

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.

Aujourd'hui, les astrophysiciens ne doutent plus de l'existence de cette matière cachée : 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 ?

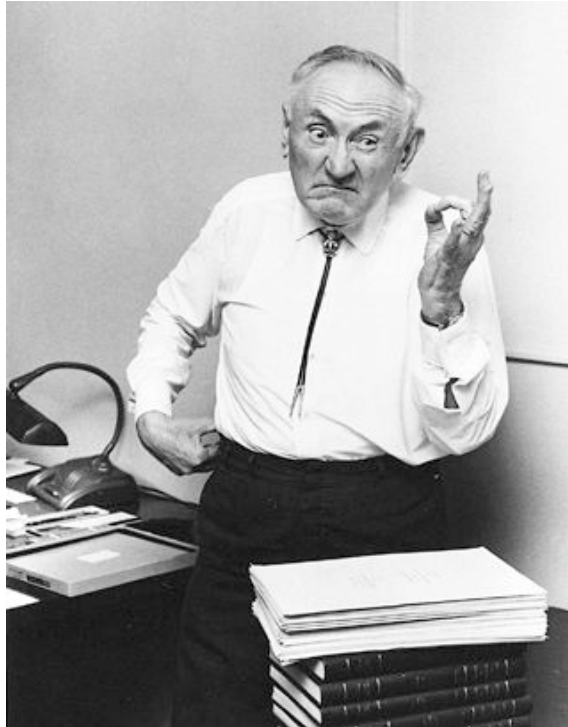
Cinquante années d'études en cosmologie et en physique des particules ont amené les chercheurs à proposer des dizaines de particules « exotiques » portant des noms aussi curieux que « neutralinos » ou « particules de Kaluza-Klein ». Ces particules ont leur origine dans des constructions théoriques comme la super-symétrie ou les dimensions supplémentaires, voire de propositions plus exotiques encore. Reparcourons les étapes qui ont permis aux scientifiques de se convaincre de l'existence de la Matière Noire et aux théoriciens de 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 (voir Chapitre 1). Une question surgit alors : et si, au lieu de postuler l'existence de matière invisible, on modifiât plutôt cette loi de manière à rendre l'accélération gravitationnelle plus forte à une grande distance du centre galactique ? Avancée, dans les années 80, par Mordehai Milgrom¹ 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

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

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 majorité de la communauté scientifique considère aujourd'hui comme improbable que MOND puisse résoudre le problème de la matière noire.



Un portrait classique de Fritz Zwicky, astronome théorique suisse connu aussi pour sa personnalité excentrique. Il proposa le premier en 1933 l'existence d'une "matière sombre" pour expliquer les trajectoires de la danse des galaxies dans un amas.

Et si elle n'était que de la matière ordinaire "déguisée" ?

La nécessité d'invoquer la présence d'une masse invisible a amené 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. Encore une fois les observations cosmologiques excluent ces possibilités. S'il y avait plein de trous noirs dans les galaxies, leurs effets seraient vus sous la forme de lentilles gravitationnelles, quand ils passent devant des sources lumineuses (voir Chapitre 1). S'il y avait plein de protons en forme de gaz, ils émettraient un grand nombre de

rayons X et ils formeraient beaucoup plus d'Hélium de celui observé. Enfin, les contraintes actuelles que l'on a sur la masse des neutrinos (inférieure à quelques électronvolts) montrent 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: ceci les empêche de engendrer de grandes structures, comme des galaxies, qui ne peuvent se former qu'à partir de matière lourde, capable de 'condenser' gravitationnellement dans des puits de potentiel.

Il faut bien une particule nouvelle : quelles sont ses propriétés générales ?

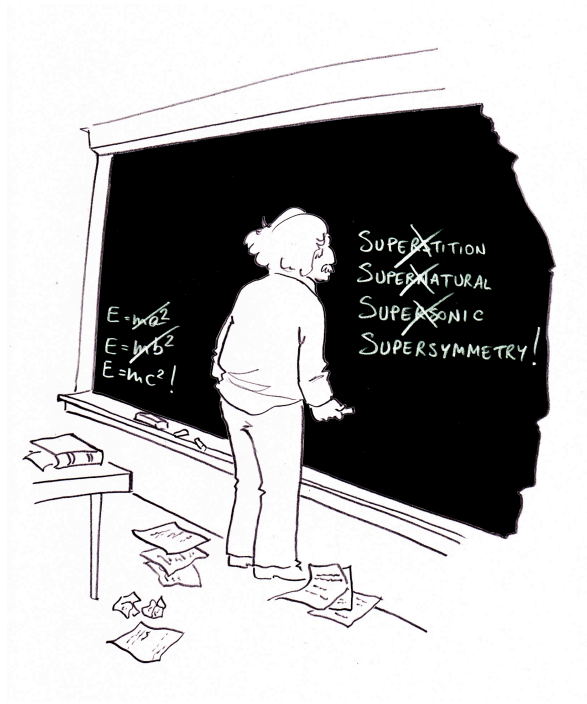
Heureusement, bien qu'encore inconnue, cette particule nous livre des indices quant à ses propriétés. Premièrement, la Matière Noire doit avoir des interactions faibles ou très faibles, voir même nulles, avec le reste de la matière, ce qui rend très difficile de la détecter. En particulier elle ne possède pas de charge électrique et donc elle n'interagit pas avec la lumière (d'où son nom: 'noire'). Deuxièmement, les données cosmologiques nous apprennent qu'elle doit être 'froide' (i.e. se déplaçant à une vitesse beaucoup plus faible de celle de la lumière). Ceci est le cas pour 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 tout à fait être les Interaction Faibles du Modèle Standard, celles responsables par exemple de la désintégration radioactive beta. En fait, les théoriciens considèrent cette possibilité comme très probable, puisque 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 (Weakly Interacting Massive Particles) de telles particules.

Candidatures ouvertes! (ou bien: **Quelque candidat répondant au profil souhaité**).

Un grand nombre de particules avec de telles propriétés et donc candidates au rôle de Matière Noire a été proposées dans le cadre de théories nouvelles de physique des particules. Parmi les plus étudiés figure le "neutralino" en super-symétrie. Introduite en physique des particules dans les années 80, cette théorie très élégante propose que pour chaque particule

ordinaire il y ait une particule partenaire super-symétrique dotée des mêmes propriétés (par exemple de la même charge électrique) mais d'une masse beaucoup plus élevée, estimée à une centaine de giga-électronvolts environ. Le neutralino est une de ces particules, ou, plus précisément, un mélange de partenaires super-symétriques du photon, du boson Z et du boson de Higgs. De plus, le neutralino serait doté d'une propriété additionnelle (nommée R-parité, une sorte de nouvelle charge) qui, à cause d'une nouvelle loi de la Nature, ne peut disparaître dans aucun processus physique. En conséquence, il ne peut pas se désintégrer en particules ordinaires, ce qui le rend stable. Ainsi le neutralino est un bon candidat pour jouer le rôle de Matière Noire, qui fait lui aussi partie de la catégorie des WIMPs. L'abondance des paramètres théoriques rend ensuite plus riche et complexe que ça la phénoménologie de la matière noire super-symétrique. 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-Klein² en hommage aux deux théoriciens visionnaires qui les avaient conçus

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.

au début du XX^e siècle) sont revenus à l'attention des chercheurs. L'hypothèse est que 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 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 super-symétrie, alors ces particules lourdes constituent des parfaits candidats pour la matière noire, comme proposé notamment par Géraldine Servant de l'Institut de Physique Théorique du CEA en 1999.

La Matière Noire super-symétrique et de Kaluza-Klein ont stimulé la plupart des études théoriques et des recherches expérimentales depuis les années 80. Néanmoins, les chercheurs ont gardé leur esprit ouvert et de nombreuses autres propositions ont été 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. Autre hypothèse, celle des *neutrinos stériles*, particules similaires aux neutrinos normales mais plus lourdes 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.

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). Une autre perspective concerne la détection des produits finaux de l'annihilation de deux particules de matière noire dans le halo galactique. Un troisième axe compte sur les expériences souterraines sensibles comme Edelweiss (dont le CEA est 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, est accompagnée par 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 étant difficilement explicables en termes de matière noire super-symétrique ou par la théorie de Kaluza-Klein, suscitent déjà la construction de nombreux nouveaux modèles.



Tunnel du LHC.

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. Une de ces nouvelles particules sera-t-elle la Matière Noire?

Crédit photo : P. Stoppa/CEA.

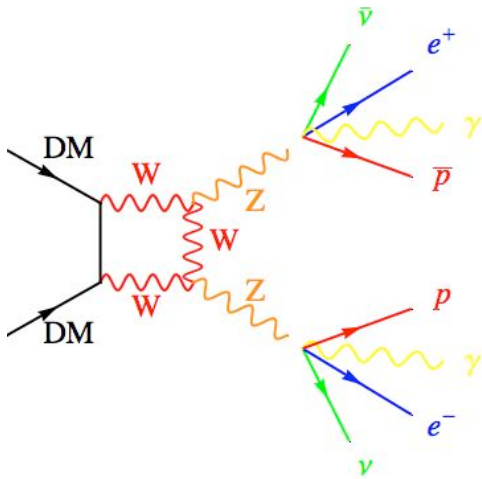
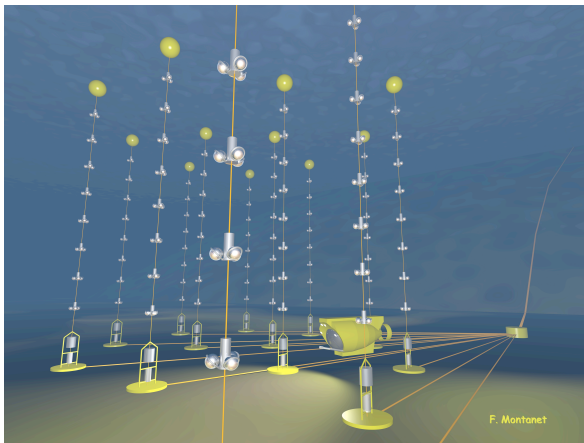


Diagramme de Feynman (d'après le physicien Richard Feynman, Prix Nobel en 1965) illustrant l'annihilation de matière noire en produits finaux ordinaires. Les physiciens utilisent ce type de diagrammes pour calculer les propriétés du flux attendu: chaque diagramme décrit de façon mathématique précise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



Vue d'artiste de ANTARES, le gigantesque détecteur sous-marin construit par une collaboration international comprenant le CEA, qui vise entre autre à détecter les neutrinos produits par l'annihilation de Matière Noire dans la Galaxie ou le centre du Soleil.

Crédit photo : F. Montanet, Centre de Physique des Particules de Marseille.



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 des rayons cosmiques anormaux qui ont bouleversé la communauté des scientifiques de la Matière Noire. Sont-ils dus à l'annihilation de particules Matière Noire dans le halo de la Galaxie?
Crédit photo : PAMELA collaboration.



Vue d'artiste du satellite FERMI, en orbite depuis juin 2008, qui cherche entre autre à détecter les rayons gamma de haute énergie produits par l'annihilation de particules de Matière Noire dans le halo galactique. Pour les rayons gamma d'énergie encore plus élevée (des centaines de gigaelectronvolts) provenant de l'annihilation de la Matière Noire, des télescopes terrestres ont été construits. L'un de plus performants est H.E.S.S., dans le désert de la Namibie, construit par une collaboration de plusieurs universités et centres de recherche africains et européens dont le CEA.
Crédit photo : NASA Goddard Space Flight Center / General Dynamics.

Le problème de la matière noire établit des liens étroits entre la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Probablement 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 tels que l'expérience Edelweiss, laissent augurer que l'énigme de la matière noire se dévoilera bientôt son secret.

Marco CIRELLI

et

Camille BONVIN

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