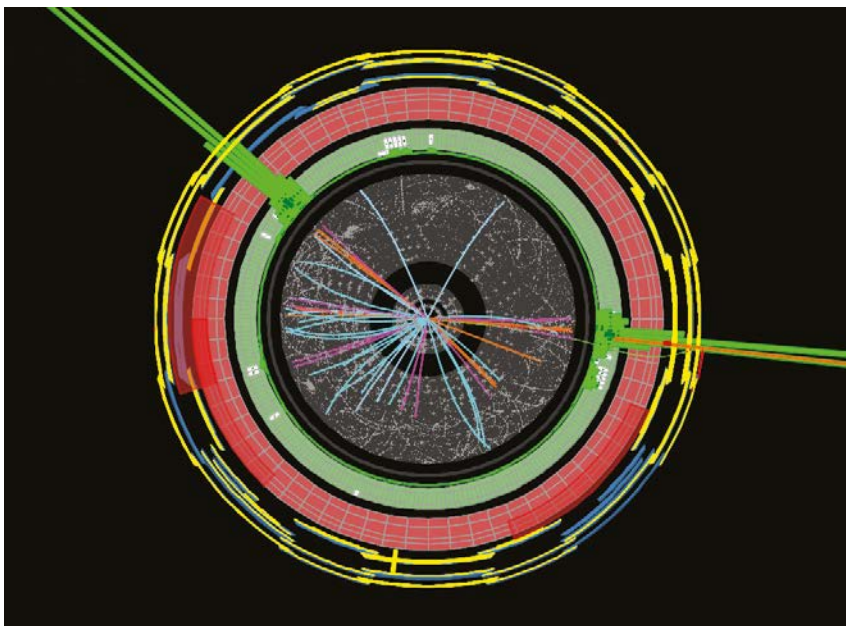




L'EXPÉRIENCE ATLAS DU LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, pourrait détecter des signaux (tels ci-dessus) trahissant la production de particules de matière noire et confirmer ou infirmer des modèles théoriques postulant l'existence de photons sombres.

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.

OBSERVÉE

CHAUDE
Neutrinos cosmologiques

MATIÈRE

BARYONIQUE

Matière essentiellement composée de baryons (protons et neutrons). Cela inclut tous les atomes.

INFÉRÉE

NON BARYONIQUE
Candidats à la matière noire

CHAUDE

Des particules très légères qui se déplacent à la vitesse de la lumière ou presque.
Exemple : neutrinos exotiques

FROIDE

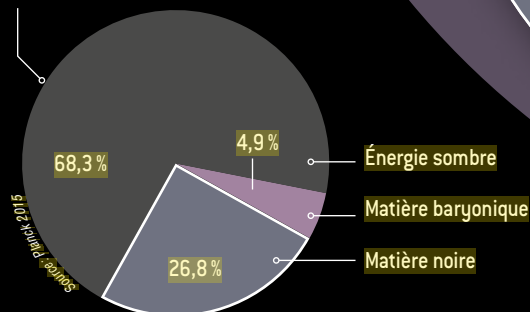
Particules lourdes et lentes

N'INTERAGISSANT PAS AVEC ELLE-MÊME
Exemple : wimps

COMPOSANTE MIXTE

INTERAGISSANT AVEC ELLE-MÊME
Exemple : atomes sombres

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

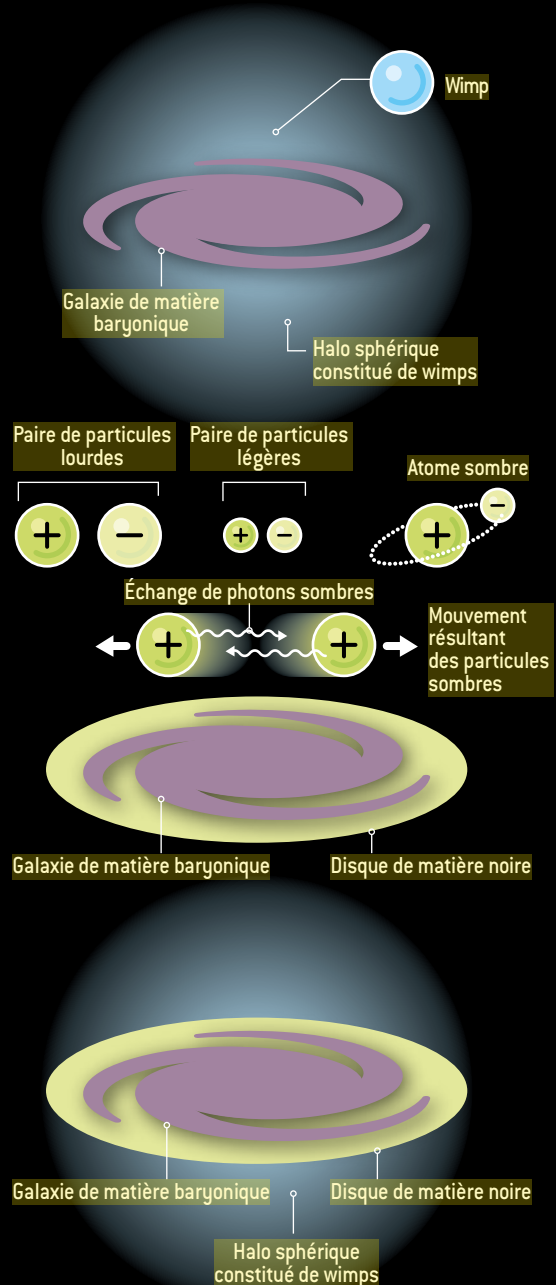
La forme la plus simple de particule de matière noire froide est une « particule massive interagissant faiblement », ou wimp, qui n'interagit que rarement voire jamais avec d'autres particules de sa propre espèce ou de matière ordinaire. Les wimps se rassembleraient en halos sphériques qui attireraient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