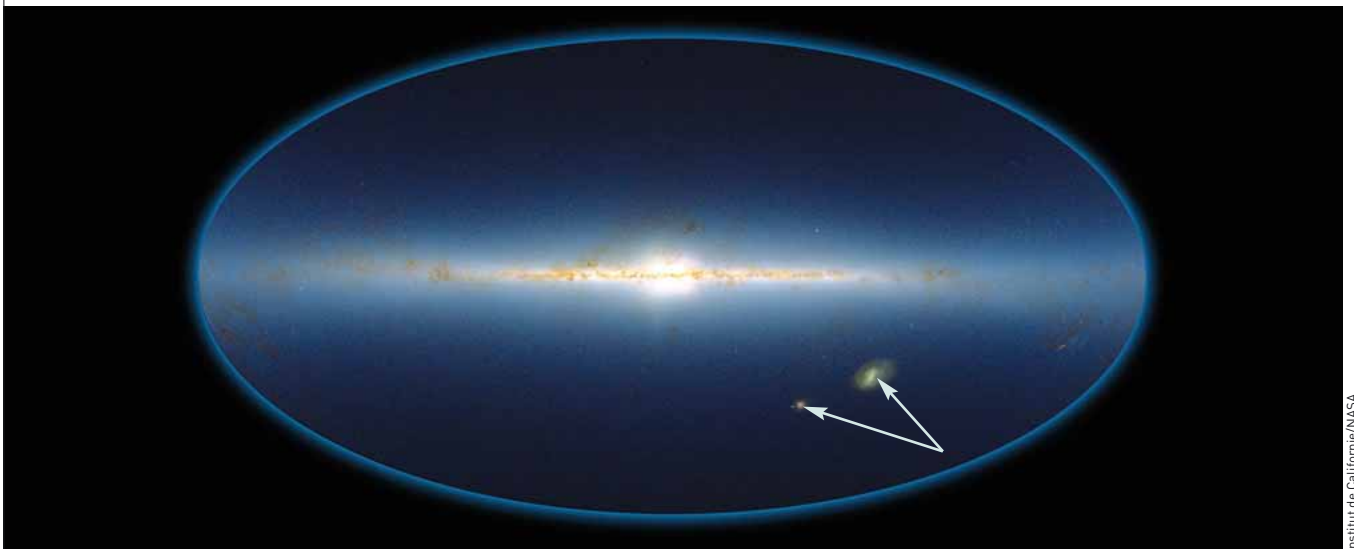


Odyssée dans la part sombre de l'Univers

La cosmologie serait-elle entrée dans une des phases les plus passionnantes de son histoire ? Les astrophysiciens et physiciens des particules le pensent, vu la moisson de données transmise par les télescopes qu'ils ont posés à terre, voire sous terre, et même dans des satellites, pour tenter d'élucider les mystères de la structuration de l'Univers. De l'analyse de ces données, ils attendent un éclaircissement sur les différentes versions du plus célèbre modèle cosmologique : le big bang. Mais ils espèrent aussi que ces données leur permettront bientôt de lever une partie du voile sur le double mystère de la matière et de l'énergie noires.



La Voie lactée dans le domaine infrarouge avec les Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre visibles à droite de l'image. Image mosaïque obtenue par le *Two Micron All Sky Survey*, programme conjoint de l'Université du Massachussets, de l'Institut de technologie de Californie et financé par la NASA.

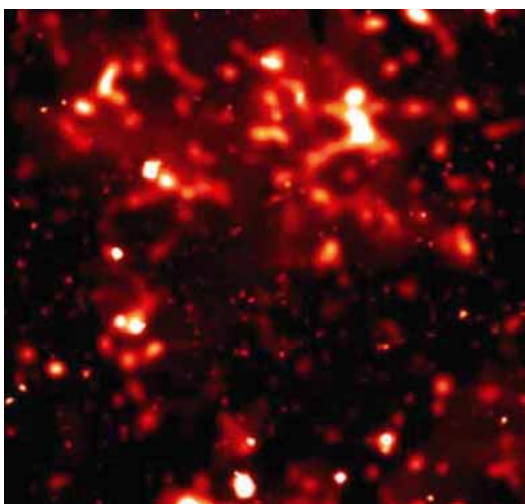
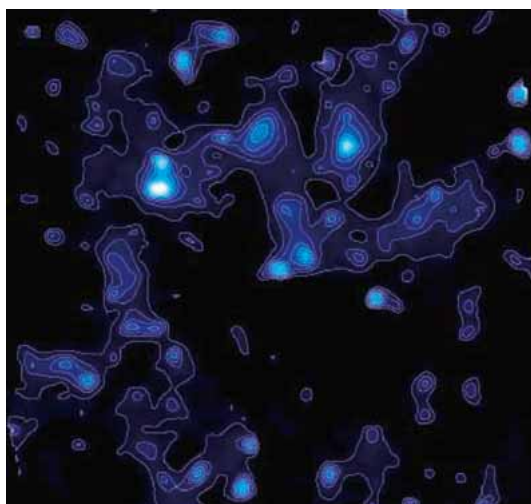
1. L'énigmatique matière noire

Astrophysique et observation de la matière noire

Regroupant des dizaines de milliards d'étoiles, les galaxies peuvent elles-mêmes s'assembler par dizaines ou centaines et former aussi des amas. Les mouvements qui les animent intriguent depuis longtemps les astrophysiciens, d'autant que des études récentes concluent qu'une partie de la masse de l'Univers échapperait aux observations des chercheurs. L'atome ne serait-il alors que l'écume de la matière ?

Il arrive qu'un astre se découvre par le seul calcul. Ainsi, en 1844, l'astronome Friedrich Bessel⁽¹⁾ attribue les anomalies du mouvement propre apparent de l'étoile Sirius à la présence d'un « compagnon » invisible. Dix-huit ans plus tard, la confirmation de ce calcul arrive par la découverte d'une **naine blanche** faisant de Sirius une **étoile** binaire. Dans la foulée, en 1846, Urbain Le Verrier⁽²⁾ et John-Couch Adams⁽³⁾

envisagent qu'une planète inconnue soit à l'origine des mouvements d'Uranus, là encore qualifiés « d'anormaux ». Suivant les indications d'Urbain Le Verrier, l'astronome Johann Galle⁽⁴⁾ observe ensuite la **planète** Neptune à moins d'un degré de la position calculée à partir des écarts que manifeste Uranus par rapport aux **lois de Newton**. En 1932, Jan Oort⁽⁵⁾ étudie la distribution des vitesses d'étoiles situées dans



R. Massey/NASA

Carte de la matière noire (en bleu, à gauche) et de la matière visible (en rouge, à droite) d'une même région de l'Univers. Les concentrations les plus denses de matière se retrouvent identiques sur les deux images, démontrant que la matière visible se concentre dans les régions où la matière noire domine.

le voisinage du **Soleil** pour déterminer le champ gravitationnel local. Il suggère que ces étoiles ne contribuent que pour moitié à la quantité de matière nécessaire pour expliquer leurs mouvements. Parallèlement, l'Américain Fritz Zwicky⁽⁶⁾ étudie la distribution des vitesses des **galaxies** dans le grand amas de la constellation boréale nommée Coma Berenices. Et, en 1933, il peut également avancer que les galaxies de l'**amas** ne représentent que 10 % de la masse nécessaire pour expliquer les vitesses mesurées. L'essentiel de la masse de l'amas serait donc une forme non lumineuse. Malgré son importance, cette découverte ne trouvera guère de retentissement et plus de quarante ans s'écouleront avant qu'une accumulation de données, conduisant toutes à ce même constat, ne la fasse revenir au premier plan. Aujourd'hui, près de quatre-vingts ans après l'observation de Fritz Zwicky, ses conclusions se confirment : une fraction importante de la masse de l'Univers ne serait effectivement pas lumineuse !

La **matière noire** soulève donc une série d'interrogations – en relation ou pas entre elles – qui se posent aussi bien à l'échelle des galaxies, que des amas de galaxies ou de l'Univers tout entier.

La matière noire dans les galaxies

La vitesse de rotation d'une galaxie spirale se mesure par le **décalage Doppler**, soit de la lumière des étoiles formant le disque de cette galaxie, soit de

nuages d'**hydrogène** neutre localisés au-delà de son bord lumineux. La courbe obtenue, représentant la vitesse de rotation du disque en fonction de la distance au centre de la galaxie, permet de déterminer la distribution de masse de la galaxie, tout comme une planète en orbite autour du Soleil permet de déduire la masse du Soleil si la distance qui le sépare de la planète est connue. Mais il se trouve que la comparaison entre cette distribution de masse déterminée par l'influence gravitationnelle



ESA

Image de la galaxie spirale NGC 3198 dont la courbe de rotation indique que les étoiles qui la composent ne contribuent que faiblement à sa masse. Il semblerait que, comme beaucoup d'autres, cette galaxie soit entourée d'un halo massif de matière sombre.

(1) Friedrich Bessel (1784-1846), astronome et mathématicien allemand, fondateur de l'école allemande d'astronomie d'observation.

(2) Urbain Le Verrier (1811-1877), astronome et mathématicien français spécialiste en mécanique céleste.

(3) John-Couch Adams (1819-1892), astronome et mathématicien britannique ayant prédit l'existence et la position de la planète Neptune, en ne se basant que sur les mathématiques.

(4) Johann Galle (1812-1910), astronome allemand de l'observatoire de Berlin.

(5) Jan Oort (1900-1992), astronome néerlandais, directeur de l'observatoire de Leyde de 1945 à 1970, qui mena de nombreuses recherches sur notre Galaxie.

(6) Fritz Zwicky (1898-1974), astrophysicien américano-suisse, connu comme le plus grand découvreur de supernovae.

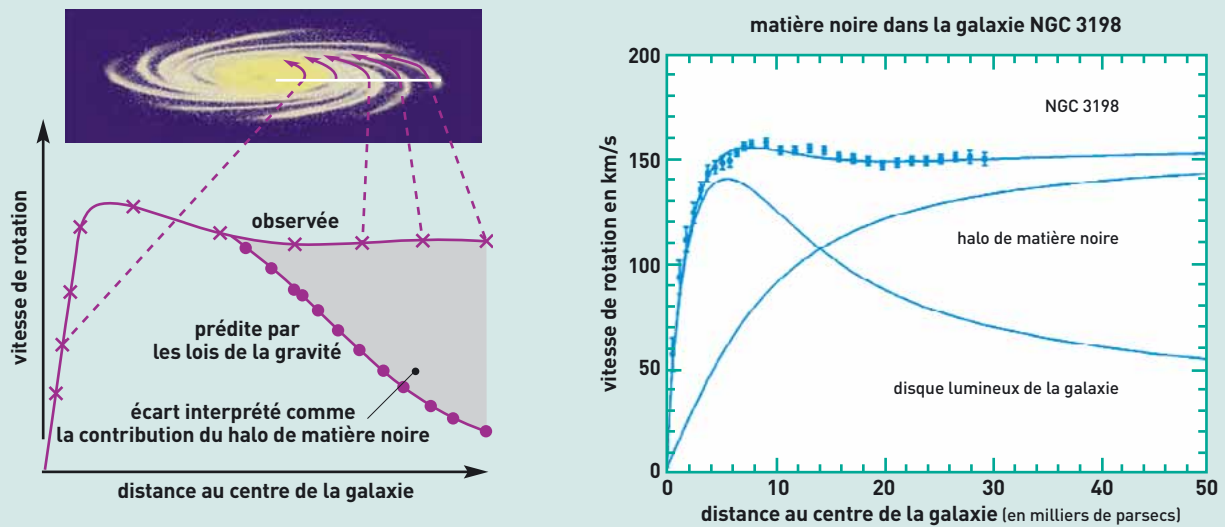


Figure 1. La vitesse de rotation des galaxies spirales suggère qu'elles contiennent une importante quantité de matière sombre. En effet, contrairement à la décroissance prédite d'après la baisse de luminosité du disque d'étoile, au fur et à mesure de l'éloignement du centre de la galaxie, la vitesse de rotation mesurée demeure constante.

de la galaxie et celle estimée à partir de la **luminosité** des étoiles, laisse apparaître un net désaccord. En effet, la luminosité du disque stellaire décroissant exponentiellement en fonction de la distance avec le centre de la galaxie, tout laisse à penser que la masse de la galaxie se concentre essentiellement dans son centre ; pourtant, la vitesse de rotation demeurant constante, aussi loin qu'on pousse la mesure, ce résultat démontre qu'au contraire, une importante quantité de matière se trouverait dans les régions de luminosité faible ou nulle (figure 1). Des études systématiques, portant sur des milliers de galaxies, attestent à la fois le caractère universel de ce phénomène et la présence d'un excédent de matière noire dans presque toutes les galaxies spirales. Cette anomalie s'explique par la présence

d'un **halo** massif, grossièrement sphérique, s'étendant de dix à vingt fois plus loin que le disque d'étoiles. Pour l'hypothèse la plus courante, ce halo sombre se compose d'astres compacts très faiblement lumineux : planètes, étoiles en fin de vie ayant brûlé tout leur combustible (naines blanches) ou **trous noirs**. Restait à vérifier cette hypothèse, d'où l'expérience EROS (pour Expérience de recherche d'objets sombres), conduite par l'Irfu, qui a mesuré, nuit après nuit, la lumière des étoiles de deux galaxies satellites de la **Voie lactée** : les Nuages de Magellan. Il s'agissait de chercher une amplification lumineuse temporaire causée par la gravitation d'un astre sombre du halo, lors de son passage sur la ligne de visée d'une des étoiles observées. Dix années de « traque » permettront d'exclure l'hypothèse que le halo sombre de notre Voie lactée soit majoritairement constitué d'astres non lumineux. Et donc, la nature de cette matière sombre garde tout son mystère.

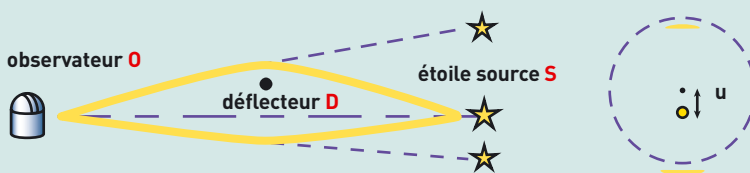
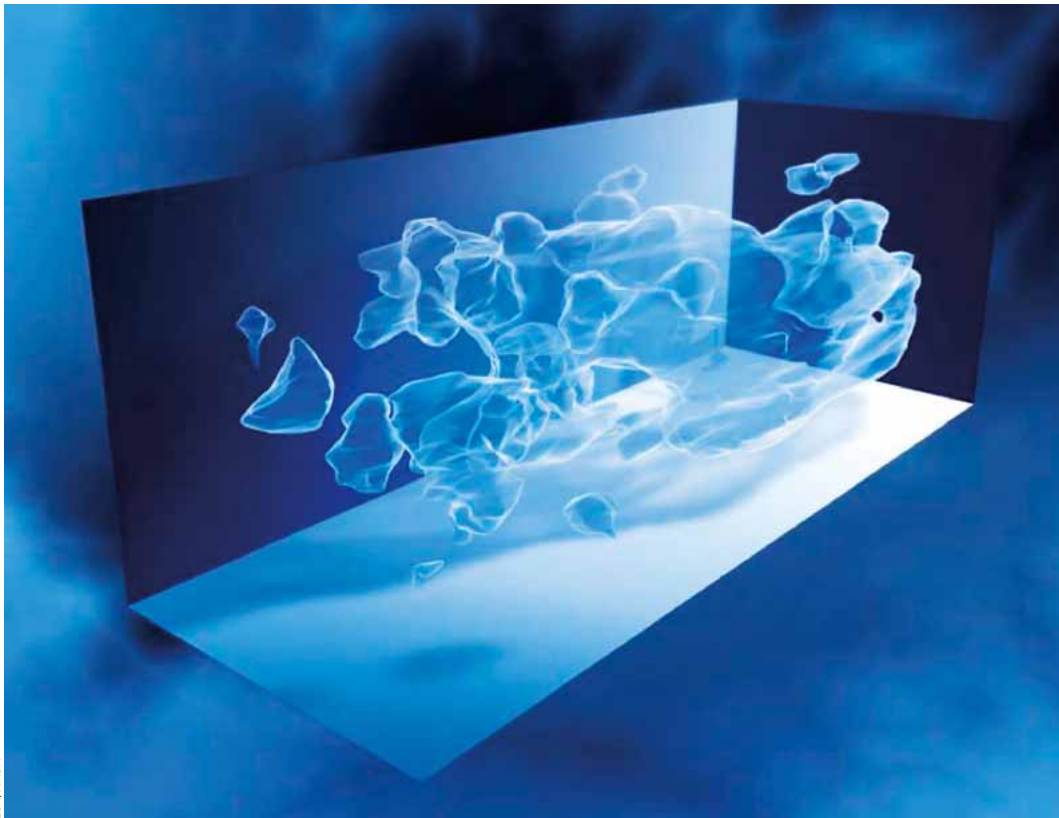


Figure 2. Schéma décrivant le principe du mirage gravitationnel. À gauche : l'astre sombre central déforme l'espace-temps modifiant le trajet des rayons lumineux qui passent dans son voisinage. À droite : les deux trajets lumineux possibles donnent chacun une image déformée de l'étoile ou de la galaxie située derrière l'astre responsable du mirage gravitationnel (« u », le paramètre d'impact, représente la distance entre l'objet massif et la ligne de visée vers l'étoile ; l'effet de mirage gravitationnel est d'autant plus prononcé que « u » s'avère petit).

La matière noire dans les amas de galaxies

Les premiers soupçons sur la présence de matière noire dans les amas de galaxies remontent à Fritz Zwicky. En 1933, il avança que l'amas nommé Coma Berenices contient nettement plus de matière sombre que de matière lumineuse. Son analyse s'appuyait sur un résultat de mécanique classique, dit *théorème du viriel*, selon lequel, dans un système en équilibre dynamique, la somme de l'énergie potentielle et du double de l'énergie cinétique, est égale à zéro. D'où l'estimation immédiate de la masse de l'amas de galaxies, en fonction de sa taille et de la vitesse des galaxies le composant. Cette méthode laisse néanmoins planer quelques incertitudes découlant de la difficulté de dénombrer les galaxies composant les



Carte tridimensionnelle de la matière noire déduite de la distribution des arcs dans la portion d'Univers observée.

amas, sans y intégrer des galaxies extérieures, tout en comptant des galaxies de très faible luminosité. En outre, l'amas ne se trouve pas toujours en équilibre dynamique (condition d'application du théorème du viriel) car le temps de sa mise en équilibre peut dépasser les dix milliards d'années. Enfin, la situation n'offre qu'une vue partielle car toutes les distances apparaissent en projection et n'autorisent que la mesure des seules vitesses radiales.

Pourtant, les résultats obtenus par l'analyse du rayonnement X, émis par le gaz chaud diffus localisé entre les galaxies des amas, vont confirmer cette hypothèse. Les mesures réalisées par des satellites comme Röntgensatellit (ROSAT), lancé par l'Allemagne en 1990, XMM-Newton, de l'Agence spatiale européenne (ESA), ou encore Chandra, de la NASA, lancés tous deux en 1999, sont unanimes : le gaz qui baigne les galaxies semble en équilibre dans le champ de gravité de l'amas, lequel est engendré par les galaxies, le gaz chaud et la matière noire. De plus, l'intensité de l'émission X du gaz permet de calculer non seulement la masse de gaz mais aussi le potentiel gravitationnel dans lequel il se trouve plongé et donc, la masse totale de l'amas. Pour un amas typique, les étoiles représenteraient donc 2 à 4 % de la masse totale et le gaz chaud 12 à 16 % seulement. Même en tenant compte de la matière sombre déduite de l'étude de leurs courbes de rotation, les galaxies apparaissent donc comme négligeables dans le bilan de la masse des amas.

En 1986, une autre méthode fondée sur l'étude de mirages gravitationnels présents autour des amas de galaxies a confirmé ces résultats (figure 2). Parmi les observations les plus spectaculaires figurent celles d'arcs lumineux montrant des décalages spectraux nettement supérieurs à celui de l'amas. Les astro-

physiciens y voient des images de galaxies situées derrière l'amas et déformées par le champ gravitationnel de celui-ci. Il s'agit de mirages gravitationnels, ce que la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein permet de comprendre. En effet, si la gravitation résulte de la déformation imposée par la matière et l'énergie à l'espace-temps, alors la lumière elle-même devient sensible à la gravité puisqu'elle suit les lignes du plus court chemin de l'espace-temps courbé par la matière. Outre ces arcs lumineux, les observations révéleront également un phénomène encore plus fréquent, celui des « arcslets », petites images de galaxies d'arrière-plan, légèrement tordues par le champ de l'amas. La répartition, l'orientation et l'intensité de ces distorsions permettent de reconstituer, avec une remarquable précision, la distribution de masse de l'amas responsable. Une équipe internationale de scientifiques, comprenant des chercheurs de l'Irfu, a ainsi réalisé la première carte tridimensionnelle de la distribution de matière noire dans une portion d'Univers.

Ces études, indépendantes les unes des autres, convergent en faveur de masses élevées pour les amas de galaxies. Elles confirment donc les résultats obtenus par les distributions de vitesses et l'émission X.

La matière noire à l'échelle de l'Univers

L'étude du rayonnement à 2,7 K qui baigne aujourd'hui l'ensemble de l'Univers permet également de déterminer la composition de l'Univers dans son ensemble. D'où vient ce rayonnement ? Notre Univers étant en expansion, il a dû passer par une phase plus dense et plus chaude que celle qui

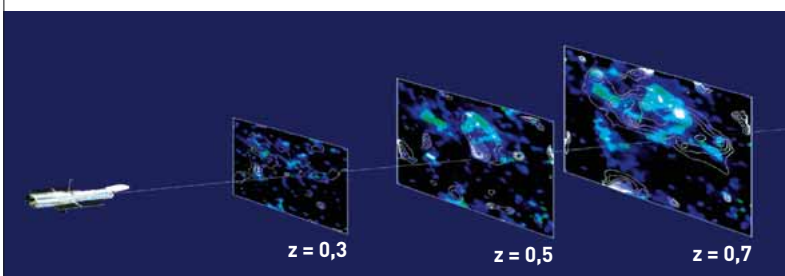


NASA

Les arcs lumineux autour de l'amas de galaxie Abell 2218 sont des images déformées de galaxies situées derrière l'amas photographié. Le champ gravitationnel de l'amas agit comme une lentille déformant les objets en arrière-plan.

prévaut actuellement. Après 380 000 ans d'expansion, l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que les électrons et les protons s'assemblent pour former des atomes d'hydrogène neutre. Toutes les conditions se trouvaient ainsi réunies pour que la lumière se propage librement sans trop interagir avec la matière. Cette lumière fossile a véhiculé, jusqu'à nos jours, des informations précieuses sur les conditions régnant alors dans l'Univers. Or, dans cette image à 2,7 K, d'infimes inhomogénéités, de température apparaissent, traduisant l'existence d'autres inhomogénéités, notamment de densité de matière. Pour les astrophysiciens, il s'agit de galaxies et d'amas de galaxie en germes. Dans le **Modèle standard de la cosmologie**, l'étude statistique de ces inhomogénéités a permis d'estimer la densité de matière et d'énergie présente dans l'Univers avec une surprise à la clef : non seulement la densité de matière dépasse d'un facteur dix la densité de matière lumineuse (étoiles, gaz ...) mais la densité totale d'énergie dans l'Univers surpasse aussi celle de la matière (voir *Astrophysique et observation de l'énergie noire*, p. 81). Ceci induit la présence d'une composante d'énergie non détectée jusqu'alors.

Néanmoins, cette étude recèle encore des incertitudes. Aussi a-t-il fallu tester la validité des résultats annoncés par des études indépendantes. Des mesures récentes, portant sur la distribution spatiale des galaxies semblent privilégier une séparation inter-galaxies de 150 millions de **parsecs**, correspondant à une prédiction des modèles de matière noire froide (voir *Théorie de la matière noire*, p. 77). L'explication vient du fait que de petites fluctuations opérant dans l'Univers primordial – contenant à la fois des **photons**, des électrons et de la matière noire – évoluent à la manière d'une **onde** sphérique sous l'effet de la pression des photons et cela, jusqu'à la formation des premiers atomes d'hydrogène. Les photons s'échappent alors du mélange et l'onde demeure figée à la distance qu'elle a parcourue pendant 380 000 ans (l'âge de l'Univers lors du gel de l'onde). Aujourd'hui, cela correspond à une taille de 150 millions de parsecs. Les galaxies se construisent dans les régions plus denses, de sorte qu'elles se retrouvent essentiellement à la position de la fluctuation initiale ou du bourrelet de matière distant de 150 millions de parsecs. La mesure de cette distance confirme la densité de matière dans l'Univers, corroborant les résultats apportés par les études sur le rayonnement à 2,7 K, ainsi que l'existence d'une grande quantité de matière noire à l'échelle de l'Univers.



R. Massey/NASA

Cartographie de la matière noire selon la distance dans trois tranches d'Univers correspondant à un âge de 7 ($z = 0,7$), 9 ($z = 0,5$) et 10 ($z = 0,3$) milliards d'années, et montrant la concentration progressive de matière noire au cours de l'évolution cosmique. z désigne le *redshift*, ou décalage vers le rouge. Plus z est grand, plus la distance spatio-temporelle de l'objet est grande.

> Nathalie Palanque-Delabrouille

Service de physique des particules
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

> Roland Lehoucq

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Théorie de la matière noire

Même si l'existence de la matière noire fut envisagée dès 1930 et donc il y a déjà 80 ans, même si les astrophysiciens ne doutent plus de son existence, même si elle s'avère cinq fois plus abondante dans l'Univers que la matière ordinaire... sa vraie nature demeure une énigme dont la résolution suscite nombre d'études aussi bien théoriques qu'expérimentales, chacune avec une proposition à la clef. En l'état des connaissances, il s'agirait d'une matière invisible, remplissant les galaxies, courbant les rayons lumineux à leur passage à travers les amas galactiques et jouant un rôle crucial dans la formation de grandes structures de l'Univers dont elle assurerait la cohésion. De quoi s'agit-il ?

Cinquante années d'études en **cosmologie** et en physique des particules ont amené les chercheurs à proposer des dizaines de particules « exotiques » portant des noms aussi curieux que « **neutralinos** » ou « particules de Kaluza-Klein ». Ces particules tirent leur origine dans des constructions théoriques comme la supersymétrie ou les **dimensions supplémentaires**, voire de propositions plus exotiques encore. Reparcourons les étapes ayant permis aux scientifiques de se convaincre de l'existence de la **matière noire** et aux théoriciens d'exercer leur imagination pour chercher la bonne solution de l'énigme.

Et si la matière noire n'existait pas ?

Les observations montrent que les **étoiles** périphériques de certaines **galaxies spirales** en rotation rapide subissent une **attraction gravitationnelle** beaucoup plus forte que celle qui s'obtiendrait en appliquant la **loi de Newton** à la matière visible dans les régions centrales de ces **galaxies**. Une question surgit alors : et si, au lieu de postuler l'existence de la matière invisible, on modifiait plutôt cette loi de manière à rendre l'accélération gravitationnelle plus forte à une grande distance du centre galactique ? Avancée, dans les années 1980, par Mordehai Milgrom⁽¹⁾ avec sa théorie MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), cette proposition, aussi pragmatique soit-elle, soulève néanmoins un certain nombre de difficultés, notamment à l'échelle des **amas de galaxies**, et plus généralement encore à l'échelle cosmologique. Ces difficultés viennent du fait que le **spectre du CMB** (*Cosmic Microwave Background*), dit aussi **fond diffus cosmologique**, ainsi que la formation gravitationnelle des grandes structures, indiquent que l'Univers requiert vraiment plus de matière que celle observée. En conséquence, la communauté scientifique considère aujourd'hui comme improbable que MOND puisse résoudre le problème de la matière noire.

Et si la matière noire n'était que de la matière ordinaire « déguisée » ?

La nécessité d'invoquer la présence d'une masse invisible amène les chercheurs à s'orienter, en premier, vers les constituants connus, mais élusifs, de la matière ordinaire : des **trous noirs**, du gaz interstellaire raréfié constitué de **protons** ou encore un grand nombre de neutrinos, reliques du **Big bang**.



Vue d'artiste du satellite Fermi, en orbite depuis juin 2008, cherchant notamment à détecter les rayons gamma de haute énergie (des centaines de gigaélectronvolts) provenant de l'annihilation de la matière noire.

Encore une fois, les observations cosmologiques excluent ces possibilités. S'il existait beaucoup de trous noirs dans les galaxies, on en verrait leurs effets sous la forme de lentilles gravitationnelles, quand ils passent devant les sources lumineuses. S'il y avait beaucoup de protons en forme de gaz, ils émettraient un grand nombre de rayons X et formeraient plus d'**hélium** qu'on en observe. Enfin, la contrainte que l'on a sur la masse des neutrinos (inférieure à quelques **électronvolts**) montre qu'ils sont trop légers pour accomplir le rôle de la masse manquante. De plus, de par leur masse si faible, les neutrinos se déplacent à grande vitesse dans l'Univers, ce qui les empêche d'engendrer de grandes structures comme les galaxies qui ne peuvent se former qu'à partir de matière lourde capable de « condenser » gravitationnellement dans des puits de potentiel.

Il faut donc bien une particule nouvelle : quelles en sont les propriétés générales ?

Heureusement, bien qu'encore inconnue, cette particule nous livre des indices quant à ses propriétés. Premièrement, la matière noire doit avoir des interactions faibles ou très faibles, voir même nulles, avec le reste de la matière : elle est donc très difficile à détecter. En particulier, elle ne possède

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

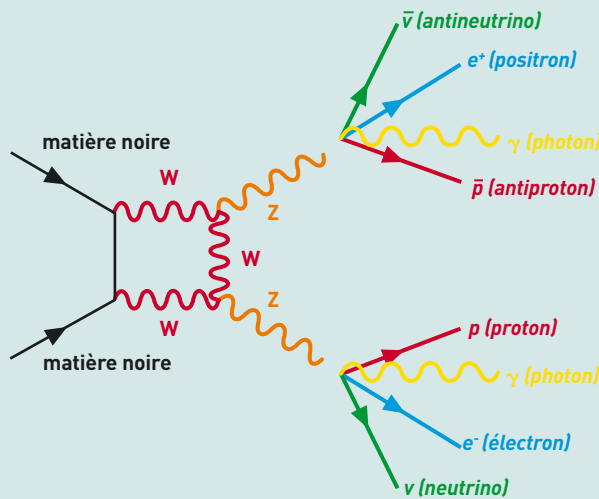


Figure 1. Diagramme de Feynman (d'après le physicien Richard Feynman, prix Nobel en 1965) illustrant l'annihilation de la matière noire en produits finaux ordinaires. Les physiciens utilisent ce type de diagramme pour calculer les propriétés du flux attendu : chaque diagramme décrit, de façon mathématique précise, les caractéristiques des particules et de leurs interactions. Dans ce cas, deux particules de matière noire s'approchent et s'annihilent en deux bosons faibles Z. L'annihilation se produit par la création et l'immédiate destruction d'une boucle compliquée de bosons W. Ensuite, les bosons Z se désintègrent en particules de matière ordinaire, tels que des photons, des neutrinos, des positrons, des antiprotons, etc. Ces produits finaux sont activement recherchés par plusieurs expériences sur Terre et sur des satellites en orbite.

pas de charge électrique et donc elle n'interagit pas avec la lumière (d'où son nom de matière « noire »). Deuxièmement, les données cosmologiques nous apprennent qu'elle doit être « froide » (c'est-à-dire se déplaçant à une vitesse beaucoup plus faible que celle de la lumière) – le cas d'une particule assez lourde ou produite au repos. Enfin, comme elle a probablement été produite aux premiers instants de l'Univers, elle doit être stable ou avoir une très longue durée de vie moyenne, supérieure à l'âge de l'Univers actuel. Dans le cas contraire, elle se serait désintégrée en particules ordinaires dans le passé. Les faibles interactions de la matière noire avec le reste de la matière pourraient bien être les interactions faibles du **Modèle standard**, par exemple celles responsables de la désintégration radioactive bêta. Les théoriciens considèrent comme très probable cette hypothèse. En effet, les calculs montrent que l'abondance actuelle d'une particule produite lors du big bang avec des propriétés typiques des interactions faibles serait précisément celle de la masse manquante. On appelle **WIMPs** (pour *Weakly Interacting Massive Particles*) de telles particules.

Quelques candidats répondant au profil souhaité

De nombreuses particules ayant ces propriétés, et donc candidates au rôle de matière noire, ont été proposées dans le cadre de théories nouvelles de la physique des particules. Parmi les plus étudiées figure le neutralino en supersymétrie. Introduite en physique des particules dans les années 1980, cette

(2)Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954), physicien et mathématicien allemand, le premier qui imagina une théorie avec des dimensions supplémentaires pour l'Univers. Oskar Klein (1894-1977), physicien théoricien suédois, ayant inventé l'idée que les dimensions supplémentaires peuvent exister physiquement mais sont enroulées et très petites.

théorie très élégante propose que, pour chaque particule ordinaire, il y ait une particule partenaire supersymétrique dotée des mêmes propriétés (par exemple, de la même charge électrique) mais d'une masse beaucoup plus élevée, estimée à une centaine de gigaélectronvolts environ. Le neutralino figure au nombre de ces particules, ou, plus précisément, un mélange de partenaires supersymétriques du **photon**, du **boson Z** et du **boson de Higgs**. De plus, le neutralino serait doué d'une propriété additionnelle (nommée **R-parité**, une sorte de nouvelle charge) qui, du fait des lois de la nature, ne peut disparaître dans aucun processus physique. En conséquence, il n'est pas possible au neutralino de se désintégrer en particules ordinaires : il serait ainsi stable. Voici pourquoi le neutralino figure comme un bon candidat pour jouer le rôle de matière noire, faisant aussi partie de la catégorie des WIMPs. L'abondance des paramètres théoriques rend ensuite plus riche et plus complexe la phénoménologie de la matière noire supersymétrique. La masse, la composition et les interactions précises des différents composants ont été étudiées en détail pour plusieurs modèles.

Vers la fin des années 1990, des scénarios à **dimensions spatiales supplémentaires** (dites de Kaluza-Klein⁽²⁾, en hommage aux deux théoriciens visionnaires qui les avaient conçus au début du XX^e siècle), sont revenus à l'attention des chercheurs. Leur hypothèse est qu'il existerait une cinquième dimension venant s'ajouter aux trois dimensions spatiales et au temps. Sa formation en boucles extrêmement petites la rendrait inaccessible à l'observation directe. Une particule plongée dans cet espace



Le satellite italo-russe PAMELA (pour Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) peu avant le lancement dans une fusée, en 2006. Les données envoyées par le satellite ont révélé l'existence de rayons cosmiques anormaux qui ont bouleversé la communauté des scientifiques travaillant sur la matière noire. Sont-ils dus à l'annihilation de particules de matière noire dans le halo de la galaxie ?

4+1 dimensionnel ressemble à une véritable tour de particules semblables dont les masses croissent par paliers d'environ 1 **téraélectronvolt**. Dans l'hypothèse où la « marche zéro » de cette tour se composerait de matière ordinaire (soit une projection quadridimensionnelle de la réalité 5-dimensionnelle) alors, la première marche en serait une copie lourde. Or, si un mécanisme additionnel, dit **parité de Kaluza-Klein**, impose la stabilité des particules de la première marche de la même façon que la **R-parité** en supersymétrie, alors ces particules lourdes constituent des parfaits candidats pour la matière noire – ce qui fut proposé notamment par Géraldine Servant, de l'Institut de physique théorique du CEA, en 1999.

La matière noire supersymétrique et de Kaluza-Klein ont stimulé la plupart des études théoriques et des recherches expérimentales depuis les années 1980. Néanmoins, les chercheurs ayant gardé leur esprit ouvert, de nombreuses autres propositions furent avancées. Par exemple, dans la catégorie de matière noire WIMP, des modèles dits « de matière noire minimale » proposent d'ajouter au modèle standard, non pas un secteur entier de copies, mais seulement les particules strictement nécessaires pour jouer le rôle de la matière noire. Autres hypothèses : celle des « neutrinos stériles », particules similaires aux neutrinos normaux mais plus lourds et sans interaction avec la matière ordinaire ; ou encore celle des *axions*, particules légères produites, peut-être, pendant les premiers instants d'évolution bouillante de l'Univers.

Avec plusieurs candidats pour un seul poste, comment identifier le bon ?

Ce grand nombre de « candidats » traduit le fort intérêt des scientifiques pour l'ensemble de ces questions. Mais il reflète également un manque évident de données expérimentales directes. Heureusement, les prochaines années paraissent prometteuses. Une combinaison de différentes techniques expérimentales sera sans doute nécessaire pour distinguer les différentes théories et parvenir à identifier la nature de la matière noire. Un grand espoir repose sur la production de matière noire par le *Large Hadron Collider (LHC)*, l'accélérateur de particules du **CERN**, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (voir *l'encadré*, p. 80). Une autre perspective concerne la détection des produits finaux de l'annihilation de deux particules de matière noire dans le halo galactique (figure 1). Un troisième axe compte sur les expériences souterraines sensibles comme *Edelweiss* (voir *l'encadré* p. 80) dont le CEA est un acteur majeur, visant à détecter un phénomène particulièrement rare : la collision d'une particule de matière noire de passage. Cette activité expérimentale gigantesque et pluridirectionnelle, indispensable pour tester les différentes prédictions, s'accompagne d'une intense activité théorique.

Ainsi, l'observatoire en orbite *PAMELA* (pour *Payload for AntiMatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), lancé par une fusée russe, en 2006, a-t-il récemment décelé des **rayons cosmiques** « anormaux », peut-être produits par les annihilations de la matière noire galactique. Ces données, difficilement explicables en termes de matière noire



P. Stoppa/CEA

La recherche fondamentale en physique des particules a fait d'énormes progrès pour valider un cadre théorique appelé **Modèle standard**. De nouvelles particules, comme le boson de Higgs et de nouveaux processus sont attendus dans le cadre des expériences du LHC visant à élargir ce modèle. Une de ces nouvelles particules sera-t-elle la matière noire ?

supersymétrique ou par la théorie de Kaluza-Klein, suscitent déjà la construction de nombreux nouveaux modèles.

Le problème de la matière noire établit des liens étroits entre la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Il est probable que, désormais, ce problème à l'échelle galactique et cosmologique se résoudra avec un nouvel état des plus petits constituants de la matière. L'exploration de la physique à l'échelle du téraélectronvolt au LHC, les observations astronomiques en rayons gamma du satellite Fermi ainsi que la prochaine génération de détecteurs souterrains issus de l'expérience *Edelweiss*, laissent augurer que la matière noire dévoilera bientôt son secret.

**> Marco Cirelli
et Camille Bonvin**

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

Pourra-t-on créer un jour de la matière noire au LHC ?

Pour répondre aux questions les plus fondamentales de la physique, le **Cern** (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) a mis en service, en 2008, le grand collisionneur de hadrons (LHC). En tant que pays hôte, la France a participé à sa construction par l'intermédiaire de ses deux plus importants organismes de recherche : le **CNRS** et le **CEA**. Au sein de ce grand instrument, les physiciens travaillent à provoquer des collisions entre faisceaux de protons de 7 **TeV** (soit 7000 **GeV**) d'énergie, observées par deux grandes expériences généralistes :

- **ATLAS** (pour *A Toroidal LHC Apparatus*) : il s'agit d'un des deux plus grands et plus complexes détecteurs construits à ce jour. Cette expérience de physique auprès du LHC est menée par une collaboration mondiale de scientifiques (1 800 physiciens et ingénieurs issus de 150 laboratoires de 34 pays différents) pour trouver le **boson de Higgs**, s'il existe (figure 1), ou d'autres nouvelles particules.

- **CMS** (pour *Compact Muon Solenoid*), l'autre grand détecteur, poursuit les mêmes buts scientifiques qu'ATLAS mais avec d'autres options techniques.

Deux autres programmes poursuivent une recherche spécifique :

- **Alice** (pour *A large ion Collider Experiment*) tentera de recréer, en laboratoire, les conditions qui régnaient juste après le

big bang et ainsi étudier l'évolution de la matière de la naissance de l'Univers à nos jours.

- **LHCb** (pour *Large hadron Collider beauty*) essaiera de comprendre pourquoi nous vivons dans un Univers apparemment constitué entièrement de matière, sans aucune présence d'**antimatière**.

L'énergie des collisions du LHC (14 TeV, soit 7 fois plus que le collisionneur précédent, actuellement en service aux États-Unis) contribuera à l'exploration complète de l'échelle d'énergie couvrant les alentours de 1 TeV, une échelle clé dans le **Modèle standard**. Le premier objectif des expériences conduites au LHC reste la découverte du mystérieux boson de Higgs ou de ce qui en tient lieu pour l'unification des **interactions électromagnétique et faible**. Mais aujourd'hui, de nouvelles théories ouvrent un cadre plus large que le Modèle standard pour essayer de répondre aux questions que celui-ci laisse en suspens, notamment sur la nature du fameux boson de Higgs, mais aussi de la **matière noire** et de l'**énergie noire**.

Toutes ces questions semblent, en effet, reliées par une interrogation centrale : quelle est l'origine de la masse des particules ? Pour l'énergie noire, les chercheurs se heurtent à un obstacle majeur : au regard des connaissances actuelles sur les particules élémentaires, le calcul de sa densité dans l'Univers donne un résultat beaucoup trop grand, des milliers de fois supérieur à l'observation ! En revanche, la situation semble plus favorable pour la compréhension de la matière noire. En effet, les mesures cosmologiques pointant vers des particules massives qui interagissent faiblement, leur échelle de masse « typique » serait d'environ 100 GeV, soit l'échelle d'unification du Modèle standard. Il semble donc naturel de conclure que la matière noire et l'unification électrofaible partagent une origine commune. Dans cette éventualité, de telles particules pourraient être produites par le LHC. C'est ce que prédit, par exemple, l'une des nombreuses théories avancées pour dépasser le Modèle standard, et sans doute la plus connue, à savoir celle de la « **supersymétrie** », proposée dans les années 1970 mais demeurée hypothétique. De nombreuses versions existent mais, de façon générale, la LSP (pour *Lightest Supersymmetric Particle*), particule supersymétrique la plus légère, ferait une excellente « candidate ». Ainsi, grâce à son énergie et sa **luminosité** élevées, le LHC pourrait prochainement

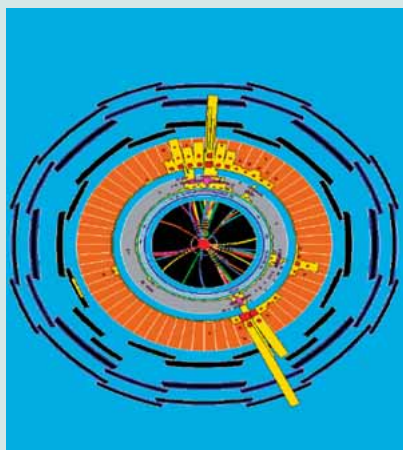


Figure 1. Simulation d'un événement mettant en jeu la « supersymétrie » dans l'expérience Atlas : vue transverse à l'axe des faisceaux. Dans cet événement, deux LSP et deux jets de particules ordinaires ont été produits. Les LSP ne sont pas détectés directement mais le bilan des impulsions montre un déficit : il manque « quelque chose » du côté gauche ; ce bilan permet de caractériser leur présence. Les axes sont simplement géométriques : X, Y et leur unité en mètre : X (m) et Y (m).



L'expérience Alice, dédiée à l'étude de la matière dans ses états extrêmes.

mettre en évidence la supersymétrie. Le point commun entre les différents types d'événements prédits par les théories de supersymétrie réside dans le fait qu'il existe, dans le bilan de la collision, un manque d'énergie (transverse), emportée par une ou plusieurs LSP. Les chercheurs espèrent observer rapidement ces événements manquant d'énergie transverse. Comparé au bruit de fond du Modèle standard, le moindre excès constaté serait alors favorable à la théorie de la supersymétrie. De façon similaire, d'autres théories (dimensions supplémentaires, axions, etc.) prédisent que si la matière noire et l'unification électrofaible partagent la même origine, alors il existe une chance tangible pour que le LHC produise la, ou les particules constitutives de la matière noire de l'Univers.

> Bruno Mansoulié

Service de physique des particules (SPP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales
de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

2. L'Univers sous la domination de l'énergie noire

Astrophysique et observation de l'énergie noire

Une des plus grandes surprises de la cosmologie moderne restera, sans nul doute, la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers, due à ce que les chercheurs nomment énergie noire. Son existence a été confirmée par les résultats majeurs apportés par le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT) auquel les équipes de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) ont contribué tant au plan instrumental que dans l'analyse des données.



Jean-Charles Cuitlandre/CFHT

Télescope Canada-France-Hawaii (à droite sur la vue).

Du big bang à l'expansion accélérée de l'Univers

Au XX^e siècle, la **cosmologie** a considérablement progressé grâce aux observations qui ont conduit à la découverte de l'expansion de l'Univers et du **fond diffus cosmologique**, ainsi qu'à l'accord entre les mesures et les prédictions pour les abondances des éléments légers. Ainsi, étape par étape, ces observa-

tions contribuent-elles à valider le modèle du **big bang** (encadré 1). Ce qui ne signifie pas que tous ses secrets en soient dévoilés pour autant puisque d'autres observations laissent supposer l'existence d'une **matière noire** dans l'Univers dont la nature demeure pour l'instant inconnue.

À ce mystère s'en ajoute un autre. En raison de l'attraction universelle, l'expansion de l'Univers devrait

Les étapes principales du modèle du big bang

1

Associé à la **relativité générale** d'Albert Einstein et à la physique nucléaire, le modèle du **big bang** fait naître l'Univers d'une singularité initiale : l'explosion d'un grain de matière dense et chaud. D'où une expansion au cours de laquelle l'Univers se serait dilaté régulièrement et refroidi, condition pour que s'opère la synthèse des premiers **noyaux atomiques** (**hydrogène** et **hélium**) produite essentiellement dans les trois premières minutes après le big bang. À cette étape, dite de la **nucléosynthèse primordiale**, succéda une période d'équilibre entre la matière et le rayonnement dont l'effet fut de détruire les édifices atomiques plus complexes dès leur création par la matière. Après 380 000 ans environ, l'Univers se trouvant suffisamment refroidi et la formation des atomes n'étant plus contrariée par le rayonnement, la matière et le rayonnement se sont alors découplés pour suivre des évolutions différentes. Ainsi libéré, le rayonnement a traversé l'Univers où il subsiste encore sous la forme de rayonnement fossile à basse énergie, appelé **fond diffus cosmologique**. Quant à la matière, sous l'effet de l'attraction universelle, ses atomes se sont regroupés en de gigantesques nuages gazeux. En s'effondrant, ils donnèrent naissance aux premières

étoiles, puis aux premières **galaxies**, 600 millions d'années après le big bang. L'effet de l'explosion initiale se fait toujours sentir sur ces objets qui s'éloignent les uns des autres avec une vitesse proportionnelle à leur distance.

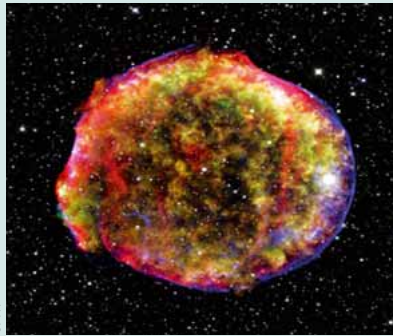


ESA/NASA

C'est en comparant les distances et les vitesses (déduites des mesures de luminosité et de décalage spectral) de plusieurs dizaines de galaxies, qu'Edwin Hubble découvrit, en 1929, que l'Univers était en expansion : les galaxies s'éloignent de nous avec une vitesse proportionnelle à leur distance. À partir de cette loi, on peut déduire l'âge de l'Univers : 13,8 milliards d'années environ.

Les supernovae de type Ia, des chandelles standard

Les **supernovae** de type Ia (SNIa), observées jusqu'à ce jour, montrent des propriétés spectrales et lumineuses très homogènes. D'où l'hypothèse qu'elles proviennent de l'explosion thermonucléaire d'une **naine blanche**, étoile en fin de vie, **accrétant** la matière d'une étoile compagne géante. Cette naine blanche gagne en masse jusqu'à approcher la **limite dite de Chandrasekhar**. La température interne de l'étoile s'élève alors suffisamment pour déclencher une combustion nucléaire explosive. À partir de là, les éléments situés au cœur de l'étoile (carbone et oxygène essentiellement) brûlent en donnant du ^{56}Ni . Cette combustion dégage une telle énergie que l'étoile finit par exploser. La désintégration ultérieure du ^{56}Ni en ^{56}Co , puis en ^{56}Fe , définit la **luminosité** de la supernova et la rend



CFHT

aussi brillante que plusieurs milliards de **soleils**, soit l'équivalent d'une petite galaxie. Comme la masse de l'étoile, et par suite la quantité de nickel produite, est pratiquement toujours la même lors de l'explosion, les SNIa présentent des luminosités simi-

lares. On peut alors les utiliser comme des « chandelles standard » pour mesurer des distances, car leur flux apparent ne dépend que de la distance parcourue par les **photons** entre l'instant de l'explosion et celui de l'observation.

se ralentir. Pour le vérifier, les astrophysiciens ont observé le flux de **supernovae** de type Ia (SNIa), explosions d'**étoiles** en fin de vie, situées à plusieurs milliards d'**années-lumière**. Leur intérêt réside dans leur **luminosité** pratiquement reproductible (encadré 2). La mesure de leur flux apparent revient donc à mesurer la distance parcourue par les **photons** depuis l'explosion – distance qui dépend du contenu de l'Univers et de sa géométrie. Or, à la fin des années 1990, les premières observations de SNIa lointaines révèlent que leur flux apparent s'avère plus faible que prévu dans un Univers exclusivement composé de matière. La distance parcourue par les photons émis par les supernovae est donc plus importante que prévu. Pour les chercheurs, force est d'admettre qu'il existe dans l'Univers une composante énergétique capable d'accélérer l'expansion et qui ne soit ni matière ni rayonnement. Une telle

composante a été prévue par les équations de la **relativité générale** d'Albert Einstein à la condition d'y ajouter une constante, dite « **constante cosmologique** ». D'autres descriptions existent et donnent à cette composante un contenu plus fondamental. En attendant de pouvoir trancher, cette composante a reçu le nom d'**énergie noire**. Sa densité représente trois quarts du contenu énergétique de l'Univers, contre un quart seulement pour la matière.

Le relevé de supernovae par le CFHT

Ce résultat étant inattendu, les chercheurs ont lancé de nouvelles études sur les SNIa lointaines dont l'expérience *Supernova Legacy Survey* (SNLS). De 2003 à 2008, grâce au télescope Canada-France-Hawaii, de 3,6 mètres de diamètre (situé à Hawaï), SNLS a détecté et mesuré un millier de SNIa, contre une cinquantaine dans les expériences antérieures. Ce résultat s'avère d'autant plus probant que les SNIa sont rares : à peine une explosion par siècle pour une **galaxie** comme la nôtre. Pour les déceler, SNLS a bénéficié de la caméra à grand champ MEGACAM, caméra CCD de 340 millions de **pixels**, conçue à l'Irfu.

Instrument unique au monde, son champ de 1 degré carré (soit quatre fois la pleine Lune) permet d'observer, en une seule fois, de grandes portions du ciel, susceptibles de contenir jusqu'à une dizaine de supernovae. SNLS revenant constamment sur ces champs tant qu'ils sont observables, les détections peuvent se poursuivre toute l'année et les « candidates » être suivies tout ce temps-là. D'où la possibilité de reconstruire le profil temporel de leur émission lumineuse, appelée « courbe de lumière ». Les mesures de flux s'effectuent tous les trois ou quatre jours, à partir de quatre filtres allant du rayonnement optique au rayonnement infrarouge proche (figure 1). Cet échantillonnage perfectionne notablement les programmes antérieurs qui ne suivaient les supernovae qu'à plusieurs semaines d'intervalle et avec seulement deux filtres. Enfin, dès sa détection par SNLS, toute supernova potentielle, proche de

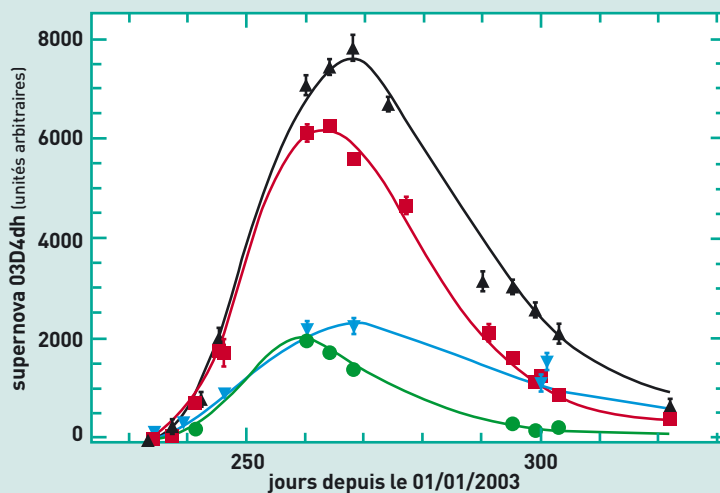


Figure 1. Courbe de lumière de la supernova 03D4dh mesurée par SNLS (le flux est exprimé en unités arbitraires). Les mesures sont effectuées, tous les 3 à 4 jours, en dehors des périodes de pleine lune dans quatre filtres distincts : bleu (triangles pointant vers le haut), vert (carrés), rouge (triangles pointant vers le bas) et proche infrarouge (triangles pointant vers le bas).

son maximum de lumière, est observée par des spectrographes sur des télescopes de 8 à 10 mètres de diamètre (VLT, Keck, Gemini) pour déterminer précisément son décalage spectral et son type (thermonucléaire pour les Ia ou gravitationnel). Les supernovae gravitationnelles étant peu exploitables pour la cosmologie en raison de leur grande variabilité lumineuse, seules les Ia sont sélectionnées après spectroscopie. À l'issue du relevé, SNLS dénombre 500 SNIa confirmées par spectroscopie, de décalages spectraux allant de 0,2 à 1,2. Cela signifie que leur formation a eu lieu dans un univers plus jeune de 2 et 8 milliards d'années environ. Ces supernovae remontent donc au très lointain passé de l'Univers. Pour parvenir jusqu'à nous, leur lumière a franchi des distances considérables de plusieurs milliards d'années-lumière. Or, sur de telles distances, le parcours des photons dépend significativement de l'évolution passée de l'Univers. En conséquence, mesurer le flux des SNIa sur une gamme étendue de décalages spectraux, revient à remonter l'évolution passée de l'Univers, elle-même déterminée par son contenu en matière et énergie. Cette opération a été entreprise par SNLS dès la première année d'observations, sur la base de 70 SNIa confirmées par spectroscopie. Les mesures montrent que le flux provenant des SNIa lointains s'avère plus faible que celui attendu dans un Univers dominé par la matière. En revanche, ces mesures s'accordent avec les résultats d'un Univers en expansion accélérée, dominé à 74 % par l'énergie noire (figure 2).

Les données transmises par SNLS permettent aussi de tester l'évolution temporelle de la densité d'énergie noire. Perçue comme un fluide emplissant tout l'espace, l'énergie noire se caractérise par sa pression. Le rapport entre cette pression et la densité, noté w et appelé « paramètre de l'équation d'état de l'énergie noire », gouverne l'évolution temporelle de la densité

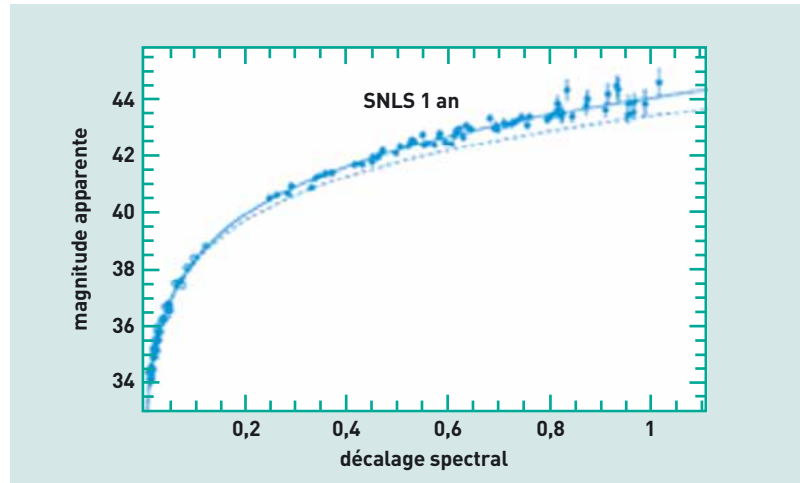


Figure 2. Magnitude apparente des SNIa (déduite du flux lumineux au pic) en fonction de leur décalage spectral (Il est d'usage, en astrophysique, d'exprimer les flux lumineux sur une échelle logarithmique inversée, dite échelle des magnitudes : plus un objet est lumineux, plus faible sera sa magnitude). Les mesures réalisées lors de la première année de fonctionnement du SNLS (points) associées à des mesures sur des supernovae proches (cercles) sont comparées aux prédictions pour un Univers composé exclusivement de matière (courbe pointillée) et pour un univers en expansion accélérée, composé de 74 % d'énergie noire et de 26 % de matière (courbe en trait plein).

d'énergie noire. Une valeur $w = -1$ correspond à une densité d'énergie noire constante dans le temps. Les résultats de la première année de SNLS, couplés à ceux d'autres observations, conduisent à une valeur de w compatible avec -1 , pour une incertitude relative de 10 % (figure 4, gauche). L'analyse des trois premières années de données de SNLS (soit 250 SNIa) s'achève et les conclusions vont dans ce même sens, avec une précision accrue : 6 % au lieu de 10 %. Affiner ce test reste un enjeu majeur : une densité d'énergie noire constante dans le temps favoriserait une interprétation en termes de constante cosmologique.

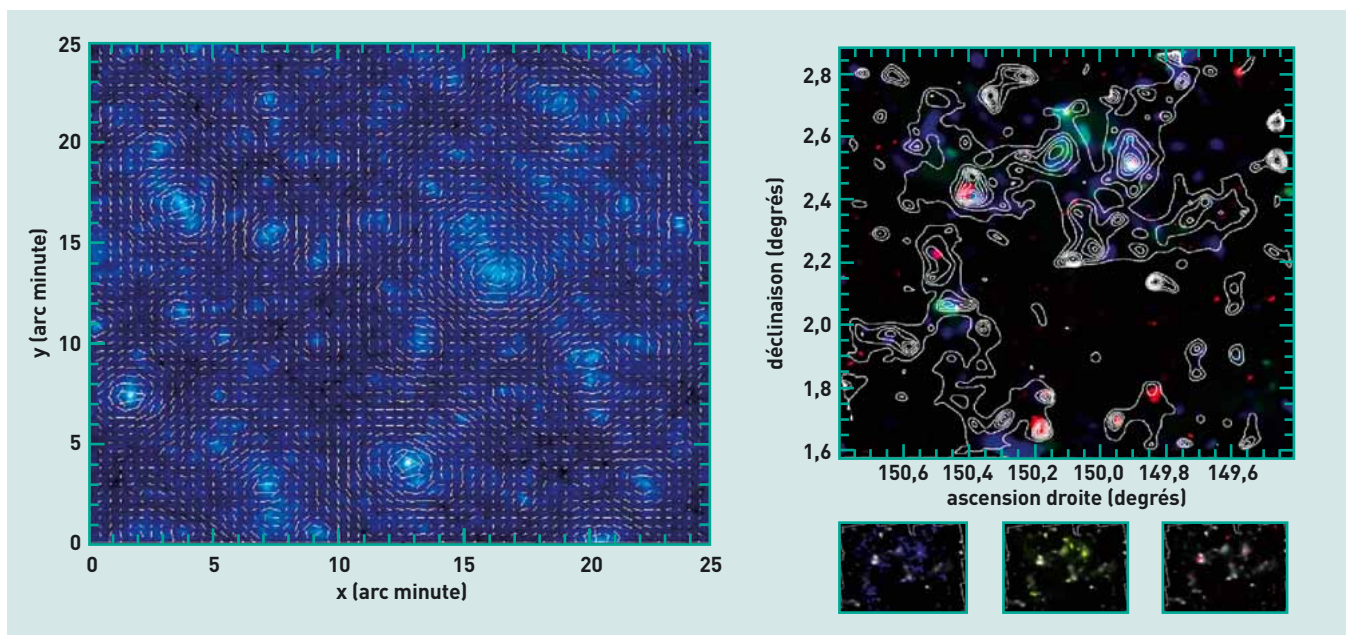


Figure 3. Cartographie de la matière noire grâce à l'effet de cisaillement gravitationnel. Gauche : image résultant d'une simulation numérique montrant la distribution de matière noire (échelle de couleurs) et le cisaillement gravitationnel auquel sont soumises les images de galaxies lointaines (segments) ; « x » et « y » étant les coordonnées dans le plan de l'image. Droite : cartographie de la matière noire en coordonnées galactiques (contours) et visible (couleurs) dérivée par la technique de cisaillement gravitationnel à partir des observations du projet COSMOS (pour *Cosmic Evolution Survey*) avec le télescope spatial Hubble.

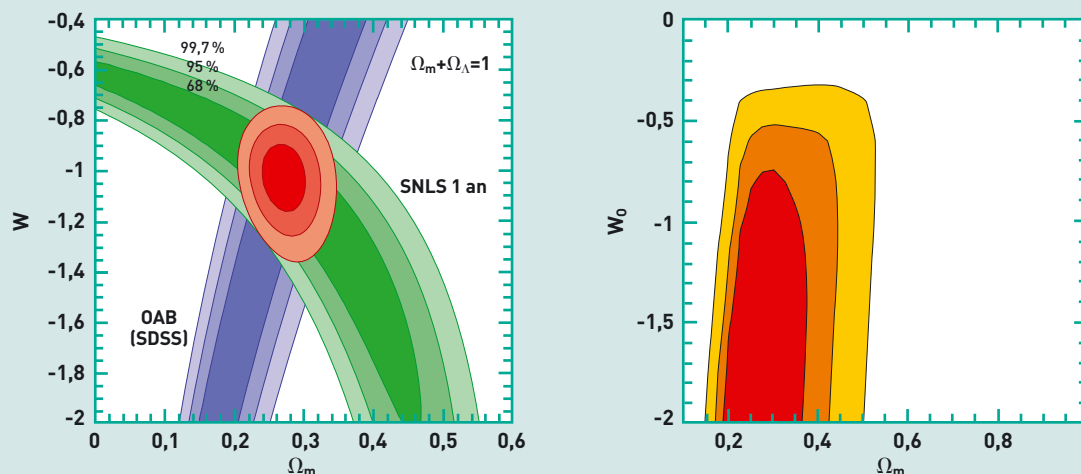


Figure 4. Contraintes actuelles sur l'énergie noire tirées des études au CFHT (supernovae à gauche, cisaillement gravitationnel à droite) et des mesures du SDSS (pour *Sloan Digital Sky Survey*), sur les oscillations acoustiques baryoniques (OAB). Les contraintes sont exprimées en termes de pourcentage de densité de l'Univers sous forme de matière noire ($\Omega_m=1-\Omega_\Lambda$ où Ω_Λ est la densité d'énergie noire) et du paramètre w (ou w_0) de l'équation d'état de l'énergie noire (rapport entre pression et densité d'énergie noire).

Mesure de l'effet de cisaillement gravitationnel par le CFHT

Deux autres observations cosmologiques devraient permettre de gagner encore en précision :

- l'étude des **oscillations acoustiques baryoniques**, c'est-à-dire les fluctuations du **plasma** matière/ rayonnement dans l'Univers **primordial**, lesquelles ont laissé leur empreinte dans la répartition des galaxies ;
- l'étude de la cartographie de la matière de l'Univers par l'effet de cisaillement gravitationnel. Elle se fonde sur la mesure des formes de galaxies lointaines, déformées par les grandes structures de l'Univers sur la ligne de visée. Cette technique généralise, à grande échelle, la méthode des mirages gravitationnels, utilisée pour reconstruire la distribution de masse des amas et révéler leur contenu en matière noire. Le cisaillement gravitationnel contribue à décrire la distribution de matière noire à l'échelle de l'Univers (figure 3). À l'aide du décalage spectral, déduit des couleurs des galaxies dans plusieurs bandes de longueurs d'onde, cette cartographie s'effectue en trois dimensions – la mesure des propriétés statistiques de l'histoire de la formation des structures de l'Univers n'en devient que plus précise. Le plus important relevé de l'effet de cisaillement gravitationnel a été obtenu grâce à la caméra MEGACAM du CFHT, à partir de l'analyse du relevé « grand champ » effectué pendant la campagne d'observations 2003-2008. Ce relevé a permis de mesurer la densité de l'énergie noire à partir de son effet sur la géométrie de l'Univers et sur le taux de croissance de ses structures. La figure 4 (droite) expose les contraintes obtenues à partir des premiers 20 degrés carrés de ce relevé, qui concordent avec celles déduites des supernovae et des oscillations acoustiques baryoniques. À terme, le relevé de l'effet de cisaillement gravitationnel étendra de dix fois sa surface et posera des contraintes plus précises sur l'énergie noire.

Perspectives

Des mesures encore plus fines devraient clarifier définitivement le comportement de l'énergie noire. En

effet, les expériences actuelles ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne de w sur la gamme des décalages spectraux observés. Les expériences futures auront à tenir compte d'une évolution possible de w avec le décalage spectral. Il s'agit du seul moyen de distinguer entre une pure constante cosmologique et un modèle plus dynamique d'énergie noire. L'Irfu prépare deux expériences sur la question :

- la première consiste en un relevé des oscillations acoustiques baryoniques du ciel entier et à trois dimensions, par interférométrie radio. La détection de la raie à 21 cm de l'**hydrogène** neutre, amènera à remonter à la répartition des galaxies jusqu'à un décalage spectral de 2. Avec une **résolution** angulaire d'une minute d'arc et une résolution de 0,001 sur le décalage spectral, l'interféromètre HSHS (pour *Hubble Sphere Hydrogen Survey*) devrait atteindre une sensibilité de 25 % sur l'évolution de w , à l'échéance de quelques années ;
- la deuxième vise le plus long terme avec un imageur spatial grand champ, appelé Euclid. Cet instrument étudiera, avec une très grande précision, l'Univers sombre à l'aide du cisaillement gravitationnel et des oscillations acoustiques baryoniques. Pour cela, il utilisera un télescope de 1,2 m, dont le champ de vision, de 0,5 degré carré, combinera l'imagerie et la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge. La précision souhaitée est de 5 % sur l'évolution de w , ce qui permettra de différencier des modèles d'énergie noire dérivant de modifications de la théorie de la relativité générale (voir *Les télescopes du futur*, p. 102).

> Vanina Ruhlmann-Kleider

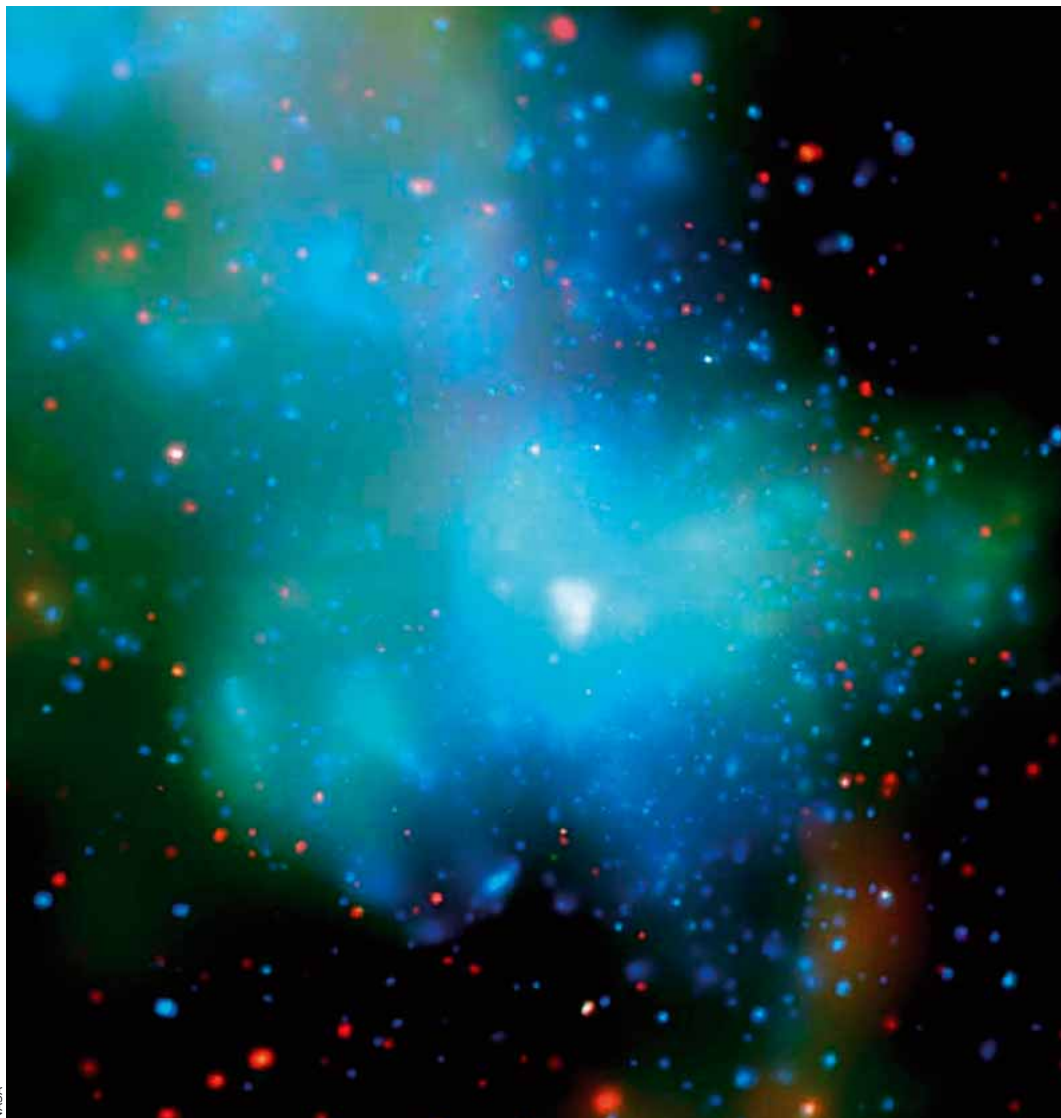
Service de physique des particules
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

> Alexandre Réfrégier

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

Théories de l'énergie noire

Si les observations sur l'accélération de l'expansion de l'Univers se précisent toujours plus, néanmoins sa description théorique demeure problématique. En effet, plus de dix ans après les premières mesures provenant de l'explosion des supernovae de type Ia, aucune théorie ne peut encore rendre compte de l'ensemble du phénomène. Pire, chacun des scénarios proposés met en défaut les outils théoriques connus.



L'Univers est composé de matière lumineuse formant les étoiles et les galaxies. Il existe aussi un fond de matière dite noire car non lumineuse dont le halo entoure chaque galaxie. Enfin il semble qu'il existe un troisième type de matière qui conduirait à l'accélération de l'Univers. Cette énergie noire n'est pas lumineuse et se trouve répartie uniformément dans tout l'Univers.

Quelles ont donc été les différentes pistes suivies pour décrire l'accélération de l'expansion de l'Univers et à quelles impasses ont-elles mené ? Pour tenter d'y répondre, il faut prendre pour point de départ que les données d'observations qui ont conduit à la découverte de l'accélération de l'Univers reposent sur la **théorie de la relativité générale**, pilier de la physique du XX^e siècle. Élaborée par Albert Einstein, en 1915, celle-ci réconcilie la théorie de la gravité universelle avec celle de la relativité. Depuis, cette hypothèse a souvent été testée, notamment sur des échelles allant du système solaire aux lointaines **galaxies**. Elle a même trouvé une application inattendue avec le système de positionnement GPS ! Mais pour modéliser l'évolution de l'Univers dans son ensemble, il faut considérer des

échelles beaucoup plus grandes que celles des plus lointains **amas de galaxies**. À ces distances, l'Univers apparaît isotrope et homogène, c'est-à-dire qu'aucune direction ou aucun lieu ne semble privilégié. Cette observation a été érigée en principe – **le principe cosmologique**. Relativité générale et principe cosmologique sont à la base des théories développées, depuis les années 1930, pour décrire l'histoire de l'Univers, de la formation des **noyaux** au **rayonnement de fond cosmique**.

La relativité générale enseigne qu'énergie et géométrie de l'**espace-temps** sont intimement liées. Par exemple, le Soleil courbe l'espace-temps en son voisinage et dévie les rayons lumineux. En **cosmologie**, la dynamique de l'Univers résulte de la nature et de la quantité d'énergie contenue en son sein.

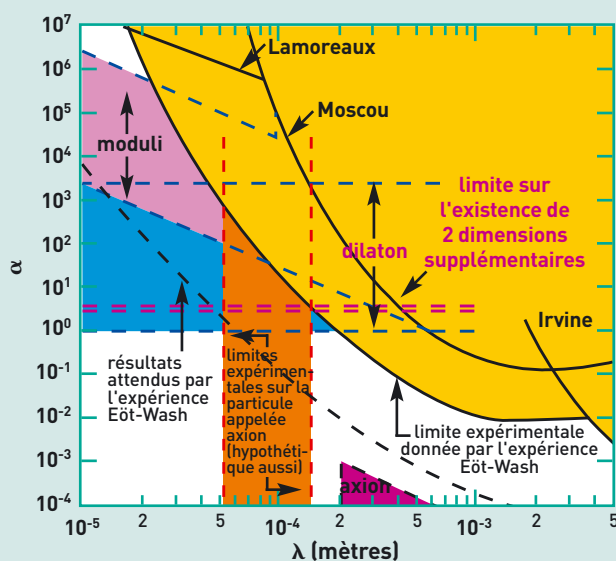


Figure 1. L'étude de l'attraction gravitationnelle, des plus courtes échelles aux plus grandes distances, est fondamentale pour bien appréhender le problème de l'accélération de l'Univers. La modification de la gravité à petite échelle (ici de l'ordre du millimètre en abscisse) pourrait bien révéler la présence de particules engendrant l'accélération. Ces particules viendraient augmenter la force de gravité d'un pourcentage porté en ordonnée. Les mentions de « Lamoreaux » faites sur ce schéma correspondent à l'expérimentateur dont on présente les résultats et celle d'« Irvine » à l'expérience réalisée dans l'université du même nom (idem pour Moscou). Le dilaton est une hypothétique particule utilisée dans la théorie des cordes : sont données sur le schéma les bornes de son existence (idem pour le moduli). L'axion est une hypothétique particule qui pourrait être à l'origine de la matière noire.

De plus, la relativité générale fait graviter toutes les formes d'énergie, contrairement à l'approche newtonienne où seule gravite la matière. Or, et il s'agit d'une extrême surprise, une phase d'accélération est impossible en relativité générale, sous couvert de validité du principe cosmologique, si le contenu en énergie de l'Univers se réduit à la radiation lumineuse, aux **neutrinos**, à la matière composant les galaxies et au **halo de matière noire** les entourant. Engendrer une accélération suppose donc de « violer » l'une de ces hypothèses et de modifier la relativité générale, le principe cosmologique ou le contenu en énergie de l'Univers. Les dix dernières années ont vu fleurir nombre de modèles cherchant à expliquer l'accélération de l'Univers par la modification d'une de ces hypothèses. D'ailleurs, bien avant la découverte de l'accélération de l'Univers, Albert Einstein proposait déjà de modifier la relativité générale. Optant pour une vision aristotélicienne du cosmos, il imaginait une sphère céleste statique. Or, selon la théorie de la relativité générale, celle-ci ne peut pas être immobile : l'attraction gravitationnelle due à la matière qui la compose impliquant sa contraction (figure 1). Pour contrecarrer cet « écroulement gravitationnel », Albert Einstein introduisit un nouveau terme dans les équations, celui de **constante cosmologique** – l'effet attendu étant de stabiliser la sphère céleste et de rendre ainsi l'Univers statique. Néanmoins, quand l'astrophysicien Edwin Hubble découvrit l'expansion de l'Univers, dans les années 1920, et a donc battu en brèche l'hypothèse d'un Univers statique et immuable, l'introduction de la constante

cosmologique devint obsolète et ceci, jusque dans les années 1990.

Il aura fallu du temps pour décrire la nature physique de la constante cosmologique. Seulement dans les années 1960, apparaît une équivalence avec la densité d'énergie du vide. En physique classique, le vide signifie une absence de matière et aucune densité d'énergie. Cette perception, la mécanique quantique va la bouleverser. En effet, dans le vide, des particules virtuelles apparaissent, puis disparaissent, avant même d'avoir pu être observées. De cette activité frénétique résulte sûrement l'existence d'une énergie du vide. Une manifestation expérimentale de ce phénomène a été décelée et porte le nom d'*effet Casimir*⁽¹⁾. Entre deux plaques métalliques, les fluctuations du champ **électromagnétique** créent une force attractive. La mystérieuse constante cosmologique introduite par Albert Einstein reflète ainsi la nature quantique du vide cosmologique. Elle correspond à une modification du contenu en énergie de l'Univers.

L'effet d'une constante cosmologique sur la dynamique d'un Univers en expansion est bien connu depuis les travaux d'Alexander Friedmann et Willem de Sitter⁽²⁾ dans les années 1920. Alors que la densité d'énergie de la matière et de la radiation décroît avec le temps, la constante cosmologique reste immuablement constante et devient ainsi, au bout d'un certain temps, la portion dominante du contenu en énergie de l'Univers. Lorsque la constante cosmologique domine les autres formes d'énergie, la force répulsive induite par celle-ci ne peut plus être contrebalancée : d'où une période d'expansion accélérée qui s'identifie à celle que l'on observe. La constante cosmologique apparaîtrait donc comme l'explication la plus simple de l'accélération de l'Univers. Puisque celle-ci n'a commencé que « récemment », la constante cosmologique devrait prendre une valeur proche de la densité actuelle de matière de l'Univers. Cette dernière reste très faible : 25 ordres de grandeur de moins que la densité de l'atmosphère et 6 de moins que le vide intergalactique ! L'existence d'une densité d'énergie si minuscule est en conflit avec notre connaissance de la physique des particules. Aussi a-t-il fallu envisager d'autres explications.

Ainsi, la constante cosmologique peut également s'interpréter comme étant la densité d'énergie d'un fluide emplissant l'Univers, dont la pression se trouve exactement à l'opposé de sa densité d'énergie. Le rapport pression/densité d'énergie, appelé « **équation d'état** » vaut alors -1. Plus généralement, l'accélération de l'Univers pourrait encore émaner

(1) Hendrick Casimir (1909-2000), physicien hollandais, directeur des laboratoires Philips et professeur à l'université de La Haye. Spécialiste de la supraconductivité et des diélectriques, il est l'auteur d'un effet qui porte son nom selon lequel deux plaques métalliques parallèles situées dans le vide s'attirent.

(2) Alexander Friedmann (1888-1925), physicien et mathématicien russe ayant entrevu, le premier, que la théorie de la relativité générale d'Einstein permettrait l'étude de la structure de l'Univers dans son ensemble. Willem de Sitter (1872-1934), mathématicien, physicien et astronome néerlandais, qui a été l'un des premiers à évoquer, en 1917, la possibilité d'un Univers en expansion, sur la base des travaux de la relativité générale d'Einstein.

de la présence d'un nouveau type de matière découverte dans l'Univers : l'**énergie noire**. Les observations contraignent son équation d'état à approcher -1 . Si elle descendait à -1 , l'Univers deviendrait instable. Mais rien ne l'empêche d'être supérieure à -1 et inférieure à $-1/3$, valeur maximale au-dessus de laquelle toute accélération devient impossible. La description thermodynamique du fluide régissant l'accélération de l'Univers ne représente que la première étape du processus de modélisation. En effet, si l'équation d'état ne s'établit pas exactement à -1 , la densité d'énergie noire ne peut pas demeurer constante dans le temps. Ce comportement se modélise par la théorie d'un **champ scalaire** dont l'énergie potentielle joue le rôle d'énergie noire. Le champ scalaire évolue comme une boule qui roule en étant freinée le long d'une pente douce (figure 2). Après une longue roulade, le champ s'arrête et son énergie potentielle reste constante. C'est elle qui conduit à l'accélération de l'Univers (figure 3). Cette nouvelle forme d'énergie porte le nom de quintessence. Toutes les tentatives pour expliquer l'accélération de l'Univers par une nouvelle composante d'énergie ne résolvent pas, pour autant, le problème de la valeur de la constante cosmologique. L'énergie du vide, due aux fluctuations **quantiques**, s'avérant de 120 ordres de grandeur plus importante que la valeur observée, on peut parler de catastrophe non élucidée. Un mécanisme est donc nécessaire pour éviter celle-ci. Le « candidat » le plus prometteur pourrait être la **supersymétrie**, postulant l'existence de « superpartenaires » associés à chaque particule élémentaire. Alors, l'énergie du vide s'annule exactement. La découverte des « superpartenaires » pourrait intervenir au *Large Hadron Collider* dans les prochains mois. Malheureusement, les « superpartenaires » ayant jusqu'ici échappé aux observations, la supersymétrie ne peut donc pas être considérée comme une symétrie exacte de la nature. Sa brisure réintroduit des fluctuations du vide dont la densité d'énergie reste encore 60 ordres de grandeur trop grande.

Une autre explication a été avancée, celle dite du **principe anthropique** énonçant que l'Univers doit être tel que son observation soit possible. Par exemple, du simple fait que les galaxies se soient formées, découle que la constante cosmologique ne peut excéder 100 fois la densité de matière observée. Les progrès récents de la **théorie des cordes** prédisent l'existence de multiples univers, chacun doté d'une énergie du vide différente. Il devient alors envisageable que notre Univers ne soit que l'un d'entre eux, associé à une petite énergie du vide et hébergeant des observateurs.

Une autre voie consisterait à modifier la relativité générale aux échelles cosmologiques et donc avancer que l'accélération de l'Univers résulterait d'une manifestation des lois régissant la gravité à très longue distance. Mais cette hypothèse se heurte elle-même à d'autres obstacles. Comme toutes les théories physiques décrivant les quatre interactions fondamentales, la relativité générale est une théorie **lagrangienne** dont les équations se déduisent du principe de moindre action. Modifier la relativité générale revient à changer le caractère lagrangien de

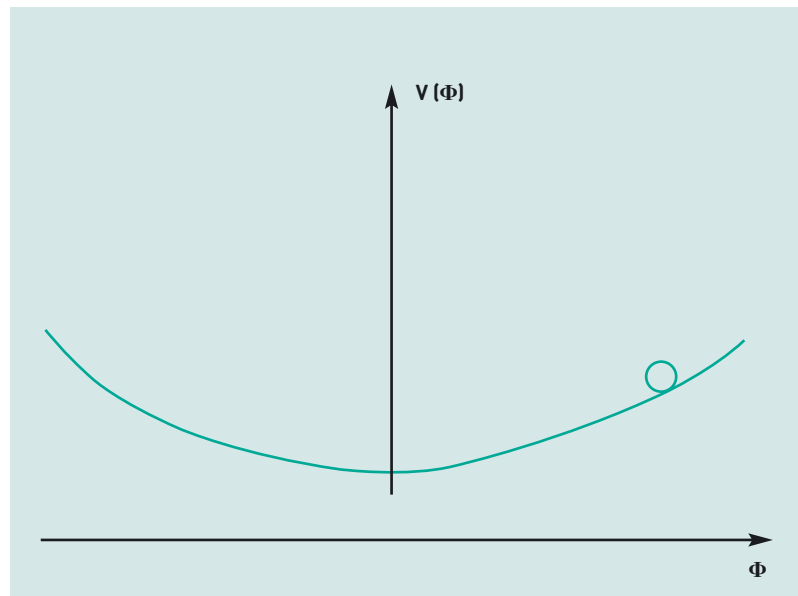


Figure 2. La dynamique des champs scalaires qui pourraient être responsables de l'accélération s'apparente au mouvement d'une bille roulant le long d'une pente et soumis à un frottement. Après avoir dévalé la pente, la bille se stabilise au minimum potentiel. Si l'énergie est positive, celle-ci sert de réservoir d'énergie pour l'accélération.

la théorie. Or le **théorème d'Ostrogradski** stipule que cela conduit à des théories non physiques, par exemple : le vide est instable. Une seule famille de théories échappe à ce résultat, mais elle généralise des modèles de quintessence et souffre des mêmes défauts.

Une autre éventualité a été encore explorée, celle de la « violation » du principe cosmologique. Si la mesure du rayonnement de fond cosmique prouve que l'Univers est isotrope, l'homogénéité du cosmos reste hypothétique. L'accélération du mouvement des **supernovae** pourrait découler de certaines inhomogénéités locales. Pire, le principe de Copernic, qui sous-tend l'hypothèse d'homogénéité et stipule que

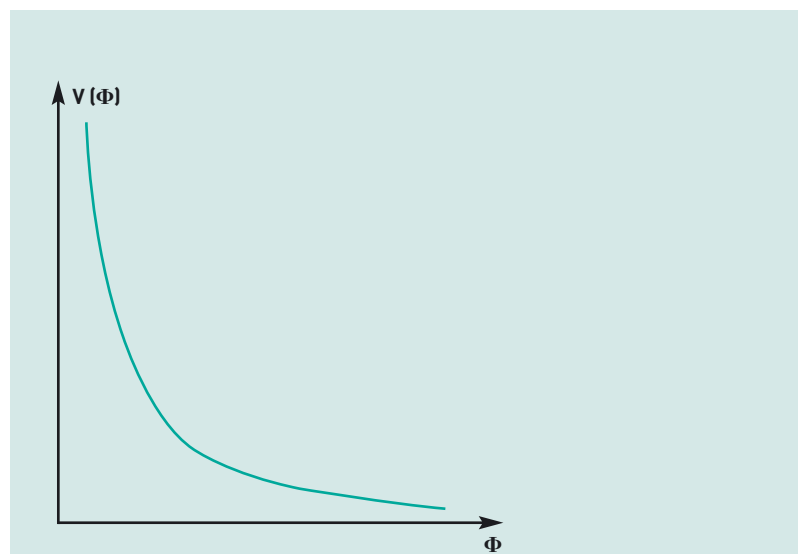


Figure 3. Si le potentiel n'a pas de minimum, le champ scalaire roule le long de la pente avant de se stabiliser. L'énergie potentielle résiduelle conduit à l'accélération de l'Univers. L'énergie potentielle de l'énergie noire se représente par $V(\Phi)$ alors qu'en abscisse nous avons la valeur du champ d'énergie noire Φ .



la terre n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, serait lui aussi remis en cause : autant refonder toute la cosmologie à partir des espaces de Tolman-Bondi⁽³⁾ (et non plus de Friedmann-Lemaître⁽⁴⁾) dont la principale caractéristique est d'avoir une courbure variant spatialement autour d'un centre qui occupe une position particulière dans l'Univers. Il s'agit de scénarios qui ne sont pas encore

complètement exploités et demeurent parcellaires. Au final, il existe une autre hypothèse sous-jacente dans l'interprétation de l'accélération de l'Univers. Elle se base sur les quatre dimensions de l'espace-temps. D'abord, dès les années 1920, Kaluza et Klein ont introduit une cinquième dimension et ainsi tenté d'unifier la relativité générale et l'électromagnétisme. Plus tard, la théorie des cordes a introduit, à son tour, dix ou onze dimensions suscitant deux types de modèles. Le premier d'entre eux suppose que notre Univers figure le bord (appelé **brane**) d'un espace à cinq dimensions. Si cette hypothèse se trouvait avérée, alors l'énorme énergie du vide, due aux fluctuations quantiques sur la brane, aurait pour effet de courber la cinquième dimension en laissant une infime trace qui conduirait à l'accélération de l'Univers. Très prometteur, ce

(3) Richard Tolman (1881-1948), physico-chimiste et cosmologiste américain qui fut le premier à s'intéresser aux perturbations cosmologiques.

Herman Bondi (1919-2005), mathématicien autrichien connu pour avoir développé la théorie équilibrée de l'Univers.

(4) Alexandre Friedman (1888-1925), physicien et mathématicien russe, et Georges Lemaître (1897-1960), astrophysicien belge, sont deux des pères de la théorie de l'expansion de l'Univers.

Asymétrie matière-antimatière de l'Univers

Étoiles, galaxies, amas... Toutes les structures observées se composent de **baryons** (protons et neutrons) et d'électrons, c'est-à-dire de matière, sans présence significative d'**antimatière**. Cette asymétrie matière/antimatière se mesure par le rapport de la densité de baryons à la densité de **photons**, $\eta \equiv n_B/n_\gamma = (6,21 \pm 0,16) \cdot 10^{-10}$, qui décrit l'**asymétrie baryonique** de l'Univers. On la détermine par deux méthodes indépendantes. La première repose sur la mesure des abondances des éléments légers D, ³He, ⁴He et ⁷Li qui sont prédites en fonction du paramètre η par la nucléosynthèse. Le fait qu'il existe un même intervalle de valeurs de η compatible avec les abondances de ces quatre éléments ($\eta = (4,7 - 6,5) \cdot 10^{-10}$) demeure l'un des grands succès de la théorie du big bang. La deuxième mesure de η , plus précise, est extraite des **anisotropies** du **rayonnement cosmique** de fond, et correspond à la valeur donnée plus haut. La remarquable concordance de ces deux mesures représente un autre grand succès de la théorie du big bang (figure 1).

Petit en apparence, le paramètre η s'avère, en réalité, très grand. Pour le comprendre, supposons, dans un premier temps, que l'Univers contienne initialement le même nombre de baryons et d'antibaryons. Dans ce cas, leur annihilation mutuelle conduirait à $n_B/n_\gamma \sim 10^{-19}$, bien en dessous de l'asymétrie baryonique observée. Cette dernière pourrait-elle alors s'expliquer par un excès de baryons sur les antibaryons au

moment du big bang ? Cette hypothèse se heurte à deux objections. Premièrement, il faudrait ajuster finement (à 10^{-9} près) les densités initiales de baryons et d'antibaryons. Ensuite, il faudrait supposer que l'Univers n'a pas connu de phase d'inflation, contrairement à ce que suggèrent les observations (l'inflation a pour effet d'effacer toute mémoire des conditions initiales). Or, si l'asymétrie baryonique n'est pas due aux conditions initiales, elle doit avoir été créée dynamiquement au cours de l'histoire de l'Univers : c'est ce que l'on nomme la **baryogenèse**. En 1967, Andreï Sakharov⁽¹⁾ montrait que trois conditions devaient être réunies pour qu'elle puisse avoir lieu :

- l'existence de processus ne conservant pas le nombre total de baryons ;
- à l'équilibre thermique, les processus créant des baryons se produisent au même taux que les processus inverses qui détruisent la symétrie créée par les premiers : il faut donc un écart à l'équilibre thermique ;
- à tout processus créant des baryons est associé, par ce que les physiciens des particules appellent « conjugaison de charge » (C) et « conjugaison de charge-parité » (CP), un processus « miroir » créant des antibaryons ; pour qu'une asymétrie baryonique subsiste, ces deux processus doivent avoir des taux différents, ce qui nécessite une violation de C et de CP au niveau des interactions entre les particules.

Fait remarquable, les conditions énoncées par Andreï Sakharov se trouvent satisfaites dans le **Modèle standard** de la physique des particules. En effet, certains processus connus sous le nom de sphalérons ne

conservent pas le nombre de baryons ; les symétries C et CP sont violées par les interactions responsables de la désintégration bêta ; l'écart à l'équilibre thermique survient lors de ce que l'on appelle la « transition de phase électrofaible », c'est-à-dire la période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les particules acquièrent leur masse. Le scénario de baryogenèse correspondant, connu sous le nom de « baryogenèse électrofaible », échoue néanmoins à engendrer le niveau d'asymétrie baryonique observé, la violation de CP et l'écart à l'équilibre thermique étant trop faibles. Il faut alors recourir à une nouvelle physique au-delà du Modèle standard qui fait, par ailleurs, l'objet d'actives recherches dans les collisionneurs.

Actuellement, les théoriciens étudient deux classes de scénarios. Dans la première, la nouvelle physique affecte la transition de phase électrofaible et permet ainsi d'obtenir l'écart nécessaire à l'équilibre thermique. Dans la seconde, l'asymétrie baryonique est créée avant la transition électrofaible. Par exemple, dans le scénario de **leptogenèse**, la désintégration des neutrinos lourds (par ailleurs impliqués dans la génération des masses des **neutrinos** du Modèle standard) engendre une asymétrie leptonique qui est ensuite partiellement convertie en asymétrie baryonique par les sphalérons.

> **Stéphane Lavignac**

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

(1) Andreï Sakharov (1921-1989), physicien nucléaire russe et militant des droits de l'Homme, prix Nobel de la paix en 1975.

scénario se heurte néanmoins à la présence de singularités de l'espace-temps. Le deuxième modèle présenté envisage que la gravité se propage à la fois sur la brane et dans la cinquième dimension. Elle s'en trouverait alors modifiée à longue distance. Comme dans les théories à quatre dimensions, ce modèle souffre d'une instabilité du vide. La construction de théories incluant des dimensions supplémentaires n'a donc pu encore fournir la clé de l'accélération de l'Univers.

Ce recensement des explications de l'accélération de l'Univers atteste de la difficulté que présente l'élaboration d'une théorie physique de ce phénomène. Néanmoins, de la confrontation de ces différentes hypothèses en présence, pourraient bien jaillir de grandes avancées dans la compréhension des liens entre cosmologie, gravitation et physique

des particules. Mais à ce jour, le mystère de l'accélération de l'Univers reste entier. Le problème de l'accélération de l'Univers est étudié à l'Institut de physique théorique situé sur le centre du CEA à Saclay. Son lien avec les théories de particules, la théorie des cordes et la gravité y est analysé. La présence, à Saclay, d'équipes de physiciens des particules et d'astrophysiciens engagés dans des programmes expérimentaux sur l'accélération de l'Univers représente un atout. Ceci permet un dialogue régulier entre expérimentateurs et théoriciens.

> **Philippe Brax**

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

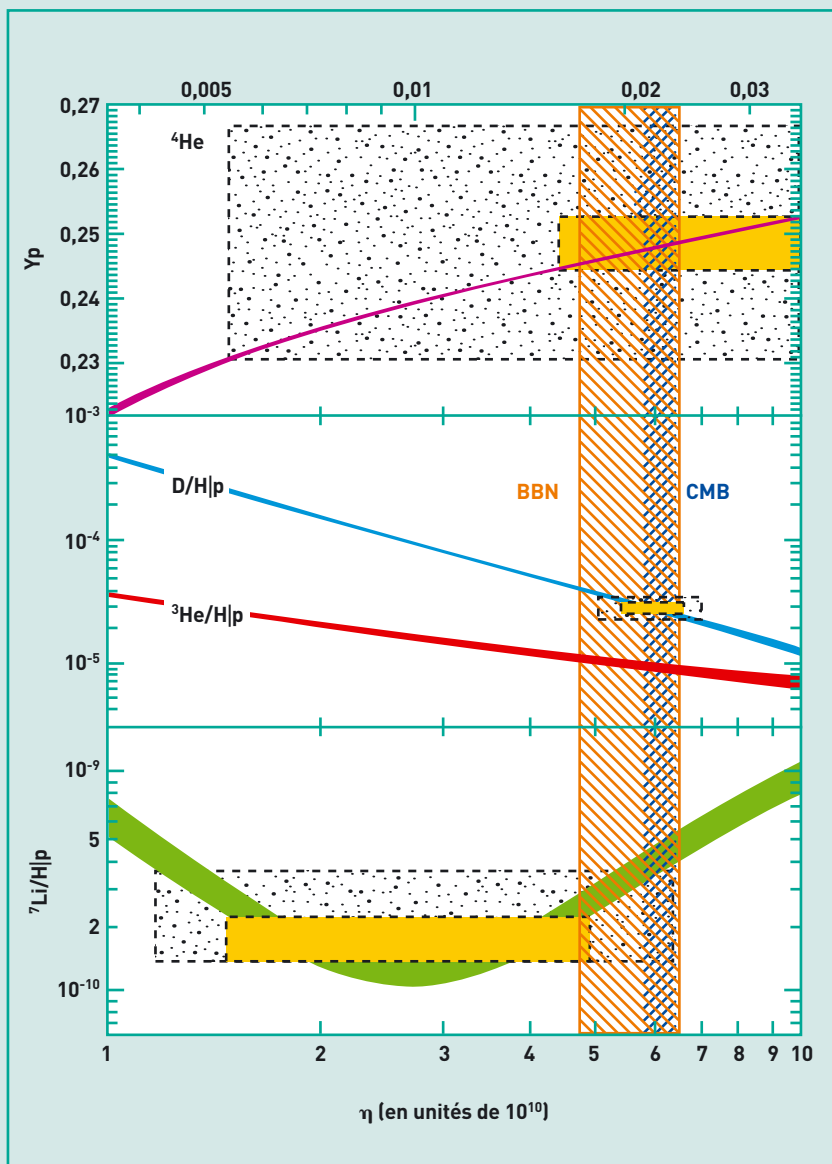


Figure 1. Abondances des éléments légers ${}^4\text{He}$ (conventionnellement notées Y_p), D , ${}^3\text{He}$ et ${}^7\text{Li}$ prédites par la nucléosynthèse dans le cadre de la théorie du big bang (BBN en anglais), en fonction du paramètre η en unités de 10^{10} . Les rectangles horizontaux indiquent les abondances observées avec leurs incertitudes expérimentales (petits rectangles : erreur statistique; grands rectangles : erreurs statistiques et systématiques). Les bandes verticales correspondent à la valeur de η tirée des abondances observées (hachures oranges) et des anisotropies du rayonnement cosmique de fond (CMB en anglais; hachures bleues).