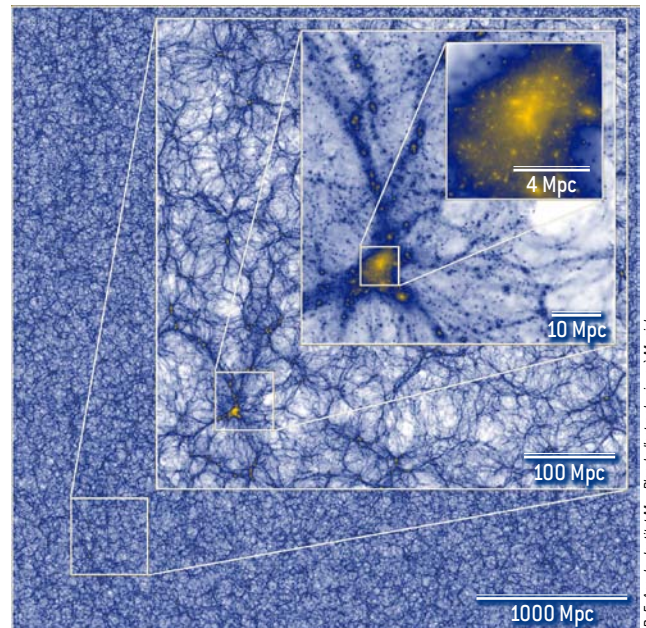




4. LA SIMULATION MILLENNIUM-XXL (à droite), réalisée avec la participation de l'auteur, correspond à un volume d'Univers de 13,4 milliards d'années-lumière de côté. Elle met en évidence des structures de matière noire aux échelles des galaxies et des amas de galaxies. De tels ensembles ont été repérés dans l'Amas du Boulet (ci-dessus) où deux amas de matière sont entrés en collision et ont séparé la matière noire (en fausse couleur bleue) de la matière ordinaire (en fausse couleur rouge).



Boulet – nécessite de revenir à l'existence de matière qui ne peut pas être de la matière baryonique (voir la figure 4). La marge de manœuvre pour de nouvelles lois de la gravitation est très limitée par les nombreux tests de précision que la théorie de la relativité a subis dans le Système solaire. Par ailleurs, des tests de la loi de la gravitation effectués à de très grandes échelles, au cours desquels des données relatives aux lentilles gravitationnelles, aux amas galactiques et aux vitesses des galaxies ont été combinées de façon astucieuse. Ces tests excluent presque complètement la théorie TeVeS.

Certains physiciens travaillent toujours sur des théories et des lois de la gravitation susceptibles de se passer de la matière noire. Mais aucun modèle ne semble aussi fructueux que le modèle Λ CDM, qui offre les explications les plus simples. Mais en admettant que ce soit le bon modèle, se pose la question de la nature de la matière noire.

C'est du côté de la physique des particules que la réponse viendra probablement. Depuis les années 1960, les chercheurs ont développé le « modèle standard » de la physique des particules, une théorie qui décrit les particules fondamentales et leurs interactions. Ils ont même prévu l'existence de particules qui ont toutes été découvertes – la dernière, le boson de Higgs, l'a été en 2012 au CERN, près de Genève.

Nous savons toutefois que ce modèle n'est valable que dans un domaine d'éner-

gie limité. À des échelles d'énergie élevées, des difficultés apparaissent. En outre, il n'intègre pas l'interaction gravitationnelle. Les chercheurs étudient donc des théories plus fondamentales, qui apporteraient des solutions à ces difficultés et dont la manifestation à basse énergie coïnciderait avec le modèle standard. L'une des pistes les plus discutées est la supersymétrie, principe de symétrie selon lequel à chaque espèce de particule du modèle standard correspondrait une espèce partenaire dite supersymétrique.

La matière noire, des neutralinos ?

Or la particule supersymétrique la plus légère que prédisent de telles théories pourrait être un candidat pour la matière noire. Dans de nombreuses versions de la supersymétrie, cette particule est un « neutralino » et ses propriétés sont idéales : le neutralino serait stable, très lourd et n'interagirait que très faiblement avec la matière ordinaire.

Le neutralino est qualifié de WIMP (Weakly Interacting Massive Particle ou Particule massive interagissant faiblement avec la matière). De plus, il serait apparu dans l'Univers primordial en des quantités qui donnent la bonne densité de matière noire observée aujourd'hui. Une telle coïncidence est séduisante, mais la plupart des physiciens ne seront convaincus par la supersymétrie que lorsque le neutralino aura été détecté

et ses propriétés mesurées. Mais comment observer une particule aussi furtive ?

Plusieurs approches sont possibles. L'une d'elles consiste à chercher des particules supersymétriques dans les collisions proton-proton de haute énergie dans l'accélérateur LHC du CERN. Les détecteurs ne verront pas directement de traces laissées par les neutralinos, mais on pourra rechercher leur présence sous la forme d'énergie manquante emportée par les neutralinos qui s'échappent de la collision sans interagir avec les détecteurs.

Un autre type d'expériences se concentre sur la détection directe de la matière noire. La Voie lactée baignerait dans un halo de matière noire dont la distribution peut être estimée par la dynamique de la galaxie. Sur l'orbite du Soleil autour du centre de la Galaxie, la densité de matière noire serait d'environ 0,3 gigaélectronvolt par centimètre cube. On s'attend donc à environ une à trois particules par litre, au cas où les particules seraient des WIMP dont la masse serait de l'ordre de 100 gigaélectronvolts (un proton a une masse de près d'un gigaélectronvolt).

Ce halo implique que la Terre est traversée en permanence par une grande quantité de particules de matière noire. Les physiciens ont installé de nombreuses expériences sous des centaines de mètres de roche pour les protéger d'autres types de particules, espérant détecter de rares interactions de particules de matière noire avec les atomes de leurs

détecteurs. Ces expériences sont délicates, car elles sont confrontées à de nombreuses sources de bruit parasite. Quelques équipes ont annoncé avoir observé des signaux qui seraient dus à la matière noire, mais d'autres groupes infirment ces résultats. La question reste aujourd'hui ouverte (voir l'article de Richard Taillet page 30). Au cours des prochaines années, la situation devrait cependant s'éclaircir, car les expérimentateurs augmentent sans cesse la sensibilité de leurs détecteurs. Si la recherche reste infructueuse malgré tous leurs efforts, l'idée de matière noire deviendra sûrement plus difficile à défendre.

L'astronomie de haute énergie offre un autre moyen de prouver l'existence de la matière noire. Les neutralinos étant leurs propres antiparticules, la rencontre de deux neutralinos résulte en leur annihilation et la création de paires de particules (voir la figure 5), par exemple deux photons gamma de haute énergie. Cet événement est rare, la probabilité d'une telle interaction étant faible. Mais les chances de rencontre de deux neutralinos augmentent quand la densité de matière noire est élevée. Ainsi, les zones les plus riches en matière noire devraient briller faiblement en photons gamma. Des télescopes spatiaux, tel *Fermi*, sont conçus pour détecter directement ces photons. D'autres télescopes au sol sont utilisés par les physiciens pour observer les pluies de particules produites par la collision de ces photons gamma avec les atomes de l'atmosphère terrestre.

La région la plus dense en matière noire est probablement le centre galactique, mais les signaux de l'annihilation y sont masqués par les émissions d'autres sources énergétiques (pulsars, voisinage du trou noir supermassif qui occupe le centre de la Galaxie, etc.). Les astrophysiciens se tournent donc vers des sources plus faibles, mais moins « polluées ». Aujourd'hui, l'absence de signal positif permet seulement de fixer des contraintes sur les valeurs possibles des paramètres fondamentaux des théories des particules supersymétriques.

Quelques résultats récents ont suscité une certaine excitation. Le télescope *Fermi* a identifié un signal fort provenant du centre galactique correspondant à une énergie de 130 gigaélectronvolts. Dans le scénario le plus optimiste, il pourrait s'agir de photons produits par l'annihilation de particules de

matière noire dont la masse est égale à l'énergie mesurée. Mais il pourrait aussi s'agir de problèmes complexes de mesure qui leurrent les physiciens. L'expérience AMS-2, installée sur la Station spatiale internationale, et le satellite PAMELA ont mesuré les proportions de positrons (les antiparticules des électrons) et d'électrons dans le rayonnement cosmique. Elles montrent que la quantité de positrons augmente d'autant plus que leur énergie est élevée, une propriété qui pourrait s'expliquer par l'annihilation de matière noire en paires

LA SUPERSYMMÉTRIE PROPOSE d'autres candidats que le neutralino pour la matière noire, et des modèles non supersymétriques sont aussi envisagés.

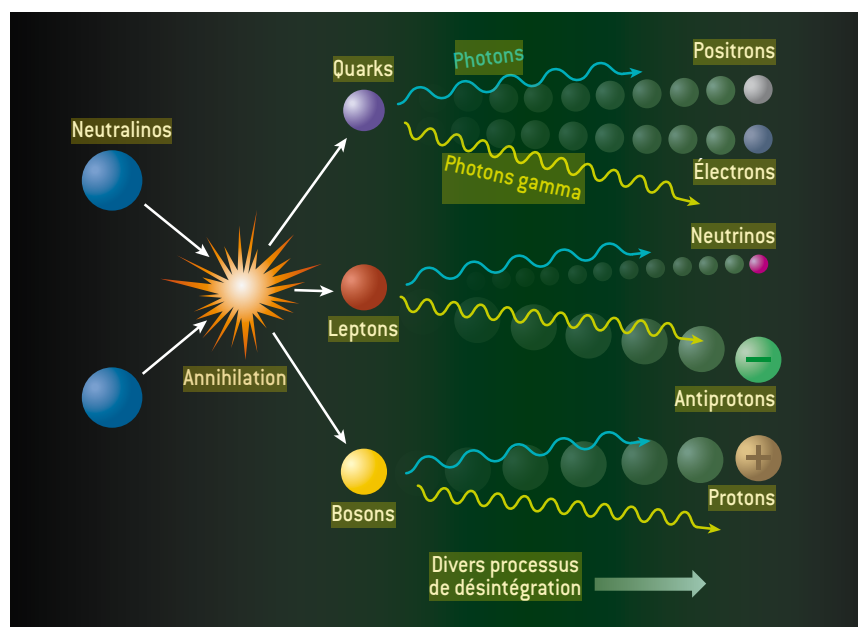
électron-positron. Mais d'autres processus physiques, telle l'émission de positrons par les pulsars, peuvent tout aussi bien reproduire les résultats de ces expériences.

Il est possible que la matière noire ne soit pas constituée de neutralinos. La supersymétrie propose d'autres candidats et d'autres modèles, non supersymétriques, sont aussi envisagés. Les « axions » sont de tels candidats. Très différents des WIMP, ils sont très légers et seraient détectables, dans la mesure où ils existent, dans de puissants champs magnétiques, où ils peuvent se transformer en photons.

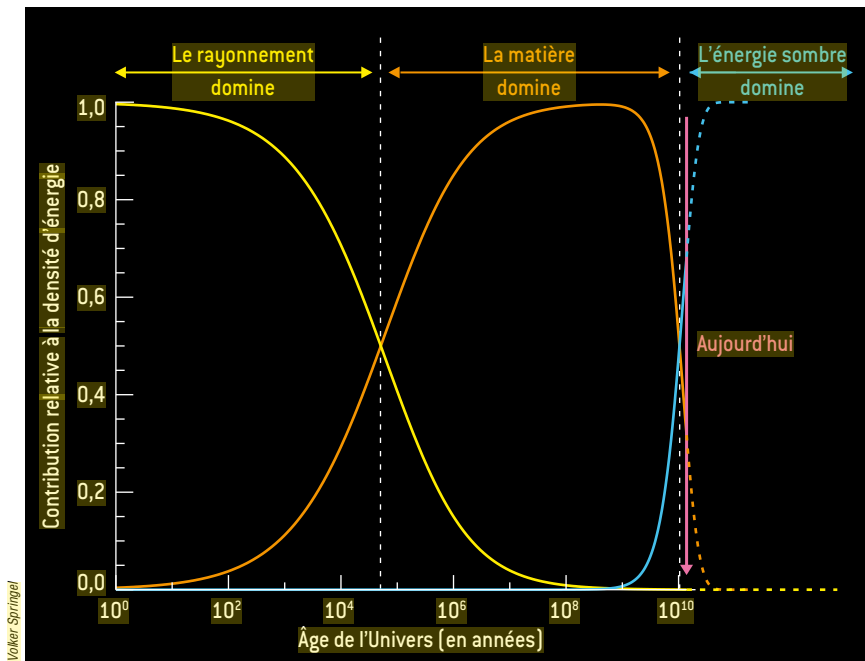
Par ailleurs, certaines observations ne sont pas en accord avec le modèle Λ CDM et sèment donc un doute sur la matière noire supposée par ce modèle. Par exemple, le modèle prévoit une population de petites galaxies gravitant autour de la Voie lactée beaucoup plus importante que celle observée. L'absence de halo de matière noire expliquerait ce déficit. Par ailleurs, le modèle Λ CDM ne décrit pas parfaitement les vitesses de rotation des étoiles au centre de quelques galaxies – ces observations sont, par exemple, mieux reproduites par la théorie MOND évoquée précédemment. Ces divergences sont discutées et il est aujourd'hui difficile de conclure. Il n'est pas possible d'exclure la matière noire à partir de

ces observations : le problème pourrait être dû au fait que la densité baryonique aux échelles concernées devient si élevée que la matière noire est redistribuée sous l'effet de ses interactions gravitationnelles. Les incertitudes dans les calculs sont encore trop importantes pour trancher.

La matière noire reste donc un sujet de recherche actif. Qu'en est-il de l'énergie sombre ? À la fin des années 1990, des observations astrophysiques ont mis cette dernière au centre de l'attention. L'équipe dirigée par Saul Perlmutter, du Laboratoire américain de Berkeley, ainsi que celle de



5. LE NEUTRALINO, particule candidate à la matière noire, est sa propre antiparticule. Quand deux neutralinos se rencontrent, ils s'annihilent et produisent de nouvelles particules : des quarks, des leptons ou des bosons. Ces particules sont instables et se désintègrent pour former d'autres particules que les physiciens tentent de détecter, tels des photons gamma ou des positrons.



6. LA DENSITÉ D'ÉNERGIE de l'Univers a d'abord été dominée par les photons, qui se sont rapidement dilués en raison de l'expansion de l'Univers. Après 100 000 ans, la matière s'est imposée car elle se dilue plus lentement. L'énergie sombre, dont la densité reste constante malgré l'expansion de l'espace, est devenue l'élément prépondérant vers 10 milliards d'années après le Big Bang. Sa densité est environ deux fois supérieure à celle de la matière aujourd'hui.

Brian Schmidt, de l'Université de Canberra en Australie, et d'Adam Riess, alors à l'Université de Californie à Berkeley, ont montré que l'expansion de l'Univers s'accélère, phénomène qui s'expliquerait grâce à l'énergie sombre. Les astrophysiciens, récompensés en 2011 par le prix Nobel de physique pour cette découverte, avaient étudié un grand nombre de supernovæ lointaines de type Ia. Ces objets correspondent à l'explosion d'étoiles de type naines blanches.

La luminosité d'une supernova augmente rapidement et peut dépasser celle d'une galaxie, puis elle décroît lentement. À partir de cette courbe de luminosité, il est possible de connaître la quantité de lumière émise par la supernova. Les supernovæ sont qualifiées de « chandelles standard », car les astrophysiciens ont utilisé cette luminosité pour déterminer la distance qui sépare la Terre de chaque supernova. Ils ont aussi mesuré le décalage vers le rouge du spectre de chaque supernova, dû à l'allongement de la longueur d'onde de la lumière sous l'effet de l'expansion de l'espace, pour calculer la vitesse d'éloignement de l'astre. Le rapport de la vitesse et de la distance détermine le taux d'expansion de l'Univers sur le parcours de la lumière.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Riazuelo, *La trace de l'invisible*, Dossier Pour la Science, n° 83, avril-juin 2014.

L. Amendola et al., *Cosmology and fundamental physics with the Euclid Satellite*, Living Reviews in Relativity, vol. 16, n° 5, 2013.

C. Frenk et S. D. M. White, *Dark matter and cosmic structures*, Annalen der Physik, vol. 524, pp. 507-524, 2012.

P. J. E. Peebles, *Seeing cosmology grow*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 50, pp. 1-28, 2012.

G. Bertone et al., *Particle dark matter: evidence, candidates and constraints*, Physics Reports, vol. 405, pp. 279-390, 2005.

À courte distance, la loi dite de Hubble est vérifiée : la vitesse d'éloignement de deux galaxies, en raison de l'expansion de l'Univers, est proportionnelle à la distance qui les sépare. À plus grande distance, la variation temporelle de la vitesse d'expansion cosmique entre également en jeu. Les données des supernovæ ont montré que l'expansion de l'Univers était plus faible dans le passé, donc qu'elle s'accélère depuis environ cinq milliards d'années. L'énergie sombre permet d'expliquer cette observation. En outre, la quantité d'énergie sombre requise par les données concorde avec les résultats obtenus à partir d'analyses du fond diffus cosmologique et d'autres observations.

L'énergie sombre pourrait être ce que les cosmologistes nomment une constante cosmologique, c'est-à-dire une substance dont la densité d'énergie reste constante malgré l'expansion de l'Univers. Sa contribution à la densité d'énergie cosmique dans l'Univers jeune était insignifiante par rapport à celle de la matière. Comme la matière se dilue avec l'expansion, la part de l'énergie sombre dans la densité d'énergie a augmenté progressivement. Aujourd'hui, elle domine et son rôle dans la dynamique de l'Univers est devenu crucial, avec comme effet une accélération de l'expansion.

L'énergie sombre, l'autre inconnue

Une des questions qui intriguent les scientifiques est la raison pour laquelle les densités d'énergie sombre et de matière noire sont du même ordre de grandeur (voir la figure 6). De nombreux chercheurs sont persuadés que cette coïncidence n'est pas un simple hasard. Certains ont développé des modèles qui introduisent une interaction de l'énergie sombre avec la matière noire. Des approches plus radicales misent sur des modifications de la loi de la gravitation elle-même. Les hypothèses ne manquent pas, même si elles semblent parfois exotiques (voir l'article de C. Deffayet page 38).

Les modèles proposés présentent des caractéristiques différentes, mais pour y voir plus clair, contraindre et éliminer des scénarios, de nouvelles observations sont nécessaires. Les scientifiques travaillent depuis plusieurs années, non seulement à mesurer avec encore plus de précision l'accélération de l'expansion de l'Univers,