

Théorie de la matière noire

Même si l'existence de la matière noire fut envisagée dès 1930 et donc il y a déjà 80 ans, même si les astrophysiciens ne doutent plus de son existence, même si elle s'avère cinq fois plus abondante dans l'Univers que la matière ordinaire... sa vraie nature demeure une énigme dont la résolution suscite nombre d'études aussi bien théoriques qu'expérimentales, chacune avec une proposition à la clef. En l'état des connaissances, il s'agirait d'une matière invisible, remplissant les galaxies, courbant les rayons lumineux à leur passage à travers les amas galactiques et jouant un rôle crucial dans la formation de grandes structures de l'Univers dont elle assurerait la cohésion. De quoi s'agit-il ?

Cinquante années d'études en **cosmologie** et en physique des particules ont amené les chercheurs à proposer des dizaines de particules « exotiques » portant des noms aussi curieux que « **neutralinos** » ou « particules de Kaluza-Klein ». Ces particules tirent leur origine dans des constructions théoriques comme la supersymétrie ou les **dimensions supplémentaires**, voire de propositions plus exotiques encore. Reparcourons les étapes ayant permis aux scientifiques de se convaincre de l'existence de la **matière noire** et aux théoriciens d'exercer leur imagination pour chercher la bonne solution de l'énigme.

Et si la matière noire n'existait pas ?

Les observations montrent que les **étoiles** périphériques de certaines **galaxies spirales** en rotation rapide subissent une **attraction gravitationnelle** beaucoup plus forte que celle qui s'obtiendrait en appliquant la **loi de Newton** à la matière visible dans les régions centrales de ces **galaxies**. Une question surgit alors : et si, au lieu de postuler l'existence de la matière invisible, on modifiait plutôt cette loi de manière à rendre l'accélération gravitationnelle plus forte à une grande distance du centre galactique ? Avancée, dans les années 1980, par Mordehai Milgrom⁽¹⁾ avec sa théorie MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), cette proposition, aussi pragmatique soit-elle, soulève néanmoins un certain nombre de difficultés, notamment à l'échelle des **amas de galaxies**, et plus généralement encore à l'échelle cosmologique. Ces difficultés viennent du fait que le **spectre du CMB** (*Cosmic Microwave Background*), dit aussi **fond diffus cosmologique**, ainsi que la formation gravitationnelle des grandes structures, indiquent que l'Univers requiert vraiment plus de matière que celle observée. En conséquence, la communauté scientifique considère aujourd'hui comme improbable que MOND puisse résoudre le problème de la matière noire.

Et si la matière noire n'était que de la matière ordinaire « déguisée » ?

La nécessité d'invoquer la présence d'une masse invisible amène les chercheurs à s'orienter, en premier, vers les constituants connus, mais élusifs, de la matière ordinaire : des **trous noirs**, du gaz interstellaire raréfié constitué de **protons** ou encore un grand nombre de neutrinos, reliques du **Big bang**.



Vue d'artiste du satellite Fermi, en orbite depuis juin 2008, cherchant notamment à détecter les rayons gamma de haute énergie (des centaines de gigaélectronvolts) provenant de l'annihilation de la matière noire.

Encore une fois, les observations cosmologiques excluent ces possibilités. S'il existait beaucoup de trous noirs dans les galaxies, on en verrait leurs effets sous la forme de lentilles gravitationnelles, quand ils passent devant les sources lumineuses. S'il y avait beaucoup de protons en forme de gaz, ils émettraient un grand nombre de rayons X et formeraient plus d'**hélium** qu'on en observe. Enfin, la contrainte que l'on a sur la masse des neutrinos (inférieure à quelques **électronvolts**) montre qu'ils sont trop légers pour accomplir le rôle de la masse manquante. De plus, de par leur masse si faible, les neutrinos se déplacent à grande vitesse dans l'Univers, ce qui les empêche d'engendrer de grandes structures comme les galaxies qui ne peuvent se former qu'à partir de matière lourde capable de « condenser » gravitationnellement dans des puits de potentiel.

Il faut donc bien une particule nouvelle : quelles en sont les propriétés générales ?

Heureusement, bien qu'encore inconnue, cette particule nous livre des indices quant à ses propriétés. Premièrement, la matière noire doit avoir des interactions faibles ou très faibles, voir même nulles, avec le reste de la matière : elle est donc très difficile à détecter. En particulier, elle ne possède

(1) Mordehai Milgrom, physicien et professeur israélien de l'Institut Weizmann.

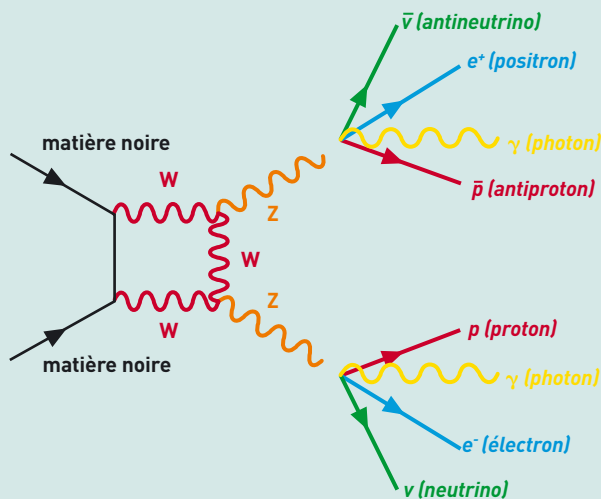


Figure 1. Diagramme de Feynman (d'après le physicien Richard Feynman, prix Nobel en 1965) illustrant l'annihilation de la matière noire en produits finaux ordinaires. Les physiciens utilisent ce type de diagramme pour calculer les propriétés du flux attendu : chaque diagramme décrit, de façon mathématique précise, les caractéristiques des particules et de leurs interactions. Dans ce cas, deux particules de matière noire s'approchent et s'annihilent en deux bosons faibles Z. L'annihilation se produit par la création et l'immédiate destruction d'une boucle compliquée de bosons W. Ensuite, les bosons Z se désintègrent en particules de matière ordinaire, tels que des photons, des neutrinos, des positrons, des antiprotons, etc. Ces produits finaux sont activement recherchés par plusieurs expériences sur Terre et sur des satellites en orbite.

pas de charge électrique et donc elle n'interagit pas avec la lumière (d'où son nom de matière « noire »). Deuxièmement, les données cosmologiques nous apprennent qu'elle doit être « froide » (c'est-à-dire se déplaçant à une vitesse beaucoup plus faible que celle de la lumière) – le cas d'une particule assez lourde ou produite au repos. Enfin, comme elle a probablement été produite aux premiers instants de l'Univers, elle doit être stable ou avoir une très longue durée de vie moyenne, supérieure à l'âge de l'Univers actuel. Dans le cas contraire, elle se serait désintégrée en particules ordinaires dans le passé. Les faibles interactions de la matière noire avec le reste de la matière pourraient bien être les interactions faibles du **Modèle standard**, par exemple celles responsables de la désintégration radioactive bêta. Les théoriciens considèrent comme très probable cette hypothèse. En effet, les calculs montrent que l'abondance actuelle d'une particule produite lors du big bang avec des propriétés typiques des interactions faibles serait précisément celle de la masse manquante. On appelle **WIMPs** (pour *Weakly Interacting Massive Particles*) de telles particules.

Quelques candidats répondant au profil souhaité

De nombreuses particules ayant ces propriétés, et donc candidates au rôle de matière noire, ont été proposées dans le cadre de théories nouvelles de la physique des particules. Parmi les plus étudiées figure le neutralino en supersymétrie. Introduite en physique des particules dans les années 1980, cette

(2)Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954), physicien et mathématicien allemand, le premier qui imagina une théorie avec des dimensions supplémentaires pour l'Univers. Oskar Klein (1894-1977), physicien théoricien suédois, ayant inventé l'idée que les dimensions supplémentaires peuvent exister physiquement mais sont enroulées et très petites.

théorie très élégante propose que, pour chaque particule ordinaire, il y ait une particule partenaire supersymétrique dotée des mêmes propriétés (par exemple, de la même charge électrique) mais d'une masse beaucoup plus élevée, estimée à une centaine de gigaélectronvolts environ. Le neutralino figure au nombre de ces particules, ou, plus précisément, un mélange de partenaires supersymétriques du **photon**, du **boson Z** et du **boson de Higgs**. De plus, le neutralino serait doué d'une propriété additionnelle (nommée **R-parité**, une sorte de nouvelle charge) qui, du fait des lois de la nature, ne peut disparaître dans aucun processus physique. En conséquence, il n'est pas possible au neutralino de se désintégrer en particules ordinaires : il serait ainsi stable. Voici pourquoi le neutralino figure comme un bon candidat pour jouer le rôle de matière noire, faisant aussi partie de la catégorie des WIMPs. L'abondance des paramètres théoriques rend ensuite plus riche et plus complexe la phénoménologie de la matière noire supersymétrique. La masse, la composition et les interactions précises des différents composants ont été étudiées en détail pour plusieurs modèles.

Vers la fin des années 1990, des scénarios à **dimensions spatiales supplémentaires** (dites de Kaluza-Klein⁽²⁾), en hommage aux deux théoriciens visionnaires qui les avaient conçus au début du XX^e siècle), sont revenus à l'attention des chercheurs. Leur hypothèse est qu'il existerait une cinquième dimension venant s'ajouter aux trois dimensions spatiales et au temps. Sa formation en boucles extrêmement petites la rendrait inaccessible à l'observation directe. Une particule plongée dans cet espace



Le satellite italo-russe PAMELA (pour *Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) peu avant le lancement dans une fusée, en 2006. Les données envoyées par le satellite ont révélé l'existence de rayons cosmiques anormaux qui ont bouleversé la communauté des scientifiques travaillant sur la matière noire. Sont-ils dus à l'annihilation de particules de matière noire dans le halo de la galaxie ?

4+1 dimensionnel ressemble à une véritable tour de particules semblables dont les masses croissent par paliers d'environ 1 téraélectronvolt. Dans l'hypothèse où la « marche zéro » de cette tour se composerait de matière ordinaire (soit une projection quadridimensionnelle de la réalité 5-dimensionnelle) alors, la première marche en serait une copie lourde. Or, si un mécanisme additionnel, dit **parité de Kaluza-Klein**, impose la stabilité des particules de la première marche de la même façon que la **R-parité** en supersymétrie, alors ces particules lourdes constituent des parfaits candidats pour la matière noire – ce qui fut proposé notamment par Géraldine Servant, de l'Institut de physique théorique du CEA, en 1999.

La matière noire supersymétrique et de Kaluza-Klein ont stimulé la plupart des études théoriques et des recherches expérimentales depuis les années 1980. Néanmoins, les chercheurs ayant gardé leur esprit ouvert, de nombreuses autres propositions furent avancées. Par exemple, dans la catégorie de matière noire WIMP, des modèles dits « de matière noire minimale » proposent d'ajouter au modèle standard, non pas un secteur entier de copies, mais seulement les particules strictement nécessaires pour jouer le rôle de la matière noire. Autres hypothèses : celle des « neutrinos stériles », particules similaires aux neutrinos normaux mais plus lourds et sans interaction avec la matière ordinaire ; ou encore celle des *axions*, particules légères produites, peut-être, pendant les premiers instants d'évolution bouillante de l'Univers.

Avec plusieurs candidats pour un seul poste, comment identifier le bon ?

Ce grand nombre de « candidats » traduit le fort intérêt des scientifiques pour l'ensemble de ces questions. Mais il reflète également un manque évident de données expérimentales directes. Heureusement, les prochaines années paraissent prometteuses. Une combinaison de différentes techniques expérimentales sera sans doute nécessaire pour distinguer les différentes théories et parvenir à identifier la nature de la matière noire. Un grand espoir repose sur la production de matière noire par le *Large Hadron Collider (LHC)*, l'accélérateur de particules du **CERN**, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (voir *l'encadré*, p. 80). Une autre perspective concerne la détection des produits finaux de l'annihilation de deux particules de matière noire dans le halo galactique (figure 1). Un troisième axe compte sur les expériences souterraines sensibles comme *Edelweiss* (voir *l'encadré* p. 80) dont le CEA est un acteur majeur, visant à détecter un phénomène particulièrement rare : la collision d'une particule de matière noire de passage. Cette activité expérimentale gigantesque et pluridirectionnelle, indispensable pour tester les différentes prédictions, s'accompagne d'une intense activité théorique.

Ainsi, l'observatoire en orbite *PAMELA* (pour *Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), lancé par une fusée russe, en 2006, a-t-il récemment décelé des **rayons cosmiques** « anormaux », peut-être produits par les annihilations de la matière noire galactique. Ces données, difficilement explicables en termes de matière noire



P. Stoppe/CEA

La recherche fondamentale en physique des particules a fait d'énormes progrès pour valider un cadre théorique appelé *Modèle standard*. De nouvelles particules, comme le boson de Higgs et de nouveaux processus sont attendus dans le cadre des expériences du LHC visant à élargir ce modèle. Une de ces nouvelles particules sera-t-elle la matière noire ?

supersymétrique ou par la théorie de Kaluza-Klein, suscitent déjà la construction de nombreux nouveaux modèles.

Le problème de la matière noire établit des liens étroits entre la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Il est probable que, désormais, ce problème à l'échelle galactique et cosmologique se résoudra avec un nouvel état des plus petits constituants de la matière. L'exploration de la physique à l'échelle du téraélectronvolt au LHC, les observations astronomiques en rayons gamma du satellite *Fermi* ainsi que la prochaine génération de détecteurs souterrains issus de l'expérience *Edelweiss*, laissent augurer que la matière noire dévoilera bientôt son secret.

> **Marco Cirelli**
et **Camille Bonvin**

Institut de physique théorique
(Unité de recherche associée au CNRS)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay

Pourra-t-on créer un jour de la matière noire au LHC ?

Pour répondre aux questions les plus fondamentales de la physique, le **Cern** (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) a mis en service, en 2008, le grand collisionneur de hadrons (LHC). En tant que pays hôte, la France a participé à sa construction par l'intermédiaire de ses deux plus importants organismes de recherche : le **CNRS** et le **CEA**. Au sein de ce grand instrument, les physiciens travaillent à provoquer des collisions entre faisceaux de protons de **7 TeV** (soit **7 000 GeV**) d'énergie, observées par deux grandes expériences généralistes :

- **ATLAS** (pour *A Toroidal LHC Apparatus*) : il s'agit d'un des deux plus grands et plus complexes détecteurs construits à ce jour. Cette expérience de physique auprès du LHC est menée par une collaboration mondiale de scientifiques (1 800 physiciens et ingénieurs issus de 150 laboratoires de 34 pays différents) pour trouver le **boson de Higgs**, s'il existe (figure 1), ou d'autres nouvelles particules.

- **CMS** (pour *Compact Muon Solenoid*), l'autre grand détecteur, poursuit les mêmes buts scientifiques qu'ATLAS mais avec d'autres options techniques.

Deux autres programmes poursuivent une recherche spécifique :

- **Alice** (pour *A large ion Collider Experiment*) tentera de recréer, en laboratoire, les conditions qui régnaient juste après le

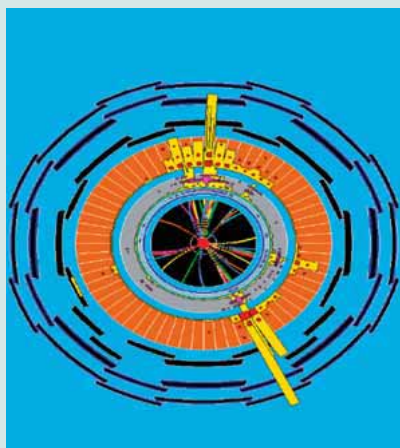


Figure 1. Simulation d'un événement mettant en jeu la « supersymétrie » dans l'expérience Atlas : vue transverse à l'axe des faisceaux. Dans cet événement, deux LSP et deux jets de particules ordinaires ont été produits. Les LSP ne sont pas détectés directement mais le bilan des impulsions montre un déficit : il manque « quelque chose » du côté gauche ; ce bilan permet de caractériser leur présence. Les axes sont simplement géométriques : X, Y et leur unité en mètre : X (m) et Y (m).

big bang et ainsi étudier l'évolution de la matière de la naissance de l'Univers à nos jours.

- **LHCb** (pour *Large hadron Collider beauty*) essaiera de comprendre pourquoi nous vivons dans un Univers apparemment constitué entièrement de matière, sans aucune présence d'**antimatière**.

L'énergie des collisions du LHC (14 TeV, soit 7 fois plus que le collisionneur précédent, actuellement en service aux États-Unis) contribuera à l'exploration complète de l'échelle d'énergie couvrant les alentours de 1 TeV, une échelle clé dans le **Modèle standard**. Le premier objectif des expériences conduites au LHC reste la découverte du mystérieux boson de Higgs ou de ce qui en tient lieu pour l'unification des **interactions électromagnétique et faible**. Mais aujourd'hui, de nouvelles théories ouvrent un cadre plus large que le Modèle standard pour essayer de répondre aux questions que celui-ci laisse en suspens, notamment sur la nature du fameux boson de Higgs, mais aussi de la **matière noire** et de l'**énergie noire**.

Toutes ces questions semblent, en effet, reliées par une interrogation centrale : quelle est l'origine de la masse des particules ? Pour l'énergie noire, les chercheurs se heurtent à un obstacle majeur : au regard des connaissances actuelles sur les particules élémentaires, le calcul de sa densité dans l'Univers donne un résultat beaucoup trop grand, des milliers de fois supérieur à l'observation ! En revanche, la situation semble plus favorable pour la compréhension de la matière noire. En effet, les mesures cosmologiques pointant vers des particules massives qui interagissent faiblement, leur échelle de masse « typique » serait d'environ 100 GeV, soit l'échelle d'unification du Modèle standard. Il semble donc naturel de conclure que la matière noire et l'unification électrofaible partagent une origine commune. Dans cette éventualité, de telles particules pourraient être produites par le LHC. C'est ce que prédit, par exemple, l'une des nombreuses théories avancées pour dépasser le Modèle standard, et sans doute la plus connue, à savoir celle de la « **supersymétrie** », proposée dans les années 1970 mais demeurée hypothétique. De nombreuses versions existent mais, de façon générale, la LSP (pour *Lightest Supersymmetric Particle*), particule supersymétrique la plus légère, ferait une excellente « candidate ». Ainsi, grâce à son énergie et sa **luminosité** élevées, le LHC pourrait prochainement



L'expérience Alice, dédiée à l'étude de la matière dans ses états extrêmes.

mettre en évidence la supersymétrie. Le point commun entre les différents types d'événements prédits par les théories de supersymétrie réside dans le fait qu'il existe, dans le bilan de la collision, un manque d'énergie (transverse), emportée par une ou plusieurs LSP. Les chercheurs espèrent observer rapidement ces événements manquant d'énergie transverse. Comparé au bruit de fond du Modèle standard, le moindre excès constaté serait alors favorable à la théorie de la supersymétrie. De façon similaire, d'autres théories (dimensions supplémentaires, axions, etc.) prédisent que si la matière noire et l'unification électrofaible partagent la même origine, alors il existe une chance tangible pour que le LHC produise la, ou les particules constitutives de la matière noire de l'Univers.

> Bruno Mansoulié

Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales
de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)