

DOSSIER

L'UNIVERS manquant

Le modèle du Big Bang, qui décrit l'Univers et son histoire, est-il un colosse aux pieds d'argile ?

Sa situation est en tout cas paradoxale. Il a été bâti sur deux pans bien testés de la physique moderne : la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein et le modèle standard de la physique des particules. Mais pour rendre compte de façon satisfaisante d'une grande variété d'observations, le modèle du Big Bang repose sur une hypothèse hardie, à savoir que 95 pour cent de l'énergie totale contenue dans l'Univers nous sont invisibles.

La matière ordinaire – les étoiles, les planètes et tout ce qui nous entoure – ne représenterait ainsi que cinq pour cent de l'Univers. Le reste se partagerait entre l'hypothétique « matière noire » et la non moins inconnue « énergie sombre ». Il ne s'agit pas là d'hypothèses gratuites. Depuis 20 ans, depuis que l'on est entré dans l'ère de la « cosmologie de précision », une grande variété d'instruments ont collecté des indices de la présence de ces composantes invisibles du cosmos (voir l'article de Volker Springel, page 22).

Toutefois, ces preuves indirectes ne suffisent pas, et les natures de la matière noire et de l'énergie sombre restent à identifier. Plusieurs dispositifs de détection traquent, sous terre, les particules de matière noire (voir l'article de Richard Taillet, page 30). Et, en attendant des indices observationnels ou expérimentaux, les théoriciens explorent les diverses réponses possibles à la question de l'énergie sombre (voir l'article de Cédric Deffayet, page 38). Notre dossier fait le point sur ces recherches visant à élucider le plus grand mystère de la cosmologie moderne.

– Sean Bailly

22 Sur les traces de l'Univers invisible
par Volker Springel

30 Les chasseurs souterrains
de matière noire par Richard Taillet

38 Énergie sombre ou nouvelle
gravitation ? par Cédric Deffayet

Sur les traces de l'Univers invisible

Dans l'Univers, la matière ordinaire n'occuperait qu'une place minime par rapport à deux composantes encore mystérieuses : la matière noire et l'énergie sombre. Les indices en faveur de l'existence de cette face cachée du cosmos se sont accumulés.

Volker Springel



1. LES OBSERVATIONS du télescope spatial Hubble (à gauche) ont permis de reconstruire la distribution de la matière noire (en bleu). La répartition d'abord homogène de cette substance a évolué, au cours du temps, vers des ensembles morcelés (de la droite vers la gauche).

L'ESSENTIEL

- Le modèle du Big Bang décrit de façon satisfaisante l'Univers, mais repose sur l'hypothèse que son contenu est dominé par l'énergie sombre et la matière noire.
- Bien que la nature de ces deux composantes reste inconnue, les indices de leur existence s'accroissent.
- Les idées proposées sur la nature de la matière noire et de l'énergie sombre sont confrontées aux observations. Des pistes alternatives, où l'on se passerait de ces deux entités, sont aussi considérées.

Lars Lindbergh, Christensen, ESO

Quel est le point commun entre le satellite *Planck*, la simulation *Millennium-XXL*, l'expérience *DAMA*, le télescope spatial *Fermi* et le *Supernova Cosmology Project*? Toutes ces expériences visent à explorer l'Univers et à en améliorer la compréhension. Les cosmologistes tentent de mettre de l'ordre dans la multitude d'observations et de données. Comment les interpréter et bâtir une théorie qui décrit l'Univers? Depuis le XX^e siècle, les chercheurs ont élaboré de nombreux modèles. Celui qui semble aujourd'hui le plus satisfaisant est le modèle dit du Big Bang. Comparé aux autres, il explique mieux et plus simplement les observations.

Cependant, ce modèle fait l'hypothèse que la matière ordinaire – les étoiles, la poussière et le gaz, que les physiciens nomment matière baryonique – n'est qu'une petite fraction du contenu de l'Univers. Dans ce modèle, une substance mystérieuse, la « matière noire », est prédominante par rapport à la matière baryonique. Une autre composante non moins étrange, qui s'oppose à la force gravitationnelle omniprésente, entre aussi en jeu : l'« énergie sombre ». Elle est associée à l'accélération, découverte récemment, de l'expansion de l'Univers, expansion qui voit les galaxies s'éloigner les unes des autres de plus en plus vite.

Le rôle cosmologique de la matière noire et de l'énergie sombre semble bien compris, mais la nature de ces deux entités échappe encore aux physiciens. Les détracteurs du modèle du Big Bang y voient deux hypothèses *ad hoc*, ajoutées par les cosmologistes pour rendre compte de certaines observations qu'ils ne savent pas expliquer autrement.

Des idées justifiées par l'observation

Pourtant, les concepts de matière noire et d'énergie sombre reposent sur des arguments observationnels solides. Nous allons montrer comment diverses observations indépendantes ont convaincu la plupart des scientifiques de l'existence de ces deux entités, dont la nature reste mystérieuse, mais que les observations aident à circonscrire. Nous ferons ensuite état des expériences mises en place pour les débusquer.

L'idée que l'Univers n'est peut-être pas rempli uniquement de matière ordinaire s'est

peu à peu imposée aux astronomes dans les années 1970. Les mesures des vitesses de rotation des étoiles au sein des galaxies spirales donnaient l'impression que de la masse supplémentaire est présente, mais sous une forme invisible. Les étoiles des régions externes de ces galaxies en forme de disque ont en effet une vitesse de rotation trop élevée pour que l'attraction gravitationnelle exercée par la matière visible les maintienne sur leur orbite.

L'astronome d'origine suisse Fritz Zwicky avait fait une remarque similaire dans les années 1930 : dans l'amas de la Chevelure de Bérénice, les galaxies se déplaçaient plus vite que prévu. La force gravitationnelle exercée par la matière visible de l'amas était insuffisante pour empêcher les galaxies de cet amas de se disperser. Zwicky parla alors du « problème de la masse manquante ». Pour le résoudre, les astrophysiciens ont supposé l'existence d'une substance qui, bien qu'invisible, se manifeste au moins par sa force gravitationnelle.

Ainsi, les observations des galaxies et des amas de galaxies conduisaient à une même conclusion : une incompatibilité entre le bilan de matière du système étudié et sa dynamique gravitationnelle.

D'autres hypothèses que la matière noire étaient envisageables pour résoudre ce conflit. Mais l'idée de la matière noire s'est renforcée au début des années 1990 lorsqu'elle a permis d'interpréter une observation très différente : les infimes fluctuations de température présentes dans le fond diffus cosmologique. Les mesures fines de ce rayonnement micro-onde en provenance du fond du ciel ont débuté avec le satellite COBE et les expériences embarquées sur ballons stratosphériques, telles que *Boomerang* et *Maxima* ; elles se sont poursuivies avec les satellites WMAP et *Planck*.

Lorsque l'Univers était âgé d'environ 380 000 ans, il s'est refroidi à une température de près de 4 000 kelvins du fait de sa propre expansion. Les noyaux d'hydrogène et d'hélium ont pu capturer des électrons. Les composants formés, les atomes, étaient électriquement neutres et interagissaient moins que les particules chargées avec les photons. Ces derniers ont alors pu s'échapper et parvenir jusqu'à nous.

L'Univers a poursuivi son expansion et la température correspondant au rayonnement du fond diffus a diminué. En moyenne, elle n'est plus que de 2,73 kelvins aujourd'hui (soit 2,73 degrés au-dessus du zéro absolu).

L'AUTEUR

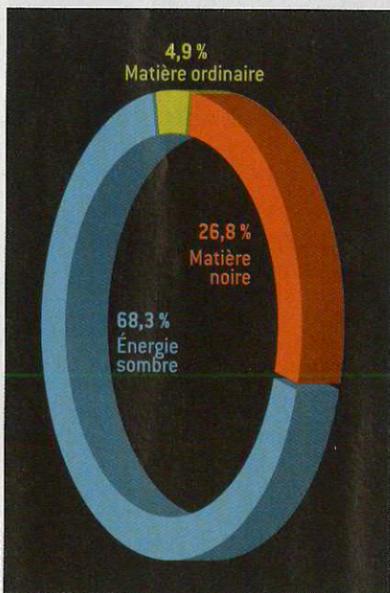


Volker SPRINGEL est professeur d'astrophysique théorique à l'Université de Heidelberg, en Allemagne. Il travaille sur la modélisation de la formation des structures cosmiques et des galaxies à l'Institut d'études théoriques à Heidelberg.

EN VIDÉO



Présentation de l'Agence spatiale européenne du satellite *Planck* et de ses résultats.
<https://www.youtube.com/watch?v=Fn0Fg0wju0w>



2. LA COMPOSITION DE L'UNIVERS peut être estimée par sa densité en énergie. Elle se répartit entre la matière ordinaire, dite baryonique, la matière noire et l'énergie sombre. Les proportions ont été estimées avec précision grâce aux mesures du satellite *Planck*. Les photons contribuent aussi à la densité d'énergie, mais très peu.

Le fond diffus présente toutefois d'infimes variations de température, de l'ordre de quelques dix millièmes de degré par rapport à la température moyenne. Sur une carte du ciel, les fluctuations forment un motif caractéristique de taches (voir la figure 3).

Ces minuscules écarts de température sont la conséquence des mouvements d'oscillation dont était animée la matière baryonique avant que les noyaux capturent leurs électrons. Les particules de matière subissaient alors deux forces antagonistes, l'une tendant à les concentrer et due à la gravité, l'autre tendant à les diluer et due à leurs interactions avec les photons piégés dans le plasma (le milieu constitué de particules électriquement chargées et de photons). Les oscillations se sont traduites par des régions plus ou moins denses en matière et par l'apparition de fluctuations de température.

Leur analyse statistique permet de mettre en évidence les phénomènes qui étaient en jeu dans les oscillations baryoniques ou qui ont perturbé le trajet des photons. L'interprétation des résultats suggère par exemple que la matière noire a joué un rôle dans ces oscillations.

Le fond diffus : un pilier de la cosmologie

La découverte du fond diffus cosmologique et de ses fluctuations de température a été cruciale pour construire ce qui est aujourd'hui le « modèle standard » de la cosmologie. Ce dernier repose sur une solution exacte des équations de la relativité générale d'Albert Einstein, dite métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker et qui décrit la géométrie de l'espace-temps dans l'hypothèse où l'Univers est homogène et isotrope aux grandes échelles. Nommé « Λ CDM » (*Lambda Cold Dark Matter*), ce modèle décrit un Univers initialement chaud, dense et en expansion. La physique des particules décrit les différentes phases que traverse l'Univers lors de son refroidissement. Tout cela est contrôlé par sa composition et seulement six paramètres, déterminés à partir de centaines de milliers de mesures indépendantes effectuées sur le fond diffus cosmologique.

En résumé, les observations du fond diffus cosmologique, de la dynamique des galaxies et de celle des amas de galaxies indiquent que de la matière noire est présente. Mais quelle est sa nature ? Les physiciens supposent qu'il s'agit de particules apparues très tôt dans l'Univers chaud.

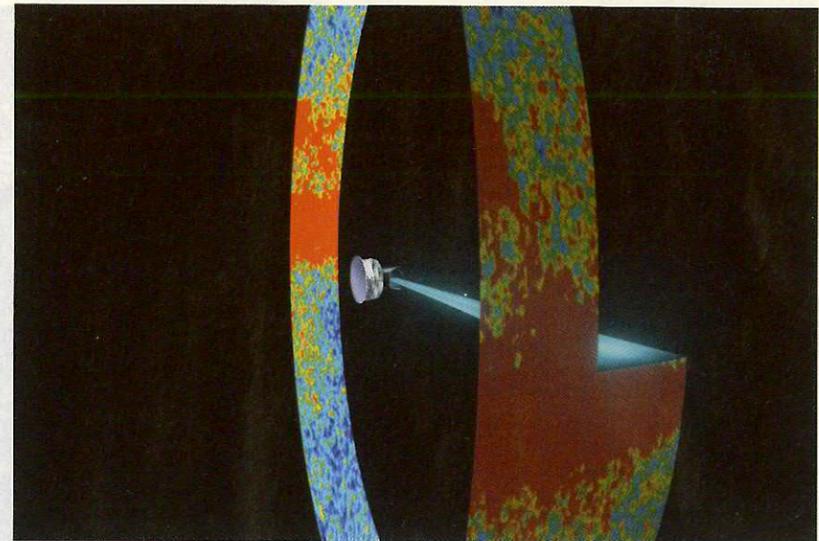
Les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire maintenaient à l'époque un certain équilibre du nombre de ces particules. Mais à mesure que la température a diminué, les interactions des particules de matière noire avec les autres ont faibli et la matière noire s'est « découplée » de l'équilibre thermique de l'Univers. Le nombre de particules de matière noire est devenu constant, et leur densité a diminué du seul fait de l'expansion de l'Univers. Par ailleurs, leur vitesse est devenue insignifiante, et l'on parle donc de « matière noire froide » (en anglais *cold dark matter*, CDM).

L'étude du fond diffus cosmologique a mis en évidence les substances qui composent l'Univers, mais dans quelles proportions sont-elles présentes ? Une partie de la réponse est donnée par l'étude de la géométrie de l'Univers. Dans le cadre de la relativité générale, la matière et l'énergie déforment l'espace-temps. De la même façon, aux grandes échelles, la composition de l'Univers influe sur sa géométrie. Les observations suggèrent que la géométrie de l'Univers est euclidienne, c'est-à-dire que les axiomes d'Euclide sont vérifiés sur de grandes distances (ce qui n'est pas le cas à proximité d'un objet très massif, qui courbe l'espace-temps). Or pour que la géométrie soit euclidienne à grande échelle, la densité d'énergie de l'Univers doit avoir une certaine valeur critique. Mais on montre que les densités estimées de matière ordinaire et de matière noire ne suffisent pas pour obtenir la bonne densité d'énergie.

Ce qui manque a été nommé « énergie sombre ». Dans ses versions les plus simples, on peut l'identifier comme la densité d'énergie liée à l'état du vide quantique (où de grandes quantités de particules et d'antiparticules apparaissent et disparaissent spontanément) ou tout simplement comme une « constante cosmologique », un paramètre supplémentaire intervenant dans les équations d'Einstein et noté Λ (lambda).

C'est sur la matière noire froide et la constante cosmologique que se fondent les prévisions du modèle standard Λ CDM. Dans ce cadre, l'analyse des fluctuations du fond diffus cosmologique conduit à la répartition suivante de la densité d'énergie dans l'Univers actuel : l'énergie sombre en représente 68,3 pour cent, la matière noire 26,8 pour cent et la matière baryonique ne contribue que pour les 4,9 pour cent restants.

Ces résultats sont d'autant plus convaincants qu'on les obtient aussi par d'autres



3. LE SATELLITE PLANCK a cartographié le rayonnement du fond diffus cosmologique sur l'ensemble du ciel, dont seule une portion est représentée ici (les différences de température sont représentées par les couleurs). Les données confirment le modèle standard de la cosmologie, selon lequel la matière noire et l'énergie sombre prédominent dans l'Univers.

observations indépendantes. Par exemple, l'abondance des éléments légers (hydrogène, deutérium, hélium, lithium) formés dans l'Univers primordial peut être calculée en considérant les réactions nucléaires qui se sont déroulées quelques minutes après la naissance de l'Univers, quand les températures étaient de l'ordre de 10^{10} degrés. Un paramètre décisif dans le calcul est la densité de matière baryonique. L'utilisation de la densité obtenue par l'analyse du fond diffus donne des abondances d'éléments légers qui concordent avec les mesures portant sur les étoiles, dont la composition chimique a peu évolué par rapport à celle de l'Univers primordial.

Un autre exemple est fourni par les grands amas de galaxies. Il existe différentes façons d'estimer leur masse. L'une d'elles consiste à utiliser l'effet de lentille gravitationnelle, où l'amas déforme légèrement les images de galaxies éloignées (la distribution de matière courbe localement l'espace-temps, déviant ainsi la trajectoire des photons et altérant les images d'objets lumineux). Le résultat ainsi obtenu peut être comparé à ceux issus de l'analyse des émissions de rayons X du plasma chaud entre les galaxies, des calculs des mouvements de galaxies ou de l'estimation de la masse à partir de l'effet Sunyaev-Zeldovich (un effet lié à l'interaction des photons du fond diffus cosmologique avec la matière des amas de galaxies). Les différentes estimations de

la masse des amas et de leur quantité de matière noire sont compatibles entre elles.

La matière noire semble donc omniprésente dans l'Univers ; elle se manifeste à différentes époques (de l'Univers primordial à aujourd'hui) et à différentes échelles (galactique à cosmologique). Mais les mesures sont-elles interprétées correctement ? Les chercheurs explorent d'autres scénarios et, par exemple, se demandent s'ils comprennent bien la loi de la gravitation. Autrement dit : une modification de la loi de la gravitation pourrait-elle expliquer les observations sans faire l'hypothèse de la matière noire ?

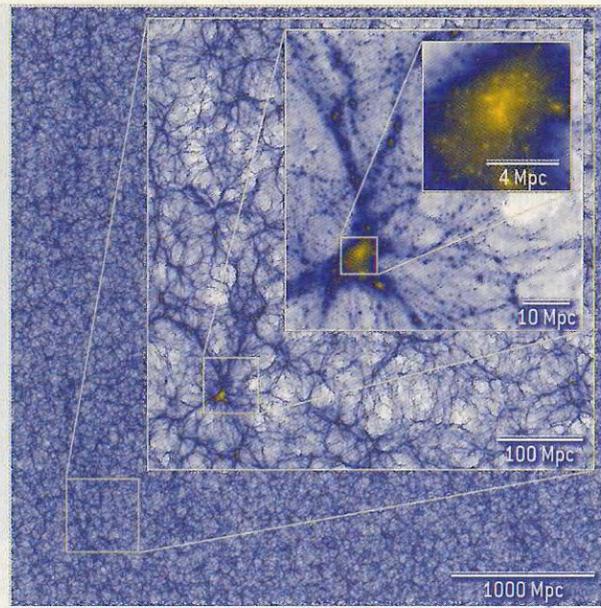
Une théorie sans matière noire ?

Dans cet ordre d'idées, Mordehai Milgrom, de l'Institut Weizmann en Israël, a proposé en 1983 la théorie MOND, la théorie de la « Dynamique newtonienne modifiée ». Il postule que la force gravitationnelle suit une loi modifiée pour des accélérations très faibles. Cette théorie explique ainsi très bien les vitesses de rotation au sein des galaxies et a même été généralisée depuis par la théorie TeVeS (théorie tenseur-vecteur-scalaire) de Jacob Bekenstein, à l'Université hébraïque de Jérusalem, pour des vitesses proches de celle de la lumière.

Malheureusement, les succès de la théorie MOND se limitent à l'échelle de la galaxie. Son utilisation pour décrire une structure telle que le *Bullet Cluster* – ou Amas du



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).



R. E. Angulo, Institut Max Planck d'astrophysique à Munich

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

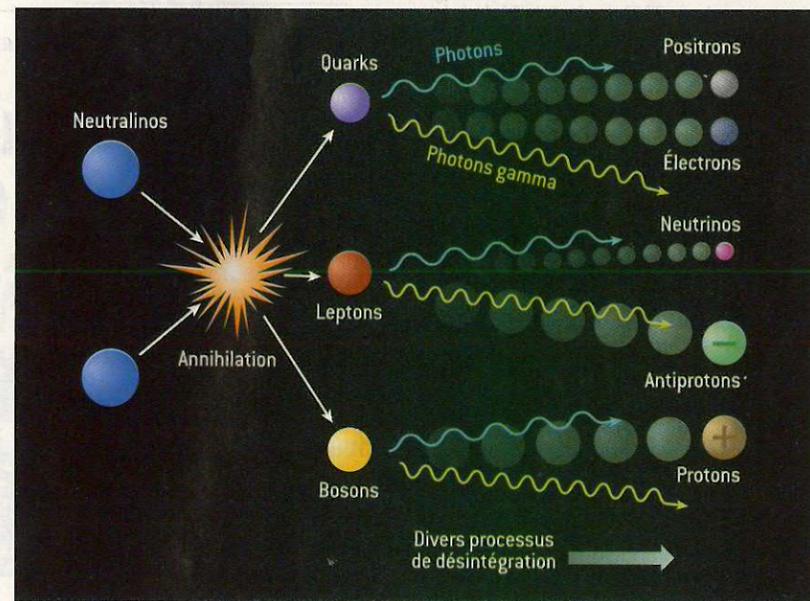
électron-positron. Mais d'autres processus physiques, telle l'émission de positrons par les pulsars, peuvent tout aussi bien reproduire les résultats de ces expériences.

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.

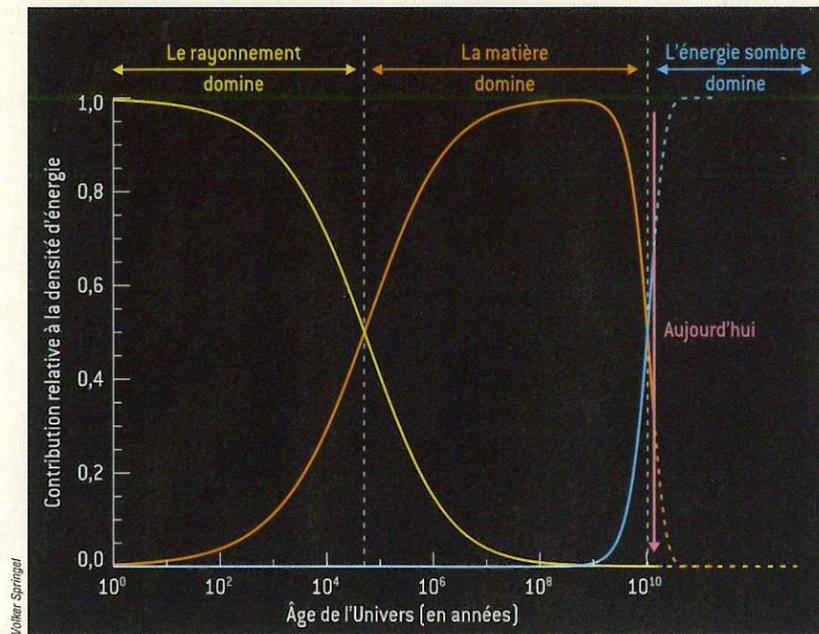
Par ailleurs, certaines observations ne sont pas en accord avec le modèle Λ CDM et sèment donc un doute sur la matière noire supposée par ce modèle. Par exemple, le modèle prévoit une population de petites galaxies gravitant autour de la Voie lactée beaucoup plus importante que celle observée. L'absence 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'accélérait, 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 supernovae 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 supernovae 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 supernovae ont montré que l'expansion de l'Univers était plus faible dans le passé, donc qu'elle s'accélérait 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,

mais aussi à reconstituer l'histoire de l'expansion. Comprendre l'évolution de l'Univers permettrait de mieux cerner les propriétés de l'énergie sombre et ainsi d'éliminer certaines hypothèses sur sa nature.

Le projet le plus ambitieux dans ce domaine est la mission *Euclid* de l'Agence spatiale européenne. Plus d'un millier de physiciens et d'ingénieurs participent à ce projet. Le satellite doit être lancé vers 2020 et exploitera plusieurs effets physiques pour mesurer l'expansion de l'espace. Parmi ces effets figurent celui de lentille gravitationnelle et les oscillations baryoniques acoustiques. Ces dernières proviennent des oscillations de la matière baryonique dans le plasma primordial, qui laissent aussi leurs traces dans le fond diffus cosmologique. Les oscillations se sont également imprimées dans la répartition de la matière, les zones les plus denses du plasma ayant donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les oscillations peuvent de ce fait être étudiées en examinant la répartition statistique des galaxies dans l'Univers.

Ces oscillations peuvent servir d'échelle de mesure gigantesque. En observant les échelles caractéristiques de distribution de la matière à différentes époques du développement cosmique, il est possible de reconstituer l'histoire de l'expansion de l'Univers.

L'évolution cosmique mesurée par Euclid

Pour ce faire, le satellite *Euclid* mesurera le décalage vers le rouge de plus de 100 millions de galaxies. En outre, il déterminera la forme – l'ellipticité – de plus de deux milliards de galaxies. Ces mesures mettront en évidence les déformations dues à l'effet de lentille gravitationnelle, qui à leur tour permettent de mesurer la densité cosmique de matière à différentes époques et la vitesse de développement des structures cosmiques. Cela représentera *in fine* une méthode supplémentaire et indépendante pour mesurer les propriétés de l'énergie sombre.

Les astrophysiciens ont accumulé de nombreuses observations, diverses et indépendantes, qui pointent vers l'exis-

tence de la matière noire et de l'énergie sombre. Mais d'autres scénarios sont proposés, étudiés et comparés. Lorsque les scientifiques sont confrontés à plusieurs explications différentes d'un même phénomène, ils choisissent en général la plus simple. Ce principe, connu sous le nom de rasoir d'Ockham, s'applique-t-il à l'hypothèse d'un Univers en majeure partie composé d'une matière noire et d'une énergie sombre ? Aussi audacieuse qu'elle paraisse, cette hypothèse semble mieux placée que tous les autres scénarios quand on considère leur plausibilité et leur simplicité. Mais ce n'est qu'en détectant directement des particules de matière noire que nous pourrions balayer les doutes sur cette dernière. Quant à l'existence de l'énergie sombre, il sera sans doute plus difficile de convaincre les sceptiques : cette composante cosmique sera probablement impossible à détecter directement dans des laboratoires terrestres. La recherche des composantes invisibles de l'Univers reste ainsi l'un des plus grands défis de l'astrophysique et de la cosmologie. ■

La physique surprise

Jean-Michel Courty • Édouard Kierlik

La physique surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Que nous réserve cette Physique surprise ? Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre. Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air. Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8425-5121-9

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr