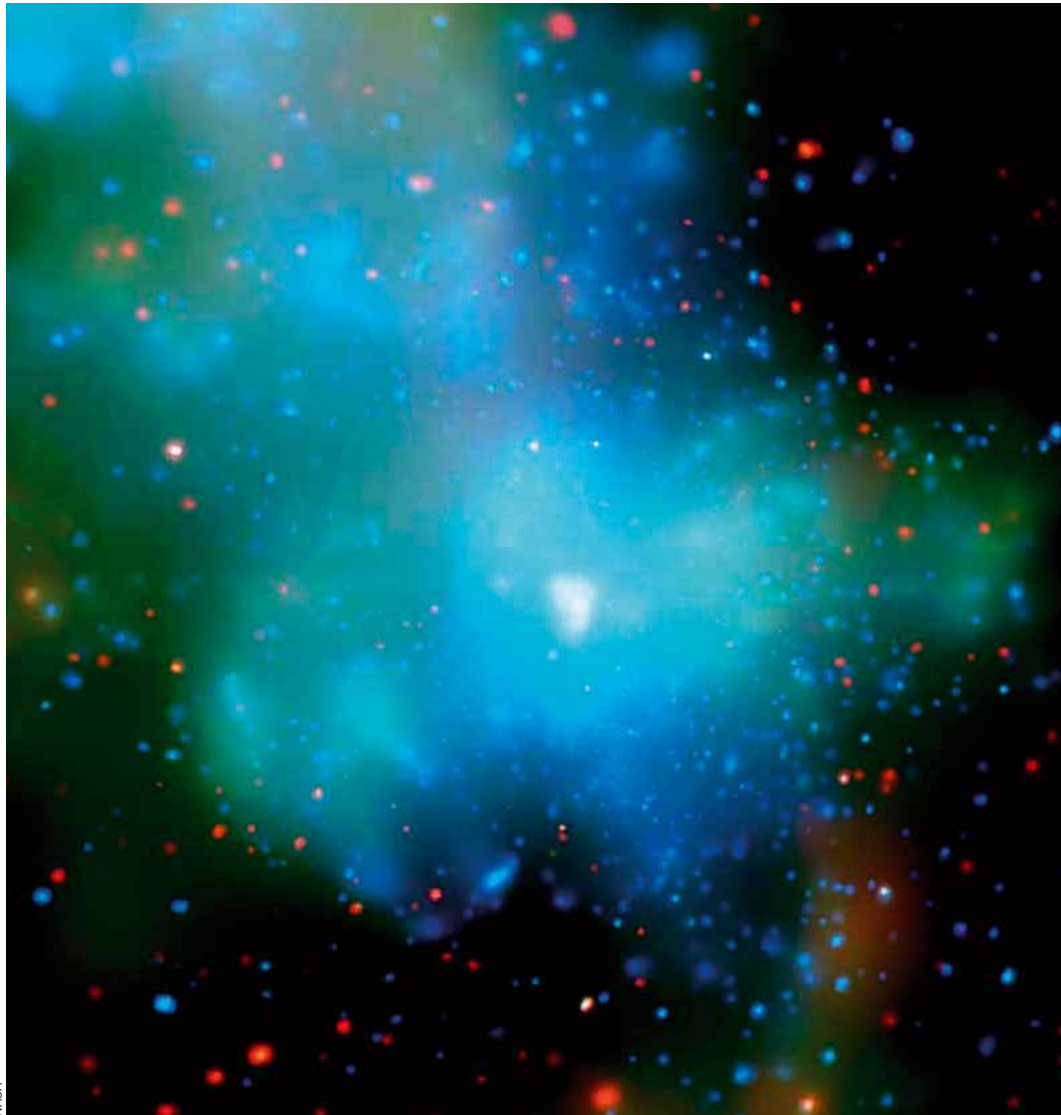


Théories de l'énergie noire

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.

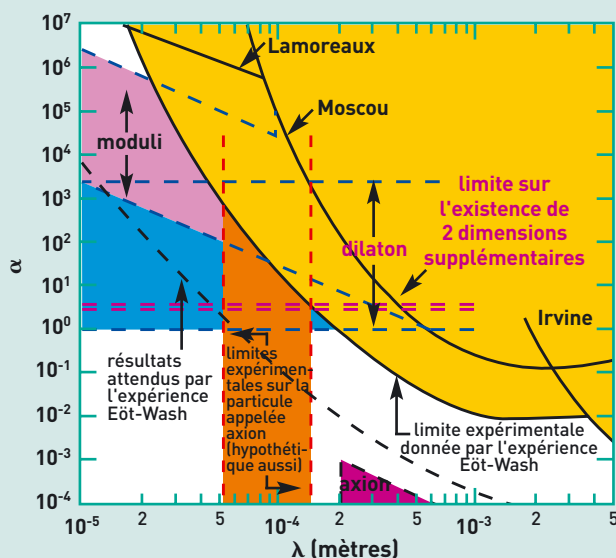


L'Univers est composé de matière lumineuse formant les étoiles et les galaxies. Il existe aussi un fond de matière dite noire car non lumineuse dont le halo entoure chaque galaxie. Enfin il semble qu'il existe un troisième type de matière qui conduirait à l'accélération de l'Univers. Cette énergie noire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



collaboration EotWash de Seattle

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 de « 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

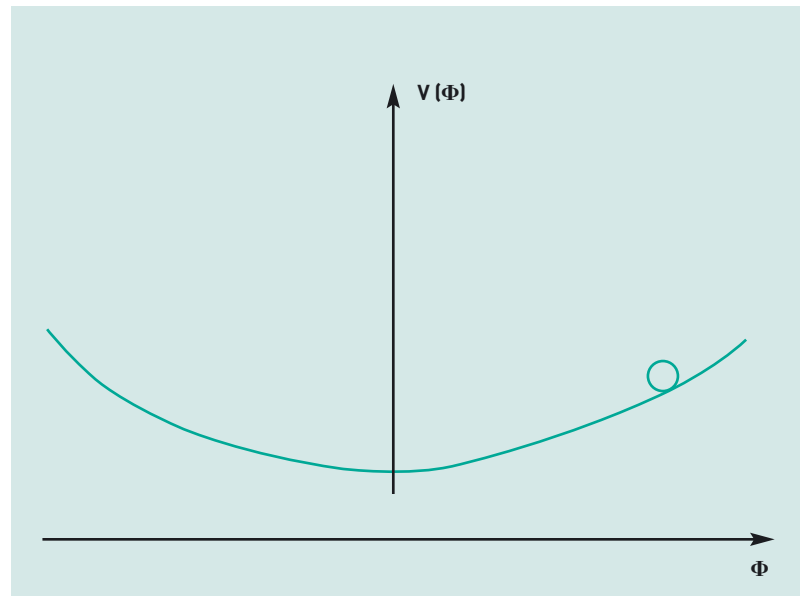


Figure 2. La dynamique des champs scalaires qui pourraient être responsables de l'accélération s'apparente au mouvement d'une bille roulant le long d'une pente et soumis à un frottement. Après avoir dévalé la pente, la bille se stabilise au minimum potentiel. Si l'énergie est positive, celle-ci sert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

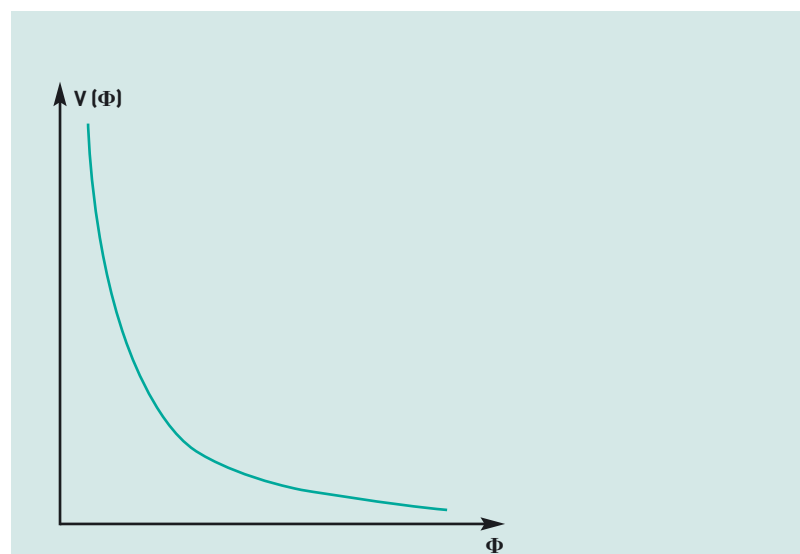


Figure 3. Si le potentiel n'a pas de minimum, le champ scalaire roule le long de la pente avant de se stabiliser. L'énergie potentielle résiduelle conduit à l'accélération de l'Univers. L'énergie potentielle de l'énergie noire se représente par $V(\Phi)$ alors qu'en abscisse nous avons la valeur du champ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

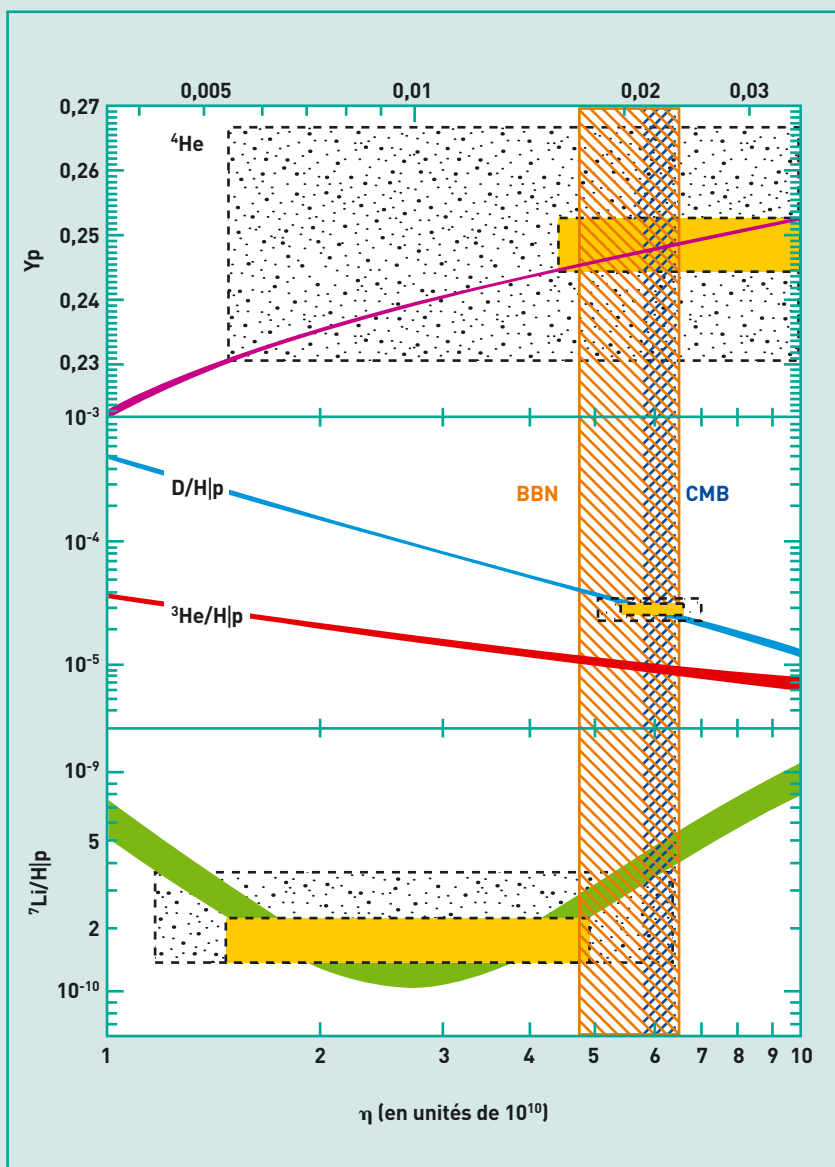


Figure 1. Abondances des éléments légers ${}^4\text{He}$ (conventionnellement notées Y_p), D , ${}^3\text{He}$ et ${}^7\text{Li}$ prédites par la nucléosynthèse dans le cadre de la théorie du big bang (BBN en anglais), en fonction du paramètre η en unités de 10^{10} . Les rectangles horizontaux indiquent les abondances observées avec leurs incertitudes expérimentales (petits rectangles : erreur statistique; grands rectangles : erreurs statistique et systématique). 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).