre piste intéressante. Les physiciens y produisent actuellement des faisceaux intenses de neutrinos dirigés vers des détecteurs lointains. Les neutrinos sont des particules très légères, qui interagissent avec les électrons des détecteurs par l'interaction faible (en échangeant un boson *W*). Il est possible de calculer la probabilité d'interaction selon ce processus. Mais, si les photons sombres existent, les neutrinos interagissent aussi avec les électrons du détecteur en échangeant un photon sombre. Et cela modifie les probabilités d'interaction. Il serait possible de mesurer ces interactions neutrino-électron dans les détecteurs *MiniBooNE*, *MINOS* ou *NOvA* du Fermilab.

Enfin, les scientifiques recherchent des indices astrophysiques de l'interaction de la matière noire dans des situations telles que les collisions de galaxies. Quand la matière noire d'une galaxie heurte celle d'une autre galaxie, les particules devraient se repousser en échangeant des photons

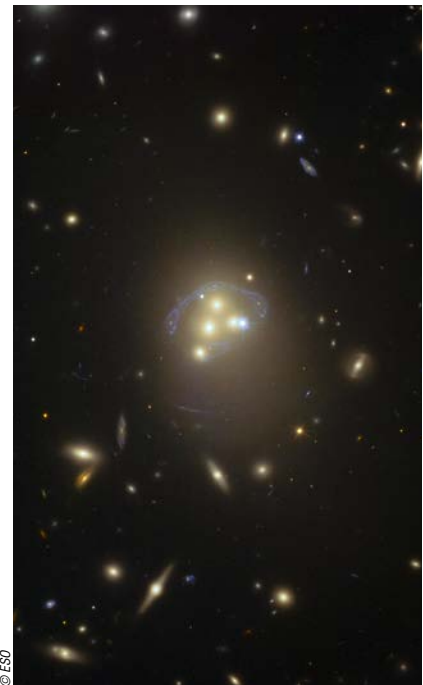
sombres. Plusieurs études de collisions de galaxies n'ont pas permis de trouver d'indices de ce phénomène, mais, en 2015, l'observation de l'amas Abell 3827, particulièrement proche de la Terre et bien orienté, a suggéré un tel motif. C'est un premier indice en faveur d'une matière noire complexe, mais des observations complémentaires de ces galaxies et d'autres seront nécessaires pour le confirmer.

Nous sommes indiscutablement confrontés à une énigme profonde. À grande échelle, de nombreuses observations s'expliquent par la présence de matière noire, sous une forme ou sous une autre. L'échec de la détection directe de matière noire souligne l'urgence qu'il y a à identifier la nature de la matière noire. Là où les modèles de wimps ont du mal à expliquer cette non-détection, les modèles complexes s'en accommodent plus naturellement, dans la mesure où ils reposent sur un nombre plus grand de paramètres à ajuster.

Épicycles du XXI^e siècle ?

On pourrait adresser une critique à cette approche : on se donne beaucoup de mal à maintenir en vie l'hypothèse de la matière noire. La situation est-elle analogue à celle des épicycles, quand les astronomes du XVI^e siècle tentaient à tout prix de sauver le géocentrisme en ajoutant une série constante d'ajustements à une théorie fatalement défectueuse ? Ce n'est pas notre avis : la matière noire explique remarquablement bien de nombreuses énigmes astronomiques, et il n'y a *a priori* pas de raison pour que la matière noire soit aussi simple que dans le modèle des wimps – le plus répandu car le plus simple à étudier.

Par ailleurs, les modèles de matière noire complexe apportent des solutions à certaines difficultés théoriques des wimps. Par exemple, dans les simulations numériques de formation des galaxies, les modèles de wimps prévoient des halos ayant une densité très élevée au centre, ce qui ne s'accorde pas avec les observations. Les modèles de matière noire complexe aplanissent, eux, la distribution au centre. Il y a donc plus d'un intérêt à explorer ces modèles complexes. En outre, tant que nous ne trouverons pas la solution au mystère de la composition du cosmos, nous devons être ouverts à la multitude d'explications possibles. ■



LES QUATRE GALAXIES au sein de l'amas Abell 3827 sont entrées simultanément en collision. Les halos de matière noire ne devraient pas être perturbés par cette rencontre si la matière noire n'interagit pas avec elle-même autrement que par la force gravitationnelle. Or une équipe d'astrophysiciens aurait trouvé des signes d'une telle interaction. Des indices à confirmer.

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Freese, *The cosmic cocktail : Three parts dark matter*, Princeton University Press, 2014.

JiJi Fan *et al.*, *Dark-disk universe*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110(21), article 211302, 2013.

J. Feng et M. Trodden, *Matière noire, un univers caché*, *Pour la Science*, n° 399, janvier 2011.

D. E. Kaplan *et al.*, *Atomic dark matter*, *JCAP*, vol. 2010(5), article 21, 2010.

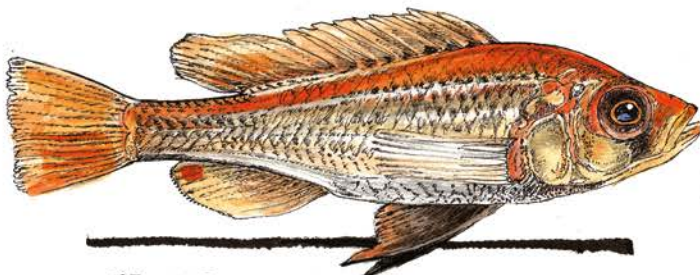
L. Ackerman *et al.*, *Dark matter and dark radiation*, *Phys. Rev. D*, vol. 79(2), article 023519, 2009.

Cichlidés

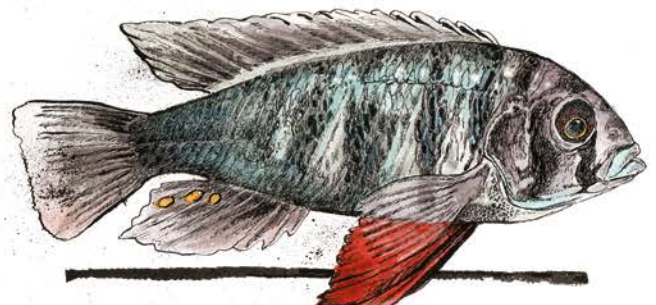
les clés d'une
spectaculaire
évolution

Axel Meyer

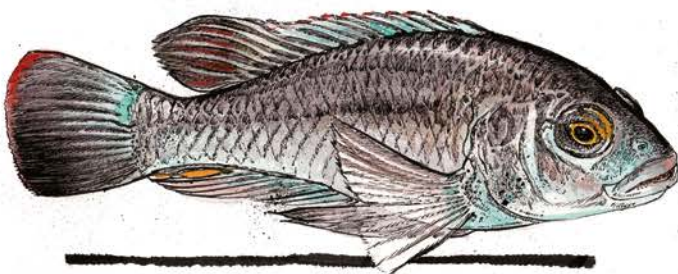
Les poissons cichlidés comptent plus de 2 500 espèces, dont beaucoup sont apparues en moins de 15 000 ans. Chez les vertébrés, il s'agit d'un record absolu, dont les ressorts sont tapis dans le génome.



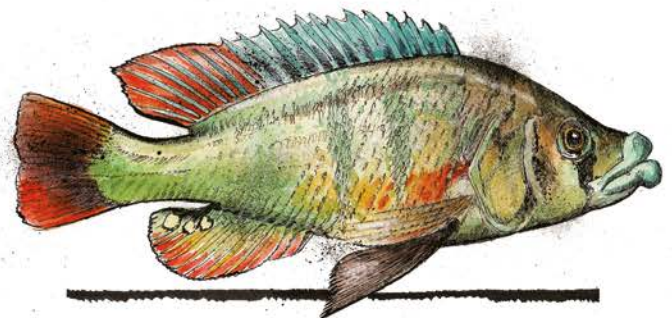
Yssichromis pyrrhocephalus



Neochromis omnicaeruleus



Macropodus bicolor



Paralabidochromis chilotes

UNE EXTRAORDINAIRE VARIÉTÉ
de poissons cichlidés vit dans le lac
Victoria, en Afrique de l'Est. On estime
que les quelque 500 espèces,
dont une poignée de représentants
sont illustrés ici, sont apparues
au cours des 15 000 dernières
années – une période
remarquablement courte
à l'échelle de l'évolution.

