



Pourquoi les réseaux sociaux nous rendent-ils malheureux ?

Parce que visiter des profils sur Internet où chacun se vante de toutes les réussites fait naître beaucoup de frustration.

Quatre chercheurs en sciences de l'information de l'Université Humboldt de Berlin et celle de Darmstadt, en Allemagne, ont réalisé une étude dont les résultats ont suscité de nombreux commentaires. Elle montre notamment que l'utilisation de Facebook, le réseau social en ligne qui compte plus d'un milliard d'utilisateurs, crée beaucoup de frustration et de jalousie. Pourquoi ? Parce que sur ce réseau social, comme sur d'autres, chacun a tendance à se mettre en scène et à donner de sa vie un aperçu souvent flatteur. Cette exhibition peut créer chez celui ou celle qui en est le témoin un sentiment d'insatisfaction. Il – ou elle – peut alors avoir l'impression, par comparaison, que sa vie est moins intéressante en moyenne que celles de ses amis.

Près de 40 pour cent des 600 personnes interrogées pour cette expérience avaient le sentiment d'être plus malheureuses après s'être connectées à ce réseau, et ce sentiment était encore plus fort parmi les personnes qui ne publiaient rien sur leur propre « mur ». Elles ressentaient, plus que les autres, solitude, colère, ressentiment. Parmi toutes les informations qui les blessaient et causaient cette frustration, les photos de vacances de leurs amis figuraient en première place. Ce type de sentiment n'a certes pas attendu l'apparition d'Internet pour exister, mais il est vrai que le Web peut l'amplifier, car il donne une plus grande visibilité à la mise en scène de la « réussite » d'autrui.

Ces résultats amusants n'ont rien d'étonnant pour qui a lu Alexis de Tocqueville (1805-1859), lequel a souligné avec clairvoyance le fait que les sociétés démocratiques engendrent, par nature, une proportion de personnes frustrées supérieure à celle de tous les autres systèmes sociaux en raison des principes sur lesquels elles sont fondées : récompense du mérite et revendication de l'égalité de tous. Ce magistrat et



INTERNET SUSCITE FRUSTRATION et envie, car chacun se met en scène à son avantage.

historien français fut le premier à observer cette conséquence paradoxale de la vie dans les sociétés démocratiques.

Dans les années 1830, il parcourt la jeune république américaine et constate que l'âme de ses citoyens, qui n'ont pas trop à se plaindre de leurs conditions matérielles, est atteinte d'un mal étrange, une forme de mélancolie fondée sur l'injonction paradoxale de l'ambition et de l'insatisfaction. C'est que, contrairement aux sociétés traditionnelles, le destin de chacun y paraît ouvert. Nul ne peut savoir s'il sera destiné à la réussite économique ou à la déchéance, par conséquent, il est permis à tous d'espérer. Parce que les citoyens de ces

systèmes politiques revendiquent l'égalité, ils sont enclins, plus que partout ailleurs, à mesurer les différences qui les séparent des autres et en particulier des plus favorisés qu'eux. Le sentiment d'avoir le droit d'obtenir les mêmes choses que les autres et l'envie d'en avoir un peu plus constituent deux invariants de l'équation de la frustration.

Ce que n'avait pas pris en compte Tocqueville dans ses réflexions, c'est que la réussite d'autrui nous blesse seulement si elle est visible. Or l'apparition d'Internet et des réseaux sociaux opèrent une profonde mutation de la visibilité sociale et de la possibilité qui s'offre à chacun de mettre en scène sa réussite. Nous avons beau avoir souvent conscience qu'il peut s'agir d'un jeu de dupes, il semble que nous n'ayons pas toujours assez de sagesse pour ne pas en être blessés.

Mais le problème n'est pas sans solution ! L'une d'elles consiste à choisir des amis (cela fonctionne aussi pour la vraie vie) ayant des revenus un peu inférieurs aux nôtres, une situation amoureuse plus fragile et un confort général moins évident. Ainsi, nous garderons plus facilement à l'esprit le caractère artificiel de l'exhibition de leur bonheur. Enfin, rien ne nous empêche de nous réciter chaque jour comme une incantation l'une des plus tristes, mais des plus lucides, maximes de La Rochefoucauld : « Dans l'adversité de nos meilleurs amis, nous trouvons toujours quelque chose qui ne nous déplaît pas. » ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

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 Bailey

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'accumulent.
- 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 *Milennium-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 déboucher.

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.

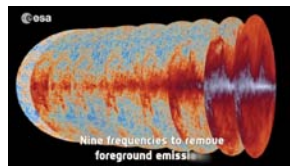
L'Univers a poursuivi son expansion et la température correspondant au rayonnement du fond diffus a diminué. En moyenne, elle n'est plus que de 2,73 kelvins aujourd'hui (soit 2,73 degrés au-dessus du zéro absolu).

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=Fn0Fg0wyu0w>

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).

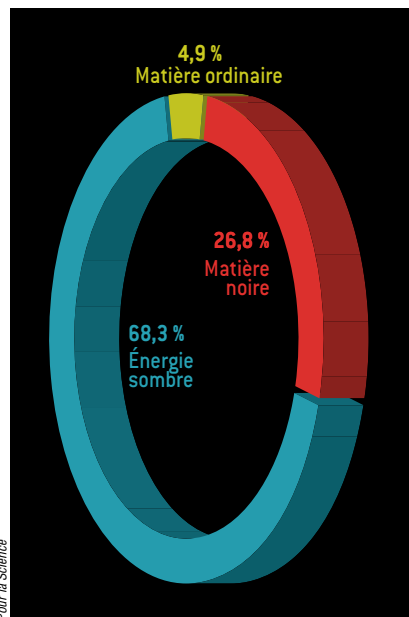
Ces minuscules écarts de température sont la conséquence des mouvements d'oscillation dont était animée la matière baryonique avant que les noyaux capturent leurs électrons. Les particules de matière subissaient alors deux forces antagonistes, l'une tendant à les concentrer et due à la gravité, l'autre 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.



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.

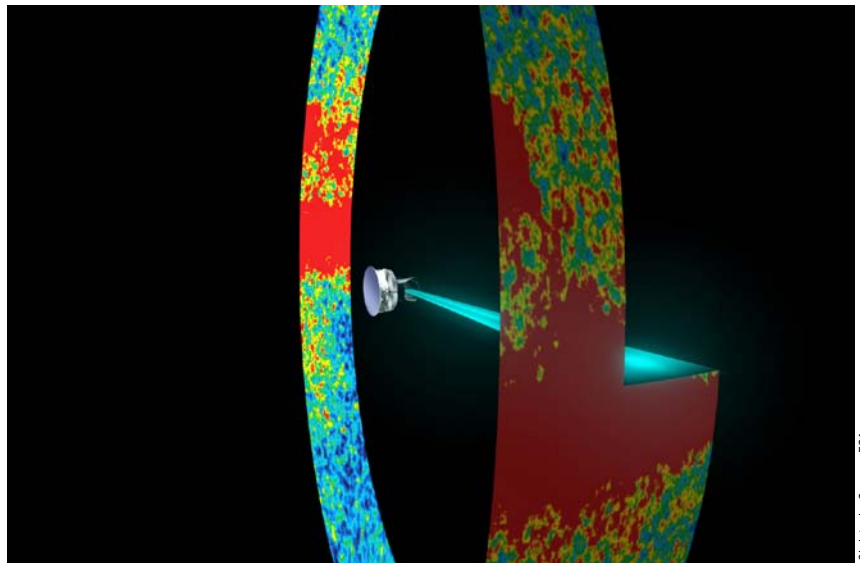
Les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire maintenaient à l'époque un certain équilibre du nombre de ces particules. Mais à mesure que la température a diminué, les interactions des particules de matière noire avec les autres ont faibli et la matière noire s'est « découplée » de l'équilibre 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



Christophe Carreau, ESA

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 ?

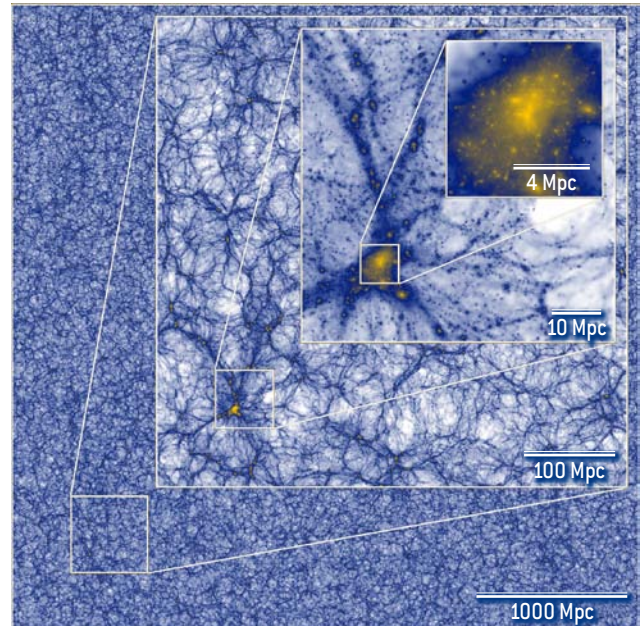
Une théorie sans matière noire ?

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*).



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.

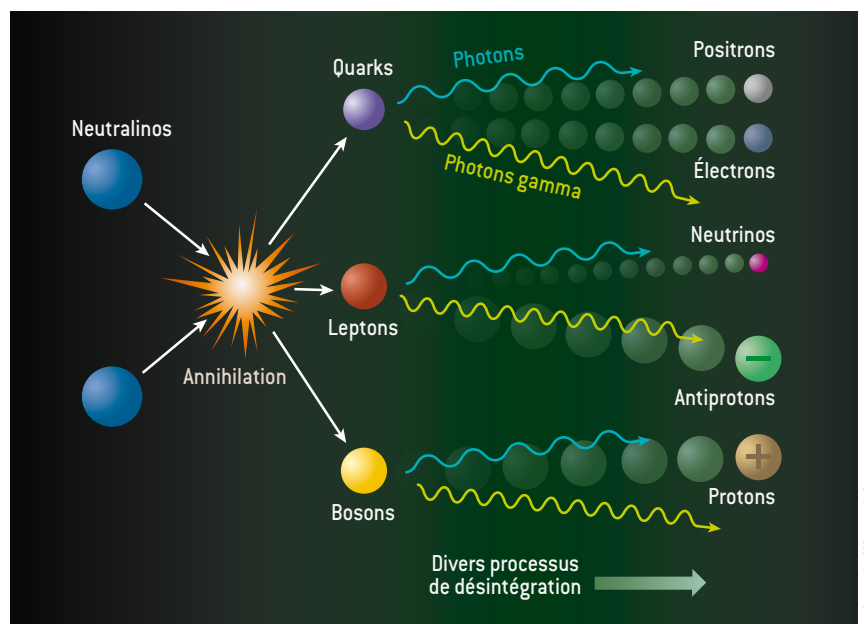
électron-positron. Mais d'autres processus physiques, telle l'émission de positrons par les pulsars, peuvent tout aussi bien reproduire les résultats de ces expériences.

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.

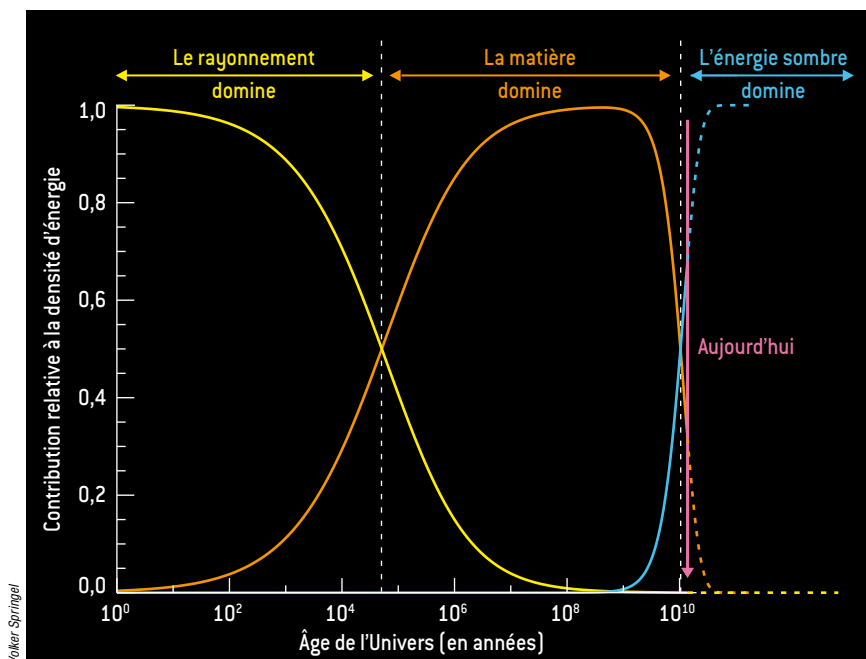
Par ailleurs, certaines observations ne sont pas en accord avec le modèle Λ CDM et sèment donc un doute sur la matière noire supposée par ce modèle. Par exemple, le modèle prévoit une population de petites galaxies gravitant autour de la Voie lactée beaucoup plus importante que celle observée. L'absence 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,

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.

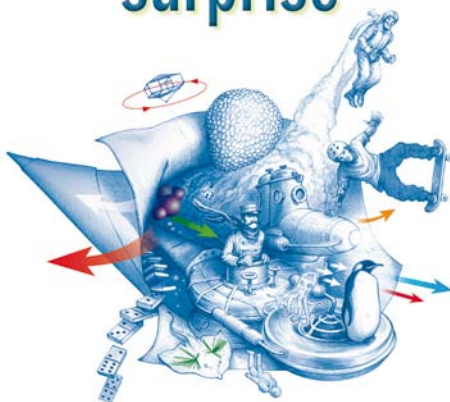
Les astrophysiciens ont accumulé de nombreuses observations, diverses et indépendantes, qui pointent vers l'exis-

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



elin POUR LA SCIENCE

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

Les chasseurs souterrains de **matière noire**

Richard Taillet

Les physiciens recherchent les particules de matière noire à l'aide d'instruments installés dans d'anciennes mines.

La sensibilité des détecteurs augmente et l'étau se resserre autour de cette composante hypothétique de l'Univers.

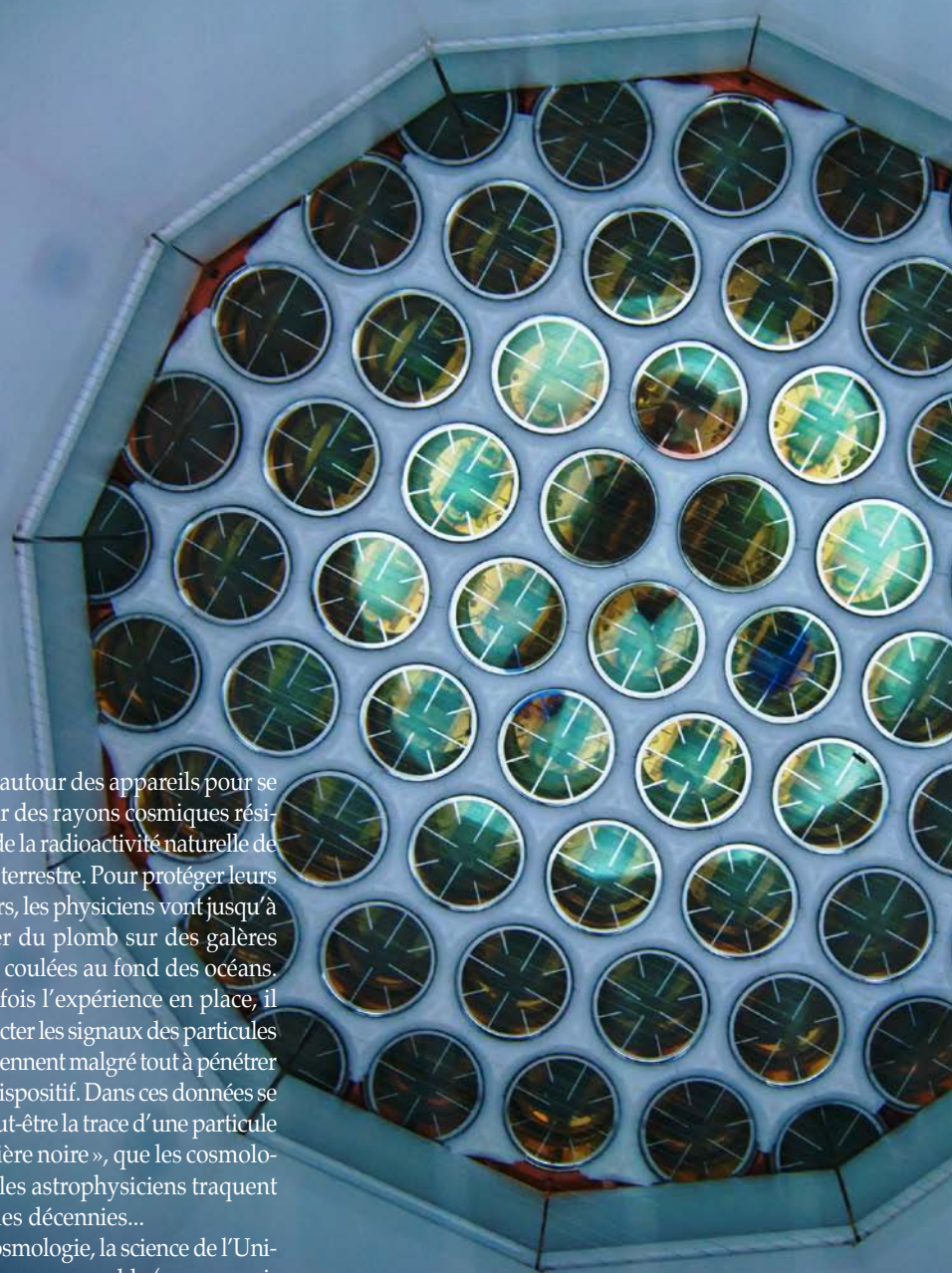
Dans de nombreux sites, les physiciens investissent d'anciennes mines pour y installer des détecteurs de particules, parfois à plus de 2000 mètres de profondeur. Très sensibles, ces détecteurs sont capables d'enregistrer une infime élévation de température, de capter le moindre éclat de lumière ou d'entendre des micro-bulles qui éclatent.

Mais le moindre signal parasite les perturbe. C'est pourquoi on les installe dans des souterrains. La roche fait office de bouclier contre les rayons cosmiques qui pénètrent dans l'atmosphère et qui traversent parfois le sol. Des blindages supplémentaires sont

installés autour des appareils pour se prémunir des rayons cosmiques résiduels et de la radioactivité naturelle de la croûte terrestre. Pour protéger leurs détecteurs, les physiciens vont jusqu'à récupérer du plomb sur des galères antiques coulées au fond des océans.

Une fois l'expérience en place, il faut collecter les signaux des particules qui parviennent malgré tout à pénétrer dans le dispositif. Dans ces données se cache peut-être la trace d'une particule de « matière noire », que les cosmologistes et les astrophysiciens traquent depuis des décennies...

La cosmologie, la science de l'Univers dans son ensemble (sa compo-



1. L'EXPÉRIENCE LUX,
aux États-Unis, traque depuis 2013
les rares interactions des particules
de matière noire avec le xénon
liquide contenu dans la cuve
du détecteur.



Carlos H. Falgar

tion et son histoire) est dans une situation paradoxale et embarrassante. D'une part, en s'appuyant sur la théorie de la relativité générale d'Einstein et la physique des particules, deux solides piliers de la physique fondamentale, elle rend compte de façon très précise et quantitative d'un grand nombre d'observations astronomiques. D'autre part, ce succès repose sur une hypothèse hardie, elle aussi confortée indirectement par de nombreuses observations astrophysiques, mais qui n'a encore jamais pu être vérifiée directement : l'Univers serait rempli d'une grande quantité de matière noire, c'est-à-dire d'une substance qui n'émet ni n'absorbe la lumière (elle est transparente plutôt que noire) et qui échappe donc à l'observation à travers les télescopes (voir l'article de V. Springel page 22). L'Univers contiendrait aussi une seconde substance hypothétique, l'«énergie sombre», mais dont on ne traitera pas ici (voir l'article de C. Deffayet page 38).

La physique des particules donne de bonnes raisons de penser que la matière noire pourrait être constituée de particules nouvelles, différentes de celles que l'on connaît aujourd'hui. Cette hypothèse est confortée par l'étude de la formation des noyaux atomiques dans l'Univers primordial, qui montre que la matière ordinaire ne représente qu'un cinquième de la masse qui emplit l'Univers. Le reste serait donc de la matière noire.

La matière noire se manifeste par ses effets gravitationnels à grande échelle. Mais si elle est constituée de particules, les physiciens espèrent la détecter comme on le fait avec les particules créées lors de collisions dans les accélérateurs. Depuis environ 30 ans, les astrophysiciens et les physiciens des particules ont développé des expériences pour mettre en évidence des particules de matière noire avec des techniques dérivées de celles utilisées dans les grands collisionneurs. On parle de recherche de matière noire par détection directe.

Le succès de ce type de recherche est conditionné par plusieurs facteurs que nous allons passer en revue : l'abondance des

particules de matière noire qui traversent la Terre, leur capacité à interagir avec la matière ordinaire (pour concevoir des détecteurs efficaces) et la nécessité d'avoir des outils performants d'analyse de données pour trier, parmi les particules détectées, celles qui relèvent de la matière noire.

Le premier est un facteur astrophysique sur lequel les expérimentateurs n'ont aucun contrôle : si les particules de matière noire sont nombreuses, les chances d'en détecter augmentent. Le deuxième dépend d'une part de la nature de la particule recherchée et d'autre part du dispositif expérimental – sa taille, le choix des matériaux, la durée

de prise de données... Le troisième facteur constitue le cœur de métier de la physique expérimentale : identifier la source de chaque signal, éliminer le bruit de fond qui comprend tous les signaux masquant les traces de la matière noire.

Ces dernières années, les physiciens ont amélioré la sensibilité de leurs dispositifs, ce qui permet de restreindre l'éventail des possibilités et des hypothèses. La difficulté principale est que, contrairement à la plupart des situations que l'on rencontre en physique des particules, on ignore la nature de la particule que l'on cherche à détecter. Imaginez la chasse d'un animal dont vous ne connaissez pas la taille, les habitudes, ni même s'il vole, rampe,

ou galope ! On dispose tout de même de certaines contraintes théoriques, comme nous le verrons.

Que savons-nous de la matière noire ? Elle ne fait pas partie du modèle standard de la physique des particules qui décrit les forces fondamentales et les constituants élémentaires connus de la matière. Ce modèle explique un très grand nombre de résultats expérimentaux, mais il présente aussi plusieurs défauts. C'est pourquoi les physiciens explorent des extensions possibles du modèle standard. Certaines de ces théories prédisent l'existence de nouvelles particules qui interagissent très faiblement avec la matière et qui sont donc d'excellents candidats pour la matière noire.

L'ESSENTIEL

■ **Les particules de matière noire, si elles existent, interagissent très rarement avec la matière ordinaire.**

■ **Les physiciens tentent de les mettre en évidence au moyen de détecteurs souterrains.**

■ **Certains dispositifs présentent un signal interprété comme de la matière noire, d'autres excluent ces résultats.**

■ **Malgré de tels résultats contradictoires, les chercheurs cernent de mieux en mieux les caractéristiques possibles de la matière noire.**

Ces particules portent le nom générique de WIMP, acronyme anglais de *Weakly Interacting Massive Particle*, qui signifie aussi « mauviette ». Les scientifiques francophones ont gardé le terme de WIMP. La supersymétrie, une de ces extensions théoriques, suscite un intérêt particulier depuis que les cosmologistes ont observé une coïncidence troublante, dont l'explication nécessite de revenir brièvement sur l'histoire de l'Univers.

Depuis les âges les plus reculés de l'Univers, l'abondance des différents types de particules évolue au cours du temps pour deux raisons. D'une part, l'Univers est en expansion, ce qui dilue la matière. D'autre part, quand l'Univers était suffisamment chaud et dense, les particules entraient en collision et interagissaient – elles s'annihilaient, se détruisaient et produisaient d'autres particules.

Cependant, pour chaque type de particule, il arrive un moment où la dilution due à l'expansion de l'Univers réduit drastiquement la probabilité que cette particule interagisse avec d'autres. Il n'y a alors plus de destruction ou de production de ce type de particules, dont le nombre

L'AUTEUR



Richard TAILLET est professeur à l'Université de Savoie. Il effectue ses recherches en astrophysique au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique.

EN VIDÉO



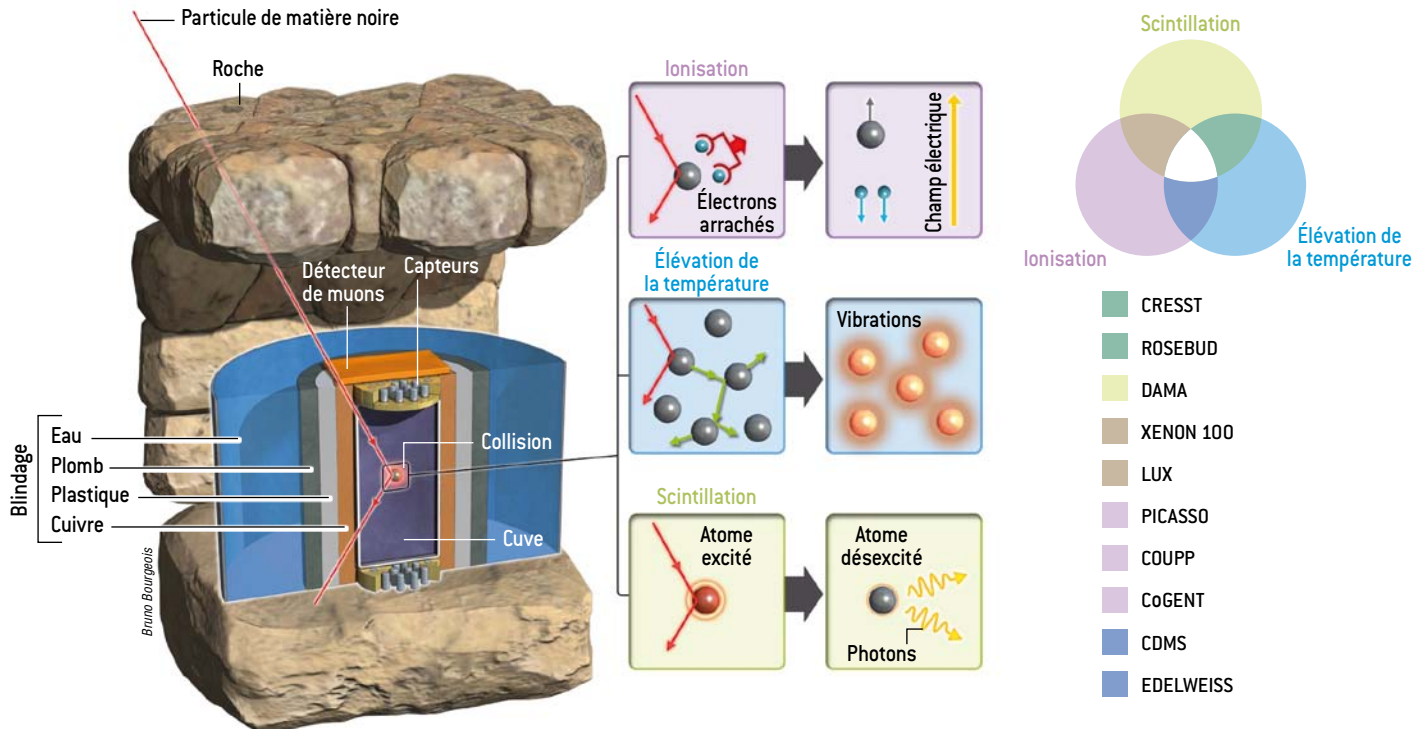
Deux physiciens, Daniel Whiteson et Jonathan Feng, parlent de la matière noire, avec Jorge Cham au dessin : https://www.youtube.com/watch?v=8kCti0S_F_M

total se fige. La densité de ces particules n'évolue plus que par dilution.

Les physiciens se servent des modèles cosmologiques pour calculer avec précision le moment où ce phénomène survient pour chaque type de particule, dont celles qui pourraient constituer la matière noire. Ils comparent l'abondance obtenue avec celle déduite des observations astrophysiques.

Or plusieurs des candidats au titre de la matière noire fournis par la physique des particules, en particulier le neutralino prédit par les théories supersymétriques, donnent naturellement lieu à des abondances « reliques » dont l'ordre de grandeur correspond justement à la valeur estimée de la densité moyenne de matière noire dans l'Univers ! Cette particularité du neutralino a conforté l'idée qu'il est un bon candidat pour la matière noire. Les physiciens ont donc entrepris de détecter cette particule.

Le fait de se fixer une hypothèse (le neutralino dans un modèle supersymétrique ou tout autre candidat à la matière noire) contraint certaines propriétés de la particule recherchée : son spin (moment cinétique intrinsèque), sa masse et sa section efficace d'interaction (une grandeur donnant la



2. DANS UN DÉTECTEUR DE MATIÈRE NOIRE, la particule entre en collision avec un noyau atomique du dispositif. En fonction de la nature du matériau dans la cuve, trois processus sont possibles : l'ionisation (des électrons sont arrachés à l'atome), l'élévation de température (l'agitation thermique des atomes augmente) ou la scintillation (le noyau atomique excité émet des photons). Des capteurs situés au-des-

sus et au-dessous de la cuve enregistrent les signaux. Pour limiter l'influence du bruit de fond parasite, le détecteur (la cuve et les capteurs) est protégé par un blindage qui bloque la radioactivité naturelle et les rayons cosmiques. Les divers détecteurs existants (*colonne de droite*) reposent sur des concepts différents. Ils sont sensibles à un ou deux des trois processus liés à la collision.

Les filaments et grumeaux galactiques de matière noire

La détection directe de matière noire n'est possible que si la Terre traverse une région de la Galaxie contenant une densité suffisante de matière noire. Cependant, les physiciens ne connaissent pas la répartition de la matière noire galactique, et utilisent donc des modèles théoriques.

La distribution de la matière noire serait sphérique – ce qu'on nomme le halo de matière noire – avec une concentration plus importante au centre de la galaxie et plus faible en périphérie.

Les modèles donnent tous, pour la position du Système solaire, une densité moyenne de quelques particules de matière noire (d'une masse de 100 gigaelectronvolts) par litre. Mais même si la densité moyenne de matière noire était bien connue

en fonction de la distance au centre galactique, cela ne donnerait aucune information sur la densité locale. En effet, le halo ne serait pas homogène : les simulations montrent que la matière noire forme des structures en filaments et des grumeaux (voir la simulation *Aquarius* ci-contre, où les points lumineux sont des grumeaux de matière noire). La Terre pourrait être située dans un de ces filaments, ou au contraire se trouver dans une région pauvre en matière noire.

Un autre paramètre entre en compte dans l'estimation du nombre de particules de matière noire que l'on pourrait détecter : la distribution des vitesses de ces particules dans la Galaxie. Elle pourrait différer sensiblement de celle, très simple, que considèrent en général les théoriciens, faute de

mieux. Les scientifiques n'ont à ce jour aucun moyen de connaître la vitesse et la direction des particules. Cette incertitude pèse à la fois sur l'estimation des capacités de détection directe et sur les conclusions que l'on peut tirer de l'absence de détection par une expérience.



Volker Springel/Censurium Virgo

probabilité d'interagir avec d'autres particules). Si l'abondance de particules WIMP doit être égale à la densité de matière noire moyenne dans l'Univers, il en résulte des contraintes supplémentaires sur la masse et la section efficace de ces particules.

Comment mesurer avec précision leurs caractéristiques ? Les expériences de détection directe sont une voie dont l'idée a émergé dans les années 1980, une décennie après les travaux des astrophysiciens sur la dynamique des galaxies. Ces travaux avaient montré que le mouvement des étoiles dans les galaxies ne pouvait être compris que si les galaxies sont entourées d'un nuage, ou halo, sphérique de matière noire (voir l'encadré ci-dessus).

Détecter le recul de noyaux atomiques

Dans ce cas, des particules de matière noire sont présentes dans le voisinage de la Terre et traversent notre planète à chaque instant sans interagir, ou de façon exceptionnelle. En 1985, Mark Goodman et Edward Witten, de l'Université Princeton aux États-Unis, ont proposé de concevoir des dispositifs capables de détecter ces particules. Dès l'année suivante, plusieurs équipes ont réalisé qu'elles pouvaient reprendre assez directement et à peu de frais des techniques qui avaient

été développées pour la recherche d'un processus nucléaire rare (la désintégration double bêta sans émission de neutrinos).

Le principe consiste à observer la trace laissée par un WIMP lors de son passage dans un détecteur. Lorsqu'un WIMP atteint un bloc de matière (la cible), la probabilité qu'il interagisse avec un atome du milieu est extrêmement faible et, la plupart du temps, le WIMP traverse le milieu sans le perturber. Mais, parfois, un WIMP percute un noyau (typiquement une interaction tous les dix jours dans un kilogramme de germanium). Il lui communique un mouvement de recul, comme au billard. Ce recul peut déclencher trois processus différents que les instruments pourraient détecter : l'ionisation, l'élévation de température ou la scintillation (voir la figure 2).

Dans le processus d'ionisation, des électrons sont arrachés à l'atome dont le noyau a été percuté par le WIMP. Un champ électrique appliqué au matériau les conduit vers des électrodes. On mesure alors la charge totale recueillie par le détecteur.

Dans le cas d'une élévation de température, le WIMP cède son énergie par collision à un atome, qui lui-même le transmet à d'autres atomes du milieu *via* son mouvement de recul. Cette agitation des atomes se traduit par une vibration qui prend la forme d'ondes acoustiques (phonons).

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 4 septembre 2014, de 14h à 15h, Richard Taillet reviendra sur la recherche de la matière noire dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences** sur France Culture. www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

L. E. Strigari, **Galactic searches for dark matter**, *Physics Reports*, vol. 531(1), pp. 1-88, 2013.

R. Sanders, **À la recherche de la matière noire**, De Boeck, 2012.

M. Trodden *et al.*, **Matière noire, un Univers caché**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

T. J. Sumner, **Experimental searches for dark matter**, *Living Reviews in Relativity*, vol. 5, n° 4, 2002.

S. van den Bergh, **A short history of the missing mass and dark energy paradigms**, *Historical Development of Modern Cosmology*, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 252, 2001.

Ces ondes finissent par se dissiper, ce qui conduit à une hausse de la température du milieu. Celle-ci est minuscule et sa mesure requiert d'utiliser des systèmes de cryogénie avec des détecteurs refroidis à quelques centièmes de kelvin, c'est-à-dire proches du zéro absolu.

Dans le cas du processus de scintillation, le noyau est excité par sa collision avec le WIMP. Il peut se désexciter en émettant de la lumière par fluorescence, phénomène qu'on nomme scintillation lorsqu'il se produit dans un milieu transparent comme les cristaux d'iodure de sodium (NaI), le xénon liquide ou l'argon liquide. Des photodétecteurs mesurent alors la lumière émise.

Les quantités d'ionisation, d'élévation de température ou la longueur d'onde des photons émis sont reliées à l'énergie que le WIMP transfère au noyau lors de la collision. Cette information permet de calculer la masse du WIMP. La fréquence des interactions des particules de matière

noire dans le détecteur donne accès à la section efficace d'interaction. Les chercheurs se concentrent sur la mise en évidence d'un signal et la mesure de ces deux paramètres : la masse et la section efficace.

Des dispositifs variés

La conception du détecteur est cruciale. Selon les équipes de physiciens, les dispositifs réalisés sont variés. On trouve des expériences dont le matériau qui constitue la cible est composé d'atomes lourds ou légers, en phase solide ou formant un système à deux phases, liquide et gazeux. Des atomes légers, par exemple, permettent d'obtenir un recul plus important, mais leur probabilité d'interaction avec le WIMP est plus faible. Il faut opter pour un compromis entre ces deux effets. Le choix est compliqué par le fait que pour les noyaux légers de spin non nul, l'interaction WIMP-noyau peut être importante, mais seulement pour certains types de WIMP.

Toutes ces idées ont mis une trentaine d'années à se mettre en place. Au début des années 1990, les premières expériences ont utilisé des scintillateurs à cristaux d'iodure de sodium (NaI). Cela a permis de développer de nouvelles stratégies de détection s'appuyant sur la détection de la scintillation. Les progrès ont ensuite suivi plusieurs directions : la taille ou la masse des détecteurs a augmenté (jusqu'à 1000 kilogrammes aujourd'hui), et l'on combine différents types de signaux (scintillation, ionisation, calorimétrie) pour améliorer l'analyse des données, suivant des méthodes inspirées de la physique des particules (voir la figure 2). Certaines expériences couplent la détection de la scintillation et de l'ionisation (ZEPLIN, XENON, LUX), de la scintillation et des phonons (CRESST, Rosebud) ou de la scintillation et des phonons (Edelweiss, CDMS, EURECA).

Certaines équipes ont mis en place des dispositifs très originaux. Dans l'expérience ORPHEUS, on prépare des granules dans un état supraconducteur tel qu'ils peuvent

DAMA, UN SIGNAL ANNUEL QUI INTRIGUE

DAMA désigne deux expériences de recherche de matière noire conduites au Laboratoire italien du Gran Sasso, situé à proximité d'un tunnel autoroutier, sous une épaisseur d'environ 1400 mètres de roche. La première, DAMA/NaI, utilisait comme détecteurs neuf scintillateurs d'iodure de sodium (NaI) dopé au thallium, d'environ 10 kilogrammes chacun. Les physiciens de l'expérience ont observé une modulation annuelle du signal sur les sept ans de prise de données. Le résultat final fut publié en 2003. La seconde génération de l'expérience, DAMA/LIBRA, est toujours en cours et confirme cette observation (a).

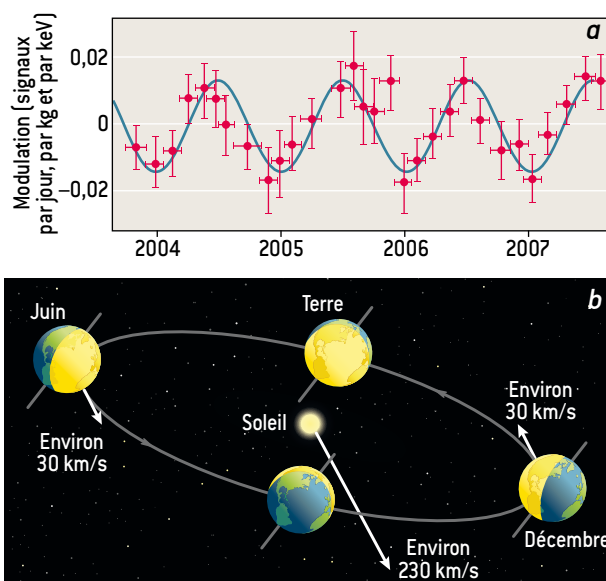
Ce résultat a soulevé beaucoup d'enthousiasme, car un signal de matière noire devrait avoir cette propriété. En effet, à cause du mouvement du Système solaire dans la Galaxie, les détecteurs se déplacent par rapport à la matière noire galactique. Le mouvement de la Terre autour du Soleil fait

varier cette vitesse relative de quelques pour cent sur une année. Ainsi, de façon analogue à quelqu'un qui se mouille davantage en marchant contre le vent un jour de pluie, la probabilité de détection varierait légèrement au cours de l'année (b).

Mais, en 2010, l'expérience XENON100, également au Gran Sasso mais fondée sur un principe de détection différent, a exclu le résultat de DAMA comme étant lié à de la matière noire. La modulation annuelle observée par DAMA est bien présente, mais son interprétation divise les spécialistes. Pour comprendre ce désaccord, il faut revenir sur le principe des expériences : DAMA compte toutes les particules qui atteignent le détecteur, en faisant le pari que si le bruit de fond est constant, alors toute variation du nombre total de particules observées sera la preuve d'une variation de la composante due à la matière noire. Les expériences XENON et LUX, quant à elles,

rejetent de façon plus sévère le bruit de fond, pour ne garder que les événements qui seraient dus à la matière noire. Les contradicteurs des résultats de DAMA soulignent que l'hypothèse selon laquelle le bruit de fond est constant demande à être vérifiée de façon plus précise : DAMA ne

verrait peut-être que la variation du bruit de fond. Une piste possible est la variation en fonction de la température saisonnière de la densité de l'atmosphère, qui bloquerait plus ou moins de muons cosmiques, une modulation annuelle effectivement mesurée par ailleurs.



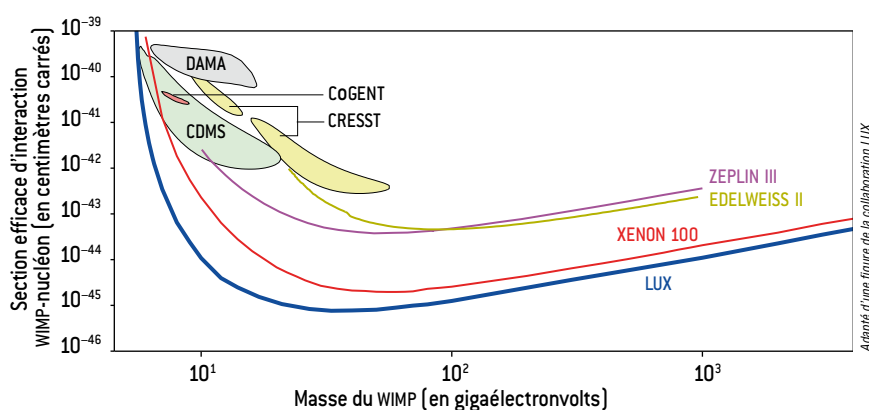
Shutterstock.com/Redsapphine (en bas) - R. Bernabè et al./Collaboration DAMA (en haut)

subir une transition de phase vers l'état conducteur normal au passage d'un WIMP. Cette transition est alors détectable par ses effets magnétiques. Dans d'autres expériences comme SIMPLE, COUPP ou PICASSO, on adapte le principe de la chambre à bulles : le détecteur est un fluide surchauffé, c'est-à-dire dans un état instable où il reste liquide à une température plus importante que sa température de vaporisation à pression ordinaire. Le recul d'un noyau induit par le passage d'une particule déstabilise le milieu et conduit à la formation brutale d'une bulle. Le processus s'accompagne d'une onde sonore qui peut être détectée grâce à des microphones, et l'analyse du son permet de déterminer si la bulle a été formée par un événement de bruit de fond (la désintégration alpha d'un atome environnant, dans ce cas) ou s'il peut s'agir d'un WIMP.

Rejeter le bruit de fond

On compte aujourd'hui plusieurs dizaines d'expériences de recherche de matière noire par détection directe. Mais détecter une particule n'est pas suffisant, il faut aussi s'assurer qu'il s'agit bien de celle qu'on cherchait. La radioactivité naturelle et les rayons cosmiques nous bombardent constamment de particules « ordinaires » : des électrons, des positrons, des protons, des muons, des neutrons, des rayons gamma, etc. Ils peuvent aussi faire réagir les détecteurs comme s'il s'agissait de WIMP. C'est le « bruit de fond ». Il faut s'en affranchir ou s'en accommoder. Le développement des expériences de détection directe s'accompagne de nombreuses innovations dans la détection et le contrôle des faibles niveaux de radioactivité pour identifier ce bruit de fond.

Il est impossible de s'affranchir totalement du bruit de fond, mais on peut le limiter. D'une part, les expérimentateurs s'efforcent d'augmenter la pureté des matériaux utilisés, en s'assurant qu'ils contiennent le moins possible d'isotopes radioactifs. D'autre part, pour réduire le flux de rayons cosmiques, on les place sous une grande quantité de roche, en les enterrant profondément (dans un site minier abandonné) ou en les installant sous une montagne (dans un tunnel routier) qui joue le rôle de bouclier. C'est très efficace pour bloquer les particules cosmiques chargées : au Laboratoire souterrain de Modane, situé dans le tunnel du Fréjus sous 1700 mètres de roche, la quantité incidente de muons est



3. LES RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES sont présentés sur un graphique où la masse de la particule de matière noire est en abscisse et sa section efficace d'interaction avec un noyau atomique est en ordonnée. Les expériences ayant un signal potentiel (DAMA, CRESST, etc.) dessinent des surfaces correspondant aux caractéristiques possibles de leur candidat à la matière noire. Les expériences qui n'ont rien détecté (LUX, XENON 100, etc.) excluent les régions au-dessus des courbes. On notera la tension entre les deux types de résultats, les seconds excluant les premiers.

diminuée d'un facteur de plus d'un million par rapport à la surface.

Ensuite, les détecteurs sont entourés d'un blindage pour limiter l'exposition à la radioactivité naturelle, dont celle des roches. Des plaques de plomb offrent une protection assez efficace, mais elles présentent elles-mêmes un niveau de radioactivité gênant à cause de l'isotope instable ²¹⁰Pb. Pour pallier ce problème, on utilise parfois du plomb dit archéologique, obtenu en fondant des briques de plomb découvertes dans des navires coulés au fond des océans depuis plusieurs siècles : la radioactivité du plomb est principalement due à son exposition au rayonnement cosmique, qui transforme certains noyaux stables en isotopes radioactifs. La mer a protégé le plomb de cette activation. Et les espèces radioactives présentes dans le plomb avant le naufrage se sont désintégrées depuis (la demi-vie du plomb 210 est de 22,3 ans). Par exemple, les physiciens de l'expérience *Edelweiss* ont récupéré 22 tonnes de plomb dans un navire romain coulé au large de la Bretagne vers l'an 400.

D'autres blindages sont aussi utilisés : la paraffine bloque des neutrons rapides issus de la roche, le cuivre ou un bassin d'eau pure dans lequel est plongé le détecteur peuvent remplacer le plomb, des détecteurs de muons placés au-dessus du dispositif signalent le passage des rayons cosmiques qui n'ont pas été absorbés par la roche.

Mais cette protection n'est pas parfaite. Les détecteurs restent soumis à un bruit de fond résiduel qui peut créer des signaux ressemblant à ceux dus à la matière noire. La principale difficulté est là : comment

distinguer une particule de matière noire d'une particule ordinaire qui a déjoué les précautions des expérimentateurs ? Les pistes sont multiples.

Dans certaines expériences sensibles à la scintillation (par exemple DAMA ou DEAP) ou à l'ionisation (par exemple CoGENT), on s'appuie sur l'évolution temporelle du signal (l'éclair lumineux ou la charge électrique), qui diffère pour les événements du bruit de fond et pour un recul nucléaire dû à un WIMP. Dans beaucoup d'expériences, ce tri s'appuie sur le fait que l'importance relative de différents signaux (ionisation, chaleur, scintillation) dépend du type de particule : un photon gamma émis par un élément radioactif produit plus d'ionisation qu'un recul nucléaire.

Une situation confuse

Que détecte-t-on ? Pour résumer en un mot la situation expérimentale actuelle : elle est confuse, même pour les spécialistes du domaine. D'un côté, des expériences très performantes et très sensibles, telles *Edelweiss*, *XENON*, *LUX* ou d'autres, n'ont détecté aucune particule de matière noire, après des années de fonctionnement. Même s'il peut apparaître frustrant, ce résultat présente un grand intérêt scientifique, car il permet d'éliminer certaines particules candidates au titre de matière noire, d'exclure certains modèles théoriques ou de contraindre les paramètres qui décrivent ces modèles (voir la figure 3). Ces expériences continuent d'améliorer leurs performances d'année en année et parviennent aujourd'hui

Des dispositifs directionnels : d'où vient le WIMP ?

La plupart des expériences mesurent l'énergie déposée par le WIMP lors de sa collision avec un noyau atomique. On tente aujourd'hui d'aller plus loin et de mesurer précisément la direction du recul du noyau, ce qui renseignerait sur la direction d'arrivée du WIMP.

Les particules de matière noire se déplaceraient dans le halo galactique avec des vitesses de l'ordre de 200 kilomètres par seconde dans des directions aléatoires. Le Système solaire se déplace dans la Galaxie, dans la direction de la constellation du Cygne, avec une vitesse du même ordre de grandeur. La matière noire se présente alors

comme un vent ayant une direction privilégiée du point de vue des détecteurs terrestres. Il est ainsi plus probable qu'une particule de matière noire provienne de la région du Cygne que de la direction opposée. En revanche, le bruit de fond est beaucoup plus isotrope.

L'idée d'utiliser l'information de la direction du signal a été

proposée par l'astrophysicien américain David Spergel en 1988, mais il a fallu attendre de nombreuses années avant de disposer de détecteurs permettant de la mettre en œuvre. C'est aujourd'hui le cas et plusieurs expériences sont dédiées à la détection directionnelle : *Mimac* conçu au LPSC à Grenoble, DMTPC aux États-Unis, *NewAge* au Japon. Pour déterminer la direction du vent de matière noire, les chercheurs veulent mesurer la direction de recul des noyaux dans les détecteurs, ce qui permettrait de distinguer de façon efficace

un signal de matière noire d'un phénomène terrestre mal compris.

Malheureusement, les contraintes expérimentales sont draconiennes : le détecteur doit contenir un gaz léger sous basse pression, pour que l'on puisse mesurer non seulement le recul, mais aussi et surtout la trace des particules. Cette contrainte limite fortement le nombre d'événements attendus, à moins d'équiper de capteurs des volumes immenses. Par exemple, *Mimac* envisage une cible gazeuse de 50 mètres cubes.

à éliminer certains candidats prévus par la supersymétrie.

Cependant, certaines expériences obtiennent des signaux troublants. En 1998, l'équipe de l'expérience DAMA, située au Laboratoire italien du Gran Sasso, a annoncé qu'elle enregistrait un signal périodique qui varie au rythme des saisons. DAMA enregistre *a priori* tous les signaux : bruit de fond et signal de matière noire. Les physiciens s'attendent à mesurer un signal lié à la matière noire qui présente une modulation annuelle, du fait du mouvement relatif de la Terre et du Soleil dans la Galaxie (voir l'encadré page 34). L'expérience a été améliorée au fil des années, et le résultat initial a persisté : le nombre de particules reçues varie périodiquement, avec un maximum en été, conformément à ce qu'on attend d'un signal dû à la matière noire.

D'autres expériences ont annoncé avoir observé chacune quelques événements que l'on pourrait interpréter comme des détections directes de particules de matière noire : CoGENT, CRESST et CDMS. Toutefois, les résultats de ces trois expériences ne sont pas compatibles entre eux en termes de caractéristiques du WIMP. Les masses déduites des mesures sont comprises entre quelques gigaélectronvolts et plusieurs dizaines de gigaélectronvolts et les sections efficaces couvrent trois ordres de grandeur.

Le désaccord entre ces résultats, ceux qui ne voient rien et ceux qui voient des choses différentes, est difficile à interpréter. En effet, les expériences s'appuient sur

des techniques variées. Les conférences internationales auxquelles participent les physiciens de ces expériences peuvent être houleuses lorsque les chercheurs confrontent leurs points de vue !

Par exemple, les physiciens n'ont pas tous la même analyse des mesures de DAMA. Certains avancent que l'hypothèse d'un bruit de fond constant – faite par l'équipe de DAMA – n'est pas correcte.

Dans plusieurs expériences, une variation annuelle du flux des muons (qui contribuent au bruit de fond) atteignant la surface de la Terre a été mesurée ; elle est due aux variations de température, et donc de densité, de l'atmosphère. Dans l'hémisphère Nord, le flux de muons est maximal en été et cet effet coïncide avec la modulation annuelle attendue pour des WIMP. En revanche, pour une expérience similaire à DAMA effectuée dans l'hémisphère Sud, cet effet devrait être décalé de six mois. Une telle expérience permettrait de déterminer si la modulation annuelle vient des variations atmosphériques ou des WIMP. L'expérience DM-ICE, un détecteur d'iodure de sodium au fond d'un puits de l'expérience *IceCube*, au pôle Sud, et le projet de laboratoire souterrain ANDES, qui sera installé dans un tunnel sous la Cordillère des Andes entre le Chili et l'Argentine, permettront d'identifier la source de la modulation annuelle du signal.

Jusqu'à présent, les expériences de détection directe n'ont pas mis en évidence de particules de matière noire de façon indis-

cutable. Cependant, les résultats négatifs permettent de contraindre avec une précision accrue les caractéristiques de ces éventuelles particules. L'expérience LUX, aux États-Unis, qui est aujourd'hui le dispositif le plus sensible, a ainsi éliminé de nombreux scénarios de WIMP supersymétriques.

Combiner les divers axes de recherche

La détection directe n'est pas la seule piste explorée dans la recherche de la matière noire. Le collisionneur LHC, au CERN, pourrait produire ces particules et apporter d'autres indices sur les théories allant au-delà du modèle standard. Par exemple, la découverte du boson de Higgs en 2012 et la mesure de sa masse – de l'ordre de 126 gigaélectronvolts – ont fourni des contraintes sur les modèles théoriques possibles.

La détection indirecte est encore une autre voie de recherche. Des détecteurs sont pointés vers les régions de la Galaxie potentiellement riches en matière noire. Dans ces zones, les annihilations entre WIMP donneraient naissance à d'autres particules que l'on peut espérer détecter – des anti-protons, des positrons, des photons, etc.

En combinant les résultats de la détection directe, de la détection indirecte et du LHC, les scientifiques parviennent à faire un certain tri parmi les modèles de la matière noire. Mais malgré plusieurs décennies de traque, la matière noire garde encore ses mystères. ■

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

LES 10 ANS D'OPPORTUNITY

Le rover a détecté
de l'eau sous
plusieurs formes
et en divers endroits



DOSSIER POUR LA SCIENCE - ASTRONOMIE - TECHNOLOGIE SPATIALE - EXOBIOLOGIE

Mars

Embarquement immédiat

NOUVELLE
FORMULE

LA VIE SUR MARS

La planète
a été propice
à l'apparition de la vie

LES MÉTÉORITES

Que nous apprennent
les morceaux de Mars
tombés sur Terre ?



N° 84 Juillet-Septembre 2014

pouirlascience.fr

n° 84 - 120 pages - prix de vente : 6,95 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale



Disponible sur



ÉNERGIE SOMBRE ou nouvelle gravitation ?

L'expansion de l'Univers accélère. Pour expliquer ce phénomène constaté récemment, les théoriciens explorent plusieurs voies, telles l'existence d'une mystérieuse « énergie sombre » ou de nouvelles lois de la gravitation.

Cédric Deffayet

Une question qui revient souvent quand on regarde le ciel étoilé est celle de la distance des étoiles. Les Grecs se posaient déjà de telles questions. Aristarque de Samos tenta, par exemple, d'estimer la distance à l'étoile la plus proche, le Soleil. Son calcul était faussé par le manque de précision des instruments de l'époque. Au cours des siècles suivants, les astronomes ont amélioré les techniques de mesure. L'invention de la lunette astronomique a étendu le champ d'investigation à un domaine jusqu'alors invisible. Les techniques géométriques, telle que l'utilisation de la parallaxe (on déduit la distance d'un objet à partir de son déplacement par rapport à un fond fixe quand on l'observe de deux positions différentes), ont par la suite trouvé leurs limites. De nouvelles méthodes ont été mises au point et les astrophysiciens utilisent aujourd'hui des étoiles telles que les céphéides ou les supernovæ de type Ia – des astres en train d'explorer –, pour déterminer les distances dans l'Univers.

Alors que ces chercheurs cartographiaient le cosmos, les théoriciens ont développé une description géométrique de l'Univers. Le modèle standard cosmologique, le modèle du Big Bang, décrit avec succès les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a près de 100 ans. La « force de gravitation » y est décrite de façon géométrique dans un espace-temps courbe. Plus précisément, le mouvement d'un objet en chute libre, qui est dû à une attraction gravitationnelle dans la théorie de Newton, est interprété dans la théorie d'Einstein comme un trajet qui suit le plus court chemin dans un espace-temps courbe. La géométrie de l'espace-temps définit les trajectoires des objets et, en retour, le contenu matériel de l'Univers déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et





contenu matériel sont intimement liés dans les équations de la relativité générale.

En combinant l'observation précise de la lumière émise par les galaxies lointaines avec des mesures de distance, les cosmologistes ont découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies semblent s'éloigner les unes des autres, car l'espace-temps qui les contient s'étire. Plus étonnant, en observant des supernovæ très éloignées, les scientifiques ont découvert que l'expansion se fait à un rythme qui s'accélère.

Quelle est l'origine de ce phénomène ? Une explication possible est la présence dans l'Univers d'une « énergie sombre », dont la nature reste inconnue, mais dont on peut déduire certaines caractéristiques des observations astrophysiques. C'est cette question qui nous intéresse ici. Nous présenterons des pistes que les cosmologistes explorent, de l'énergie du vide liée à l'énergie sombre à des modifications des lois de la gravitation aux grandes échelles.

Avant d'aborder la question de la nature de l'énergie sombre, voyons comment les cosmologistes ont eu l'idée de son existence et comment ils ont estimé son

abondance dans l'Univers. Toute substance influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Or l'analyse du fond diffus cosmologique – un rayonnement électromagnétique émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans – indique que l'Univers suit une géométrie euclidienne aux grandes échelles. Une telle propriété n'est possible que si le contenu de l'Univers présente une certaine densité moyenne d'énergie, dite densité d'énergie critique.

Par ailleurs, les astrophysiciens déduisent le contenu en matière ordinaire (dite « baryonique » et qui compose les planètes, les étoiles...) de l'étude de la formation des noyaux atomiques légers dans les premières minutes de l'Univers. Cette matière ne représente que cinq pour cent de la densité d'énergie critique. Ainsi, 95 pour cent du contenu de l'Univers est sous une forme inconnue.

Ce contenu mystérieux se manifeste néanmoins de façon indirecte par son influence gravitationnelle sur la matière baryonique. Les cosmologistes le séparent en deux composantes selon son comportement, soit aujourd'hui environ 25 pour cent de

L'ESSENTIEL

- En 1998, les cosmologistes ont découvert que l'expansion de l'Univers accélère.
- Ce phénomène s'expliquerait par une « énergie sombre », qui représenterait 70 pour cent de la densité d'énergie de l'Univers.
- L'énergie sombre pourrait correspondre à une constante cosmologique liée aux fluctuations quantiques du vide.
- D'autres pistes sont explorées, comme la « quintessence » ou des modifications des lois de la gravitation.

ESO/T. Preibisch

matière noire et 70 pour cent d'énergie sombre (voir la figure 1).

La présence de matière noire a été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle : la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire (voir les articles de Volker Springel page 22 et de Richard Taillet page 30).

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont, comme nous le verrons, plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est née lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

Mesurer l'expansion de l'Univers

La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, lorsque l'on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était décalé vers le rouge de façon systématique. Ce résultat est dû à l'effet Doppler : la longueur d'onde d'un signal sonore ou électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la « loi de Hubble », entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée. Dans le cadre de la relativité générale, les observa-

tions de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers : c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est nommé constante de Hubble. Il a été déterminé avec une précision de l'ordre de un pour cent et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2 100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique), qui postule qu'il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats ; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

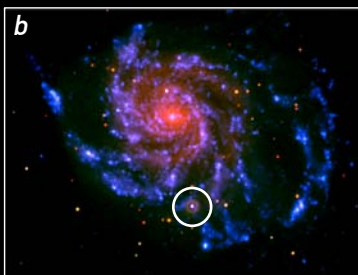
Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat. En effet,

LES SUPERNOVÆ DE TYPE IA POUR CARTOGRAPHIER L'UNIVERS

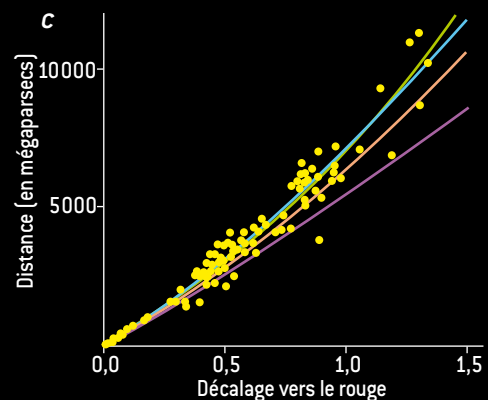
Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). De fait, elles servent de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable : une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (a et b). Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. Comme la quantité de lumière émise est connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi le décalage vers le rouge

de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers.

En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (c). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible : l'expansion était donc plus lente dans le passé.



LES MESURES DE LA DISTANCE ET DE LA VITESSE d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches (telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b) vérifient la loi de Hubble linéaire (c). Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines (les courbes correspondent à différents modèles cosmologiques).



NASA/Smith-Peter Brown, Université de l'Utah/Université de Hawaï

la constante a pu varier au cours du temps. Mesurer cette variation consiste précisément à estimer l'accélération ou la décélération de l'expansion de l'Univers. Jusqu'en 1998, le consensus chez les cosmologistes était que l'expansion devait ralentir. En effet, la matière ordinaire et la matière noire s'opposent à l'expansion, un peu comme l'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil tend à ralentir le mouvement de fuite d'une comète.

Dans les années 1990, deux équipes, l'une dirigée par Saul Perlmutter (du Laboratoire américain de Berkeley), et l'autre par Brian Schmidt et Adam Riess (respectivement à l'Université de Canberra en Australie, et à l'Université de Californie à Berkeley), ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années. Ces trois astrophysiciens ont reçu le prix Nobel de physique en 2011 pour ces travaux, qui reposaient sur la mesure de la distance et de la vitesse de fuite de supernovæ de type Ia, un type particulier d'explosion d'étoiles (voir l'encadré page ci-contre). Les premiers résultats ont été publiés en 1998 et ce fut une surprise : l'expansion de l'Univers accélère. Par ailleurs, ce phénomène a débuté relativement récemment dans l'histoire cosmique, quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui.

Si ce résultat n'était pas celui que les chercheurs attendaient, il n'est cependant pas difficile à reproduire dans le cadre de la relativité générale : il suffit de donner une valeur non nulle à la « constante cosmologique ». Rappelons que cette constante a été introduite par Einstein dans ses équations de la relativité générale – avant la découverte de l'expansion cosmique – pour que ces équations correspondent à un univers statique. Il suffisait d'ajuster la valeur de cette constante pour contrebalancer l'effet attractif de la matière.

Mais que représente physiquement cette constante cosmologique ? L'ajout de ce terme dans les équations d'Einstein est l'équivalent mathématique de l'addition d'un nouveau contenu dans l'Univers dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, ce nouveau contenu a une densité d'énergie constante au cours de l'histoire cosmique, alors que celle de la matière ordinaire diminue avec l'expansion de l'espace-temps (la quantité de matière ordinaire initialement présente dans l'Univers reste constante, tandis que le volume augmente). La densité d'énergie associée à

la constante cosmologique ne varie pas, ce qui signifie que, dans un volume d'Univers dilaté par l'expansion cosmique, il y a une création continue d'énergie.

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'il lui est associée une pression négative. De façon générale, la pression est définie comme une force agissant sur une surface. Par exemple, la pression cinétique d'un fluide est due aux chocs des molécules sur les parois du récipient. Le fluide exerce une poussée sur les parois et la pression est positive. Une pression négative peut apparaître sur les parois d'un récipient, par exemple si la pression extérieure est plus élevée que celle à l'intérieur.

Comment la pression d'une composante de l'Univers agit-elle sur la dynamique de celui-ci ? La pression positive de la matière est interprétée comme un surplus d'énergie cinétique qui s'ajoute au bilan de la densité d'énergie de l'Univers. Elle tend donc à ralentir l'expansion. En revanche, un fluide présentant une pression négative, comme celui associé à la constante cosmologique, a une contribution opposée et crée une sorte de force répulsive : la vitesse d'expansion de l'Univers augmente au lieu de diminuer.

Une pression négative

La constante cosmologique est donc associée à une pression négative et à une densité d'énergie constante, dont la valeur est estimée grâce aux observations astrophysiques. Elle est très faible : l'énergie contenue dans un volume équivalent à celui d'une piscine olympique pourrait alimenter une ampoule de un watt pendant moins d'un millionième de seconde !

À partir de ces propriétés, les physiciens ont commencé à réfléchir à la nature de l'énergie sombre. Une possibilité émerge naturellement dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les interactions fondamentales en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Ainsi, le modèle standard de la physique des particules est formulé dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Il est testé notamment dans les accélérateurs de particules tels que le LHC au CERN ; les observations s'accordent avec une grande précision aux calculs théoriques du modèle.

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, on montre que, même en

■ L'AUTEUR



Cédric DEFFAYET
est directeur
de recherche
au CNRS et travaille
à l'Institut
d'astrophysique
de Paris et à l'Institut des
hautes études scientifiques.

■ BIBLIOGRAPHIE

C. de Rham *et al.*, **Resummation of massive gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 231101, 2011.

G. Börner, **L'énergie sombre et ses alternatives**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

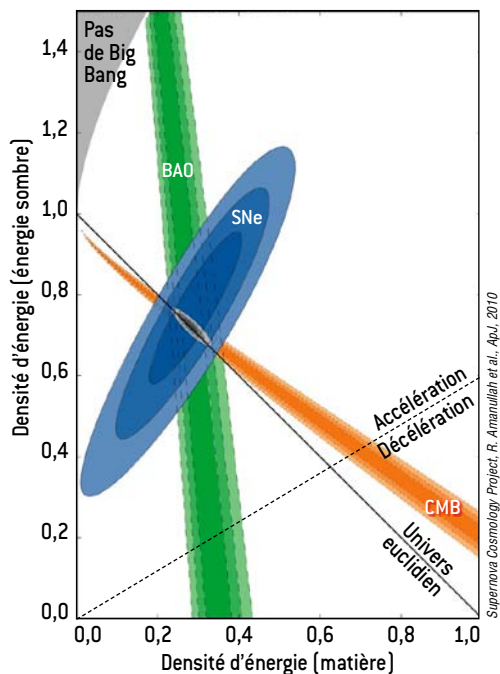
C. Deffayet *et al.*, **Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions**, *Phys. Rev. D*, vol. 65, 044023, 2002.

G. Dvali *et al.*, **4D gravity on a brane in 5D Minkowski space**, *Phys. Lett. B*, vol. 485, n° 1-3, pp. 208-214, 2000.

■ EN VIDÉO



La physicienne
Nathalie Palanque-
Delabrouille parle
de la recherche
de l'énergie sombre
[https://www.youtube.com/
watch?v=DeAo1ZJxBf8](https://www.youtube.com/watch?v=DeAo1ZJxBf8)



1. LA COMPOSITION DE L'UNIVERS en énergie sombre et en matière [baryonique et noire] s'exprime en fonction d'une densité d'énergie critique, qui conduit à une géométrie euclidienne pour l'Univers à grande échelle. La combinaison des observations du fond diffus cosmologique [CMB], des oscillations acoustiques des baryons (BAO) et des supernovæ (SNe) donne une répartition d'environ 70 pour cent d'énergie sombre et 30 pour cent de matière [25 pour cent de matière noire et 5 pour cent de matière ordinaire].

l'absence de matière, tout volume d'Univers doit contenir une certaine énergie (on parle alors d'énergie du vide) et une pression qui sont compatibles avec les caractéristiques de la constante cosmologique. D'où vient cette énergie du vide ? D'après le principe d'incertitude de Heisenberg, des paires particule-antiparticule naissent et disparaissent, sans cesse et partout dans l'espace. Il est possible de calculer les grandeurs caractéristiques associées à cet ensemble de particules virtuelles, tels le spin (moment cinétique intrinsèque d'une particule), la polarisation, l'énergie... Ces grandeurs sont nulles en moyenne, à l'exception de l'énergie qui, par ailleurs, ne se dilue pas avec l'expansion de l'Univers puisqu'elle est reliée au vide.

Un problème de 120 ordres de grandeur

L'énergie du vide pourrait donc résoudre la question de la nature de l'énergie sombre, mais la valeur que l'on calcule pour la densité d'énergie du vide et celle requise pour l'énergie sombre de la cosmologie sont incompatibles. Une estimation simple indique que l'énergie du vide dans un volume égal à celui d'une piscine olympique devrait suffire à pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant 10^{97} ans ! Ce résultat est supérieur de plus de 120 ordres de grandeur à ce qui est nécessaire selon les observations cosmologiques.

Comment résoudre ce problème ? En réalité, les physiciens ne savent pas calculer rigoureusement la valeur de l'énergie du vide dans le cadre de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une valeur en accord avec les observations cosmologiques en la fixant « à la main », par l'ajustement de certains paramètres. Mais aucun principe connu ne justifie ce qui apparaît alors comme un tour de passe-passe et qui nécessite un ajustement extrêmement fin des paramètres (à plus de 120 décimales près si l'on considère le calcul simple mentionné plus haut). C'est ce que l'on nomme le premier problème de la constante cosmologique.

Un second problème apparaît lorsqu'on constate que la densité d'énergie associée à la constante cosmologique dans l'Univers aujourd'hui est du même ordre que celle de la matière (ordinaire et noire), alors même que le rapport de ces deux densités d'énergie a changé au cours de l'histoire

cosmique. Il semble donc que l'humanité soit apparue à un moment particulier de l'histoire de l'Univers, celui où ces deux densités d'énergie sont proches. Certains chercheurs s'efforcent d'expliquer cette « coïncidence cosmique » qui traduit aussi le fait que l'accélération cosmique n'a débuté que récemment dans l'histoire de l'Univers.

Plusieurs approches ont été suivies pour tenter de résoudre les problèmes posés par la constante cosmologique. Mais avant d'en décrire certaines, précisons qu'aucune n'est unanimement partagée.

Le premier problème de la constante cosmologique a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, et à une époque où l'on penchait pour une décélération de l'expansion cosmique, avec une constante cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc être nulle, ce que contredisait l'estimation évoquée précédemment. Pour y remédier, une idée était d'introduire une nouvelle symétrie en théorie quantique des champs, qui impose que cette valeur soit nulle sans avoir à faire des ajustements artificiels. Notons que si une telle symétrie existait, elle pourrait aussi conduire à une faible valeur qui suffirait à expliquer l'expansion accélérée de l'Univers. Il suffit pour cela de supposer que la symétrie est légèrement brisée dans l'Univers.

Une telle symétrie est par exemple la « supersymétrie », qui stipule que chaque particule du modèle standard a un « superpartenaire ». Ces particules appariées ont la même masse mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie totale du vide serait nulle. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie existe, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée. Cependant, le degré de brisure requis par la physique des particules est trop important pour résoudre le problème de l'énergie du vide. Notons en revanche que la supersymétrie, brisée, pourrait apporter une solution au problème de la matière noire.

Les théoriciens ne parviennent pas à résoudre les problèmes soulevés par la constante cosmologique, une situation d'autant plus frustrante que les observations indiquent une valeur non nulle de cette constante. D'autres pistes sont cependant

explorées, à la recherche d'autres contenus matériels qui produiraient une expansion cosmique accélérée. On désigne ainsi sous le terme générique de « quintessence » de tels composants matériels. Par exemple, l'existence d'un champ « scalaire » (c'est-à-dire dont le spin est nul, tel le champ de Higgs associé au boson de Higgs) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique.

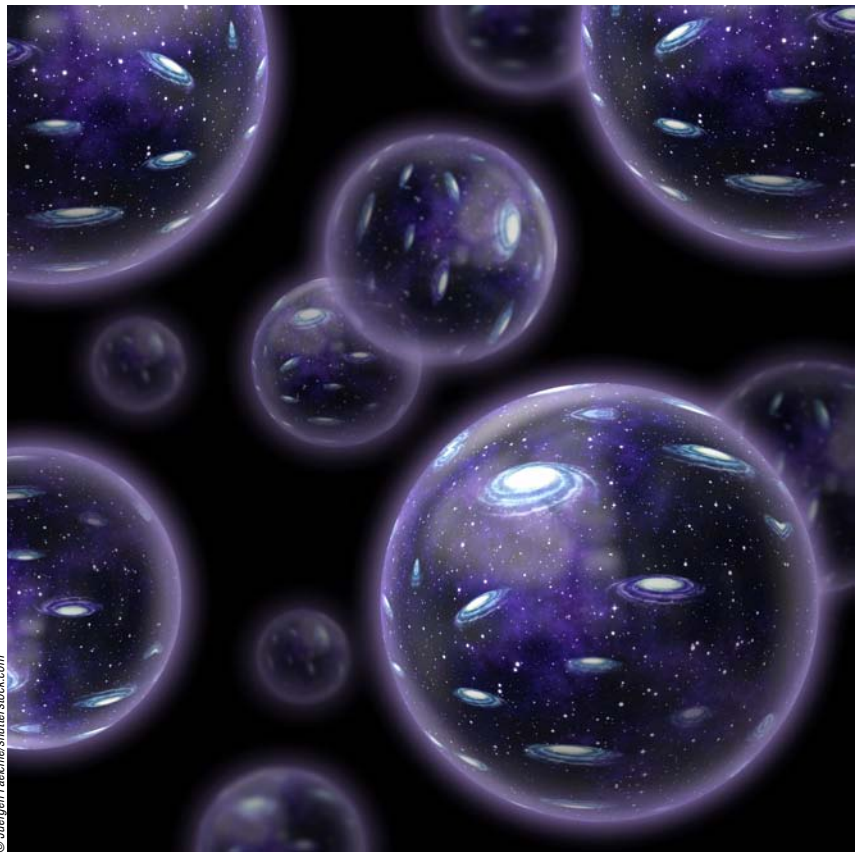
Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre la constante cosmologique et les champs scalaires.

Un paramètre que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision est le rapport entre la densité de l'énergie sombre et sa pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport adimensionnel). Ce paramètre, nommé paramètre d'état de l'énergie sombre et noté en général w , est égal à -1 pour une constante cosmologique. Il diffère en général de -1 pour un modèle de quintessence. Lorsque c'est le cas, la densité d'énergie associée n'est plus constante, mais varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes veulent mettre en évidence.

Chercher la quintessence

Les modèles de quintessence ne parviennent en général pas à expliquer le premier problème de la constante cosmologique. Mais certains pourraient apporter un éclairage intéressant sur le second problème *via*, par exemple, un couplage entre le champ scalaire et la matière ordinaire ou noire et qui expliquerait le fait que les densités d'énergie de quintessence et de matière sont du même ordre de grandeur aujourd'hui. Grâce à un tel couplage, la densité d'énergie de la quintessence est corrélée lors de l'histoire cosmique avec celle de la matière.

Une autre voie qui a le mérite de résoudre les deux problèmes à la fois est une approche anthropique conçue en particulier par l'Américain Steven Weinberg (lauréat du prix Nobel de physique en 1979 avec Sheldon Glashow et Abdus Salam pour la construction du modèle standard électrofaible de la physique des particules). D'après cette idée, la valeur de



2. LA THÉORIE DU MULTIVERS suppose que des bulles-univers ont des constantes fondamentales différentes, fixées aléatoirement lors de leur formation. Dans ce cadre, certains physiciens ont recours au principe anthropique pour expliquer la valeur de l'énergie du vide : la bulle-univers dans laquelle nous sommes a les bons paramètres pour que la vie se soit développée.

la constante cosmologique est fixée librement au début de l'histoire de l'Univers. En imaginant tous les univers possibles, seuls ceux où cette valeur est proche ou inférieure à celle observée aujourd'hui permettent le développement de la vie telle que nous la connaissons. En effet, dans un univers où la constante cosmologique serait très supérieure à celle que nous inférons aujourd'hui, l'accélération de l'expansion cosmique aurait commencé trop tôt pour que se forment des structures telles que des étoiles ou des galaxies riches en éléments chimiques complexes. Dans un tel univers, la vie telle que nous l'observons n'aurait pas pu apparaître. Comme nous existons, il est normal d'observer une faible valeur (éventuellement nulle) de la constante cosmologique.

Depuis l'idée de S. Weinberg, la théorie des supercordes et certains modèles d'inflation cosmique (nommés « inflation éternelle ») ont renforcé cette explication anthropique en fournissant un cadre théorique expliquant comment la valeur de la constante cosmologique pourrait avoir été

« tirée au sort » dans les premiers instants de l'Univers. En effet, la théorie des supercordes conduit à penser que les valeurs de certains paramètres qui nous apparaissent comme des constantes de la nature (telle la constante cosmologique, ou la masse de certaines particules) peuvent varier dans l'Univers très primordial et se fixer parmi un très grand nombre de possibilités. Chaque combinaison donne un univers aux propriétés physiques différentes.

Par ailleurs, dans les scénarios d'inflation éternelle, qui peuvent également être incorporés dans certains modèles issus des supercordes, des bulles d'univers où les constantes de la nature prennent des valeurs différentes peuvent apparaître aléatoirement. Elles sont d'abord microscopiques, puis enflent jusqu'à devenir des univers séparés causalement les uns des autres. Chaque univers possède alors son propre jeu de paramètres et seuls certains sont compatibles avec l'apparition de la vie (voir la figure 2).

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs

Le modèle DGP

Les modèles d'univers dotés de dimensions supplémentaires peuvent offrir des solutions au problème de l'expansion accélérée de l'Univers. Celui développé par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati modifie les lois de la gravitation.

Ces trois physiciens de l'Université de New York ont construit un modèle d'univers, noté DGP, qui ajoute une unique dimension d'espace aux quatre dimensions de l'espace-temps usuel.

Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini

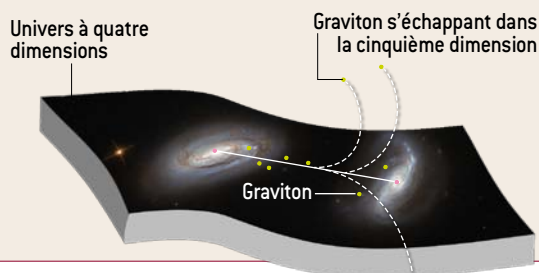
mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y propager. Les autres particules ne peuvent échapper à l'espace-temps usuel et, ainsi, la dimension supplémentaire échappe à nos sens mais peut être révélée via son effet sur la gravitation.

Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que

les gravitons s'échappent est faible. Ainsi, les équations de la relativité générale reproduisent correctement les lois de la gravitation. À plus grande échelle, une certaine quantité de gravitons fuient dans la cinquième dimension (voir la figure). À de telles distances, les équations de la relativité générale ne décrivent donc plus correctement les interactions gravitationnelles.

L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale est valide sur de telles distances, donne l'impression que l'Univers a une vitesse d'expansion qui augmente.

Ce résultat a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais le modèle DGP présente plusieurs difficultés théoriques et expérimentales.



raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : comment séparer les paramètres que l'on est autorisé à faire varier, et pour lesquels on peut éventuellement donner une explication anthropique, des autres paramètres pour lesquels il pourrait exister une autre explication ? Doit-on aussi faire varier la forme des lois physiques ? D'autre part, personne ne sait comment calculer avec rigueur des probabilités d'apparition de la vie en tenant compte de l'ensemble des univers possibles. Enfin, on ne voit pas bien comment on pourrait réfuter une telle explication. Il se pourrait cependant que cela soit en effet la bonne réponse.

Les modèles de constante cosmologique et de quintessence supposent que les lois de la gravitation, aux plus grandes échelles, sont bien décrites par la relativité générale. Mais peut-être la gravitation suit-elle d'autres lois aux échelles cosmologiques ?

Les physiciens ont souvent rencontré des situations où l'existence de constituants « sombres » était conjecturée à partir de leur

influence gravitationnelle. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets ou à la modification de la théorie de la gravitation. Au XIX^e siècle, par exemple, la planète Neptune a été découverte grâce aux calculs de l'astronome Urbain Le Verrier, qui avait supposé sa présence pour expliquer des anomalies dans la trajectoire d'Uranus. La découverte de Neptune fut un succès pour la mécanique céleste fondée sur la théorie newtonienne de la gravitation.

Le Verrier tenta de renouveler son exploit pour expliquer certaines caractéristiques du mouvement de Mercure. Ce fut un échec, et les anomalies de la trajectoire de la planète furent expliquées bien après la mort de Le Verrier par une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue : sauver les lois de la gravitation par l'introduction de composants sombres (matière noire et énergie sombre) ou bien tenter de modifier ces lois pour expliquer les observations.

Par exemple, Mordehai Milgrom, de l'Institut Weizmann en Israël, a proposé en 1983 un cadre théorique assez séduisant pour éviter l'hypothèse de la matière noire. Les lois de la gravitation sont modifiées quand l'accélération d'un corps est plus faible qu'une valeur critique. Mais le modèle a ses propres difficultés (voir l'article de Volker Springel page 22).

Modifier la gravitation...

Pour ma part, alors que je travaillais à l'Université de New York en 2001, j'ai remarqué que le modèle dit DGP, proposé peu de temps auparavant par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati, également à l'Université de New York, fournit une alternative intéressante à l'idée d'énergie sombre. Dans ce modèle, qui suppose en particulier l'existence de dimensions d'espace supplémentaires, la gravitation d'Einstein est modifiée à très grande distance et une accélération cosmique peut apparaître sans qu'il y ait besoin d'une constante cosmologique non nulle (voir l'encadré ci-contre).

Ce modèle est lié à la recherche d'une « gravité massive » où le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de la force gravitationnelle, a une masse non nulle. La relativité générale implique que le graviton est de masse nulle. L'interaction a alors une portée infinie et se propage à la vitesse de la lumière. Dans le cas du modèle DGP, le graviton est la seule particule capable de se propager dans la dimension supplémentaire. De façon générale, des particules qui évoluent dans une dimension supplémentaire sont perçues comme un ensemble de particules massives par un observateur qui n'a pas accès à cette dimension. Les gravitons massifs du modèle DGP conduisent à grande distance à une déviation par rapport à la théorie d'Einstein.

On peut d'ailleurs remarquer qu'Einstein croyait (à tort) que l'introduction de la constante cosmologique résulterait en un potentiel gravitationnel semblable à celui créé par un graviton massif. Il existe donc un lien historique entre la constante cosmologique et la gravité massive. Le modèle DGP était le premier cadre proposant explicitement un lien entre accélération cosmique et modification à grande distance de la gravitation. Cependant, ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant, puisqu'il rencontre des difficultés théoriques