

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

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

■ LES AUTEURS

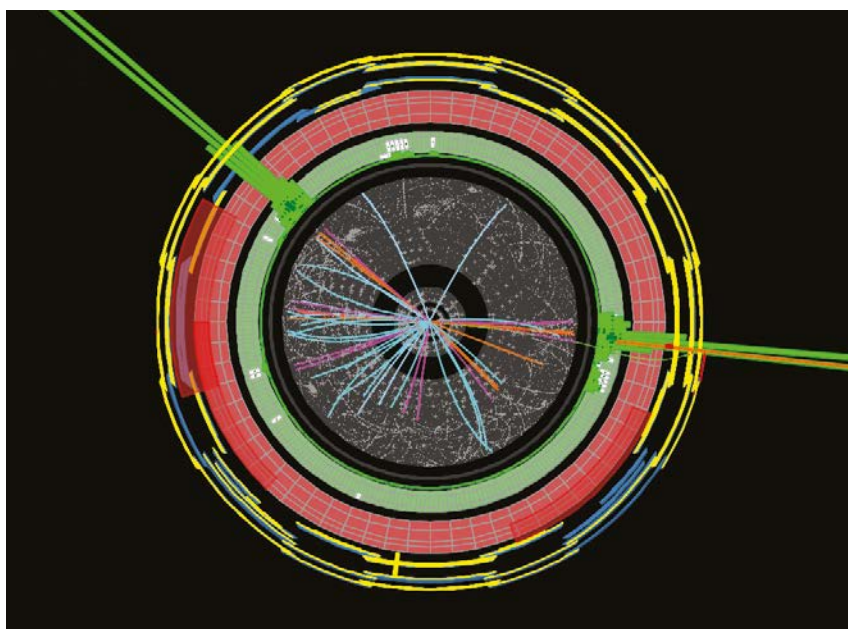


Bogdan DOBRESCU est physicien des particules au Fermilab, aux États-Unis.

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

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

© ATLAS/CERN 2014



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