

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