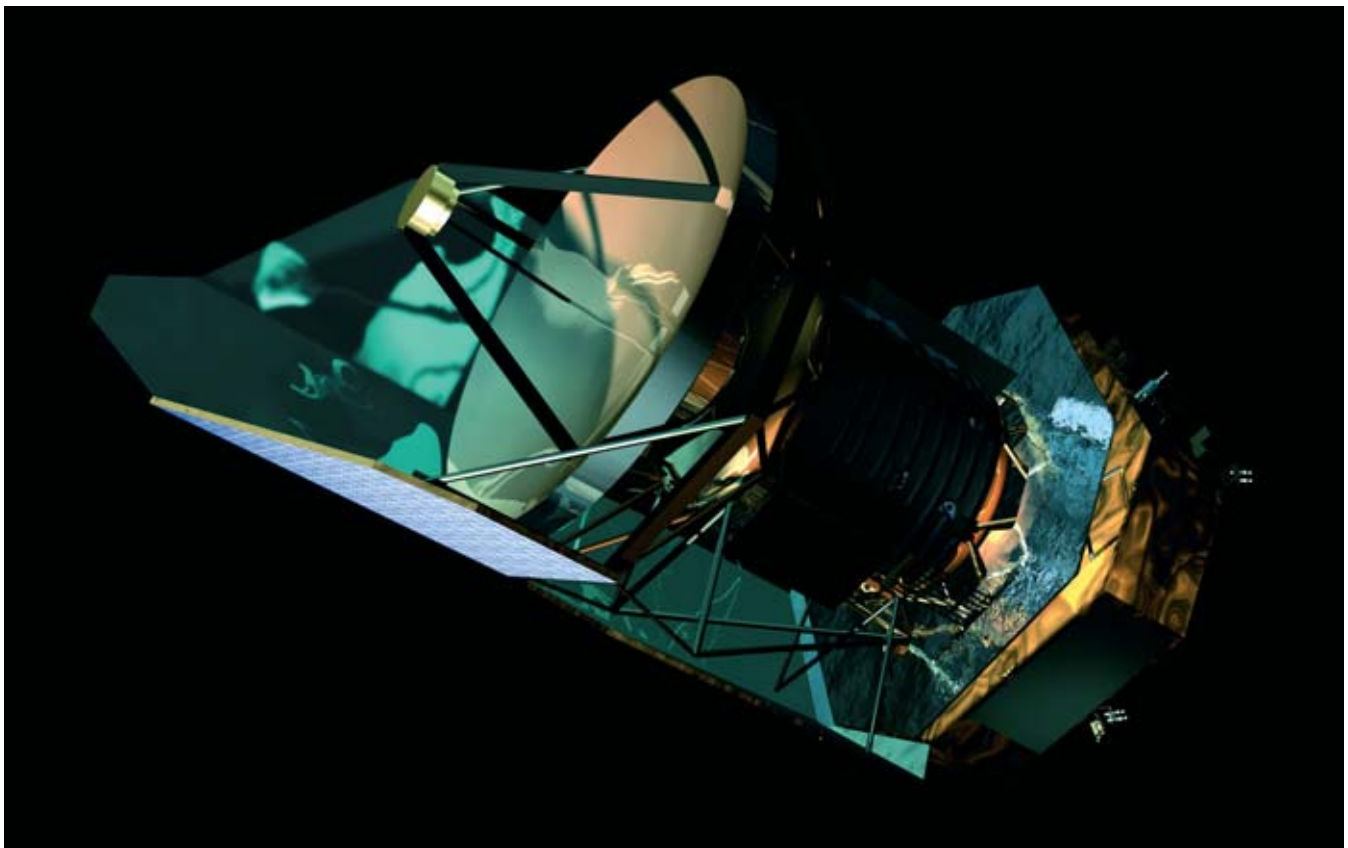


Infrarouge, X et gamma : des lumières invisibles pour sonder l'Univers

À l'échelle de l'Univers, voir de plus en plus loin, c'est remonter le temps en se rapprochant du plus en plus du Big Bang, du moins jusqu'à l'époque où le plasma originel est devenu transparent aux rayonnements. Dans deux grandes parties du spectre électromagnétique, l'infrarouge d'une part, les rayons X et gamma de l'autre, les progrès de la détection spatiale permettent, par des mesures de plus en plus fines, d'accéder à des informations majeures sur les premières étoiles et galaxies.



ESA

Aujourd'hui, il est couramment admis que notre Univers trouve son origine dans le "Big Bang", un événement assimilable à une formidable explosion survenue voici un peu plus de treize milliards d'années (voir encadré A, *Le modèle standard cosmologique*). À son début, l'Univers n'est qu'un plasma très dense et très chaud où la lumière est continuellement absorbée et réémise par les électrons libres, ce qui en fait un milieu opaque à son propre rayonnement. Peu à peu, sous l'effet de l'expansion, l'Univers se dilue et se refroidit au point que trois cents mille ans après l'explosion originelle, électrons et protons se combinent pour former les premiers atomes. Il devient alors neutre et transparent.

À la recherche des premières sources lumineuses de l'Univers

Cette transition, la *recombinaison*, s'accompagne de l'émission d'un rayonnement intense, ultraviolet à l'origine, mais détectable aujourd'hui dans le domaine des ondes radio ultracourtes et connu sous le nom de bruit de fond cosmologique micro-onde. Après la recombinaison, plus aucune source de lumière n'éclaire l'Univers; les âges sombres commencent. C'est au cours de cette période qu'il passe d'un état d'extrême uniformité, révélé par l'étude du fond cosmologique micro-onde – les écarts d'homogénéité n'excèdent pas un pour cent mille – à un état proche

Vue d'artiste du satellite européen Herschel, du nom de Sir William Herschel, qui a découvert la lumière infrarouge en 1801. Il doit être lancé en 2007 par une fusée Ariane 5.

de celui d'aujourd'hui, où l'Univers est fractionné en amas d'étoiles, les **galaxies**. Les âges sombres s'achèvent quand s'allument les premiers luminaires cosmiques, dont le rayonnement contribue à **ioniser** à nouveau l'Univers. D'après les études les plus récentes du fond cosmique micro-onde, cette ré-ionisation se produit à peine deux cents millions d'années après le début de l'expansion (figure 1).

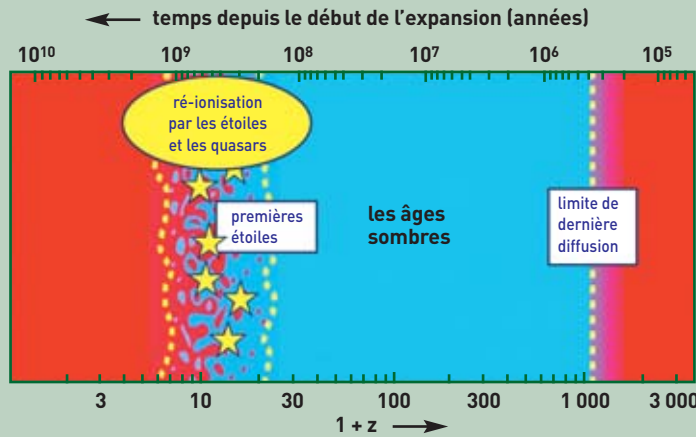


Figure 1. Représentation schématique de l'évolution de l'Univers. Sur l'axe des abscisses, z représente la vitesse de fuite des galaxies et traduit donc leur éloignement, c'est-à-dire l'époque à laquelle la lumière qui parvient aujourd'hui à l'observateur terrestre a été émise.

L'extrême rapidité de cette évolution n'est pas sans étonner les astrophysiciens, qui s'efforcent d'en comprendre les mécanismes en tentant d'observer ces premières sources lumineuses. C'est un colossal défi, car ces objets se trouvent aux confins de l'Univers, à plus d'une dizaine de milliards d'années de lumière. Seule une infime "pincée" de leur éclat atteint nos télescopes, même s'il s'agit de la lumière cumulée de milliards d'étoiles au sein d'une galaxie. De plus, en raison du décalage vers le rouge qu'implique l'expansion de l'Univers, la lumière de ces premiers luminaires doit impérativement être recherchée dans l'**infrarouge**. Depuis quelques années en effet, avec en particulier la découverte d'un bruit de fond cosmologique infrarouge, il est apparu que les galaxies primordiales (celles qui n'ont pas encore produit la majorité de leurs étoiles) rayonnaient la plus grande partie de leur

lumière dans l'infrarouge. Le rayonnement ultraviolet des étoiles massives est absorbé par les nuages de poussière interstellaire dans lesquels elles sont nées, et c'est la poussière ainsi chauffée qui rayonne cette énergie dans l'infrarouge.

C'est aussi dans l'infrarouge que les astronomes recherchent une signature de ces premières galaxies, à savoir le rayonnement que produisent les poussières qui parsèment les nuages interstellaires, poussières que chauffent les étoiles massives qui y sont enfouies. Le défi suprême serait bien sûr de capter la lumière d'une de ces premières étoiles, mais encore faudrait-il que son éclat s'accroisse dans des proportions considérables. Une telle éventualité est parfaitement envisageable, pour peu que l'étoile en question soit une étoile massive et que son évolution la conduise à produire une formidable bouffée de rayonnement à haute énergie, un *sursaut gamma*. C'est alors dans le domaine des **rayons gamma** qu'il faut se mettre en quête des premières étoiles de l'Univers.

Sonder les confins de l'Univers observable pour découvrir les galaxies primitives dans l'infrarouge et les premières étoiles dans le domaine gamma est précisément l'un des objectifs majeurs du Service d'astrophysique (SAp) du CEA⁽¹⁾. Les lignes qui suivent donnent un aperçu de la manière dont ces recherches sont menées.

À la recherche des premières galaxies dans l'infrarouge

Les galaxies proches sont aussi les plus vieilles. Comme la Voie lactée, notre galaxie, elles sont principalement constituées d'étoiles de petites masses, en moyenne légèrement moins massives que le Soleil (de l'ordre de 80 %) et plus âgées que lui. Ces étoiles sont dites froides, car elles rayonnent principalement dans l'**infrarouge proche**, une couleur de la lumière associée à une longueur d'onde proche du **micromètre**. Mais lorsque l'on part à la recherche des galaxies primordiales, celles qui sont encore toutes jeunes et commencent seulement à former leurs premières étoiles, il faut s'attendre à leur trouver une tout autre apparence : lorsque du gaz est transformé en étoiles, moins de 20 % de ce gaz est converti en étoiles dix fois plus massives que le soleil, mais celles-ci produisent plus de 80 % de la lumière de la galaxie. Les étoiles massives sont si efficaces à convertir dans leurs cœurs l'hydrogène en hélium qu'elles ne vivent pas plus de quelques dizaines de millions d'années. Il en résulte qu'elles explosent sous la forme de **supernovae** dans les nuages condensés qui leur ont donné naissance et leur lumière, principalement ultraviolette, est en majorité absorbée par ce milieu poussiéreux opaque aux ultraviolets.

Comment peut-on espérer détecter la formation de ces étoiles si elles sont si bien cachées ? La poussière interstellaire qui masque ces étoiles est elle-même chauffée par leur lumière ultraviolette à des températures de quelques dizaines de **kelvins** (soit de l'ordre de - 230 °C !). À ces températures, tout corps rayonne de la lumière dans le domaine **infrarouge moyen et lointain**, c'est-à-dire à des longueurs d'ondes de plusieurs dizaines de micromètres. Comme les grains de poussière eux-mêmes sont de taille inférieure au micromètre, cette lumière n'est pas affectée par eux et tra-

(1) Le SAp fait partie du Dapnia, laboratoire de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA.

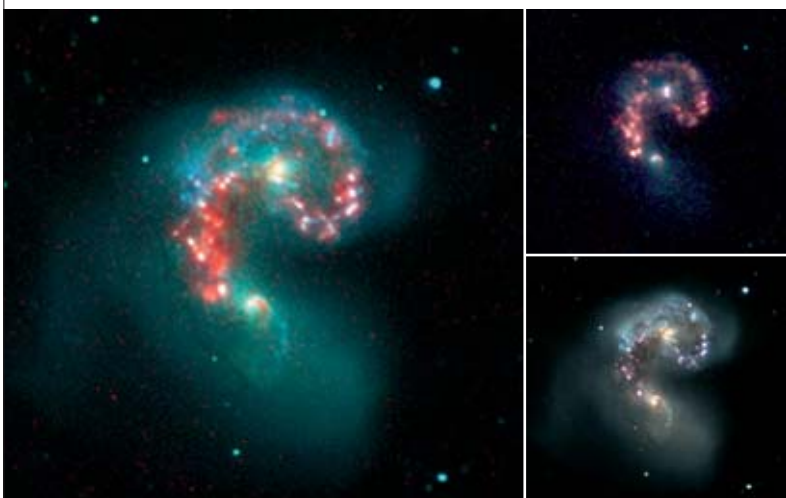


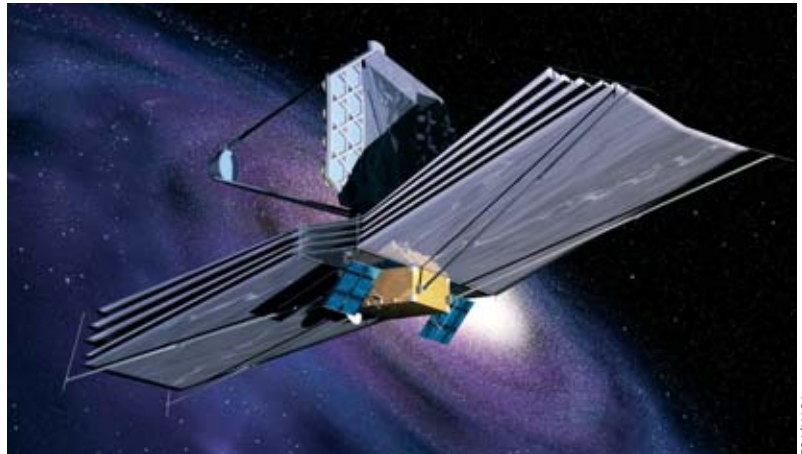
Image composite en visible (bleu) et infrarouge moyen (rouge) de la galaxie des Antennes vue par le satellite Spitzer, successeur américain du satellite européen ISO. Elle montre un système de deux galaxies en collision sur le point de fusionner. La violence de l'impact provoque des flambées de formation d'étoiles visibles uniquement en infrarouge moyen et lointain (en rouge sur l'image) en dehors du centre des deux galaxies (en blanc). En médaillon, l'image en infrarouge de la caméra IRAC du satellite (en haut à droite) et l'image dans le domaine visible (en bas ; crédit : M. Rushing/NOAO).

NASA/JPL-Caltech/Z. Wang (Harvard-Smithsonian CfA)

verse sans difficulté les nuages denses où naissent les étoiles. En mesurant la lumière en infrarouge lointain (ou moyen) des galaxies, il est donc possible de dévoiler la face cachée de la formation d'étoiles dans les galaxies lointaines et jeunes. Paradoxalement, les extrêmes se rencontrent puisqu'il faut observer le rayonnement froid de la poussière interstellaire pour découvrir les régions les plus chaudes de l'Univers où les étoiles naissent par flambées...

Mais la réalité est toujours un peu plus complexe : l'atmosphère terrestre est elle-même une source de lumière infrarouge et pour réaliser cette traque des étoiles cachées, il faut utiliser des engins spatiaux dont les instruments sont refroidis afin de leur éviter l'éblouissement par leur propre rayonnement thermique.

Il y a maintenant plus de dix ans que la caméra Isocam, développée sous la maîtrise d'œuvre du CEA a été lancée sur le satellite ISO (*Infrared Space Observatory*). En trois ans et demi de vie, elle a bouleversé notre compréhension de l'histoire de la formation d'étoiles dans l'Univers. Alors que son précurseur américano-hollando-britannique IRAS n'avait détecté que quelques cas rares de galaxies presque totalement "infrarouges" (lointain), Isocam a dévoilé une profusion de galaxies dite "lumineuses dans l'infrarouge", ou LIRGs selon l'acronyme anglais (*Luminous InfraRed Galaxies*), formant leurs étoiles à des taux cinquante fois supérieurs à celui de la Voie lactée. Les astrophysiciens pensent aujourd'hui que la majorité des étoiles que nous pouvons observer aujourd'hui dans l'Univers proche sont nées lors de flambées de formation d'étoiles pendant



ESA/NASA

lesquelles les galaxies rayonnaient la majorité de leur lumière dans l'infrarouge lointain.

Mais Isocam n'a permis de percer à jour que les derniers 60 % de l'histoire de l'Univers et une nouvelle étape sera bientôt franchie avec la mission Herschel de l'Agence spatiale européenne (Esa) dans laquelle le CEA joue un rôle central, apportant notamment les matrices de bolomètres qui équiperont l'instrument PACS du satellite (voir *Détecteurs: nouvelles technologies et nouveaux marchés*). Nous pourrions accéder à plus de 80 % de l'âge de l'Univers et enfin partir à la recherche des premières phases de flambées de formation d'étoiles. Le **modèle standard** prévoit que ces galaxies étaient plutôt petites et que les galaxies mas-

Le James Webb Space Telescope (JWST), qui doit succéder au Hubble Space Telescope (HST), comporte un télescope de 6,5 m travaillant dans l'infrarouge. Le CEA participe à la réalisation de Miri, un des trois principaux instruments de ce satellite qu'une Ariane 5 doit lancer en 2013. Comprenant une caméra et un spectromètre fonctionnant dans l'infrarouge moyen (5-27 microns), Miri comblera les avantages de sensibilité du satellite Isocam et de résolution angulaire de l'installation au sol Visir.

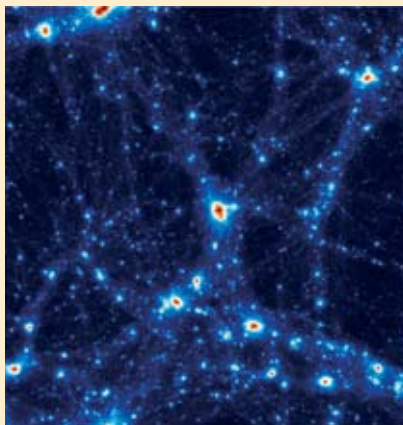
A Le modèle standard cosmologique

Le **modèle standard cosmologique**, représentation actuellement admise de l'Univers, est fondé sur une théorie de la **gravitation**, la **relativité générale** d'Einstein. Ce modèle prend en compte une expansion de l'Univers mise en évidence par les observations de l'astronome Hubble selon lesquelles les **galaxies** s'éloignent les unes des autres d'autant plus rapidement que la distance s'accroît.

Les hypothèses de base du modèle sont que l'Univers est *homogène*, c'est-à-dire qu'il présente partout les mêmes propriétés (à l'échelle cosmologique, s'entend) et qu'il est *isotrope*, c'est-à-dire qu'il se présente de la même façon quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe.

Trois paramètres caractérisent l'évolution de l'univers dans ce modèle : la **constante de Hubble** d'abord, qui caractérise son taux d'expansion, la **densité de masse** (rapport entre sa densité et une *densité critique*) et la **constante cosmologique**. Introduite par Einstein sous la forme d'une force s'opposant à la gravitation afin de tenter de rendre compte d'un univers stable, cette constante correspondrait plutôt à la manifestation de l'*énergie sombre* dans un univers en expansion ⁽¹⁾.

Si la densité de masse est inférieure ou égale à 1, cette expansion se poursuit indéfiniment. Les dernières observations plaident pour une densité de matière égale à 1, ce qui implique un univers "plat" (où la



D. Aubert/CEA-C. Pichon (IAP)

Simulation numérique d'un univers en formation réalisée dans le cadre du projet Horizon, qui fédère les activités en simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies des équipes françaises, dont celle du Dapnia (CEA). Son but est de comprendre les mécanismes physiques à l'origine de la structure et de la distribution des galaxies qui nous entourent, et notamment la nôtre, la Voie Lactée.

somme des angles d'un triangle est exactement égale à 180°).

Le modèle théorique standard de la cosmologie en vigueur table sur un univers observable dont le rayon serait de quelque 45 milliards d'années de lumière et âgé d'environ 13,7 milliards d'années à compter d'une "singularité" (explosion originelle) initiale dénommée **Big Bang**, suivie environ 300 000 ans après par un découplage de la matière et du rayonnement puis par une phase d'**inflation**.

Le modèle permet d'autre part de rendre compte du **bruit de fond cosmologique** (rayonnement diffus) d'une température de 2,7 K et des fluctuations de rayonnement/densité ayant conduit très tôt à la formation des premières structures "germes" des galaxies.

(1) L'interprétation des mesures de la sonde spatiale WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) et de SDSS (Sloan Digital Sky Survey) conduit à une valeur proche de 71 (km/sec)/Mpc +/- 0,03 pour la constante de Hubble, mais des surprises sur la valeur de ce paramètre restent possibles si la surprenante composition de l'Univers, où 95 % de l'Univers est constitué de matière et d'énergie noires, n'est en fait pas correcte.

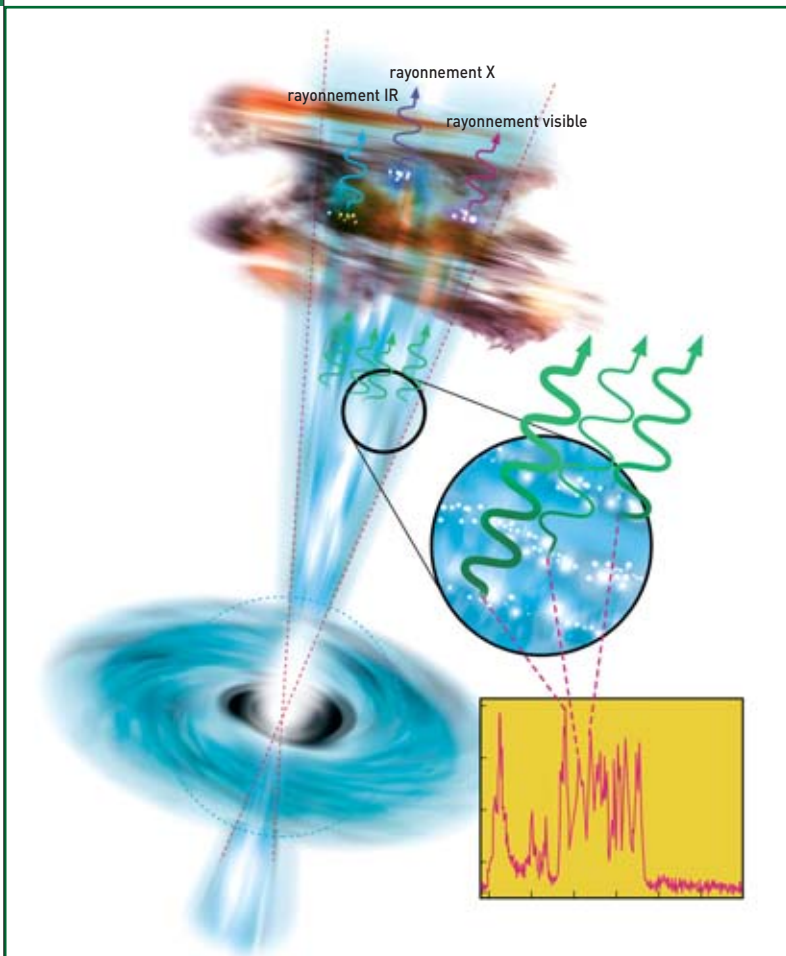


Figure 2. Représentation schématique du modèle standard des sursauts gamma.

sives que nous connaissons aujourd'hui sont nées au cours de fusions successives des plus petites. Si, contrairement à ce modèle, Herschel fournit des indices suggérant la présence de galaxies massives formant de grandes quantités d'étoiles aux premières époques de l'Univers, alors le modèle sera à revoir...

Une autre mission spatiale, à laquelle participe le CEA, permettra de tester le rôle des fusions de galaxies, celle du JWST ou James Webb Space Telescope, qui doit venir remplacer le télescope spatial Hubble (HST) en 2013. Grâce au JWST, il sera possible de "peser" les galaxies les plus distantes en mesurant la luminosité de leurs étoiles de petites masses, celles qui rayonnent autour de 1 micromètre, dans l'infrarouge proche. Il sera alors possible de comparer l'histoire de la formation d'étoiles, mesurée dans l'infrarouge lointain, à celle de la croissance en masse des galaxies, mesurée en infrarouge proche et ainsi cerner par les deux extrêmes (petites étoiles qui dominent la masse et grandes étoiles qui dominent la lumière) l'histoire des galaxies depuis leurs premiers âges.

Il restera cependant une autre difficulté à surmonter : s'assurer que la lumière mesurée provient bien d'étoiles massives et non d'un autre phénomène physique... Or il existe justement un autre processus capable de produire une luminosité comparable : les trous noirs (2) supermassifs. À nouveau les extrêmes se rejoignent : un trou noir tient son nom à sa capacité à empêcher la lumière de s'en échapper, mais lorsque de la matière tombe vers lui, attirée par sa force gravitationnelle, elle chauffe et produit un rayonnement suffisamment loin du trou pour s'en échapper. Le trou noir étant entouré

par un tore de gaz et poussière interstellaire, celui-ci produit le même effet que sur les étoiles massives : il absorbe le rayonnement, chauffe et rayonne à son tour dans l'infrarouge. Il est donc crucial de combiner les observations aux deux extrêmes du spectre électromagnétique : d'un côté l'infrarouge lointain pour la poussière froide, de l'autre le rayonnement X pour l'émission due au "noyau actif", la région qui rayonne autour du trou noir. Il faudra pour cela réaliser des observations dans le domaine du rayonnement **Xdur**, ce qui sera l'objectif de la mission spatiale Simbol-X, dont le SAP est maître d'œuvre.

À la recherche des premières étoiles avec les sursauts gamma

Le Big Bang mis à part, les sursauts gamma sont les phénomènes explosifs les plus énergétiques de l'Univers : 10^{44} joules rayonnés dans cette gamme de rayonnement. Ils sont aussi uniques par les processus physiques qu'ils mettent en jeu. Il est désormais admis que la grande majorité des sursauts gamma, ceux dont la durée est supérieure à 1-2 s, signent la fin de l'évolution de certaines des étoiles dont la masse dépasse quelques dizaines de masses solaires. Quelques millions d'années à peine après la formation de tels astres massifs, leur cœur s'effondre en un trou noir. Encore nimbé des débris de l'étoile, ce trou noir en rotation rapide produit alors un système bipolaire de deux jets de matière accélérée à des vitesses ultrarelativistes (3). Il s'ensuit deux types d'émission, tous deux comptant parmi les sources les plus lumineuses de l'Univers. L'émission *prompte* – le sursaut gamma proprement dit – rayonnée pour l'essentiel dans le domaine des rayons gamma de basse énergie, signe la dissipation de chocs relativistes au sein même des jets. L'émission *rémanente*, dont l'éclat décroît exponentiellement après le sursaut, est produite par l'interaction des écoulements ultrarelativistes avec les milieux circumstellaires et interstellaires alentour (figure 2).

En raison de leur extrême luminosité, les sursauts gamma sont observables à de très grandes distances. Le sursaut le plus lointain jamais repéré à ce jour, GRB 050904 (4), se situe à plus de douze milliards d'années de lumière. L'étoile à l'origine de cet événement s'est donc formée alors que l'Univers n'était vieux que de neuf cents millions d'années, juste à la fin de la période de ré-ionisation. En dépit d'une telle distance, l'éclat de GRB 050904 était encore si intense huit minutes après sa détection qu'il fut repéré dans le proche infrarouge par un modeste télescope de 20 cm de diamètre ! Il ne fait donc pas de doute qu'avec les sursauts gamma, il est envisageable d'étudier les premières étoiles de l'Univers. Encore faut-il que les

(2) Trou noir : singularité de l'Univers où les "parallèles" de l'espace-temps se rejoignent au sein d'un astre si dense et si compact qu'il retient tout, y compris la lumière.

Rien ne caractérise mieux un trou noir que son horizon, frontière séparant notre univers d'une région dont il est causalement déconnecté. Ce qui se passe en deçà de l'horizon d'un trou noir n'exerce aucune influence sur l'extérieur où seul persiste un intense champ de gravitation.

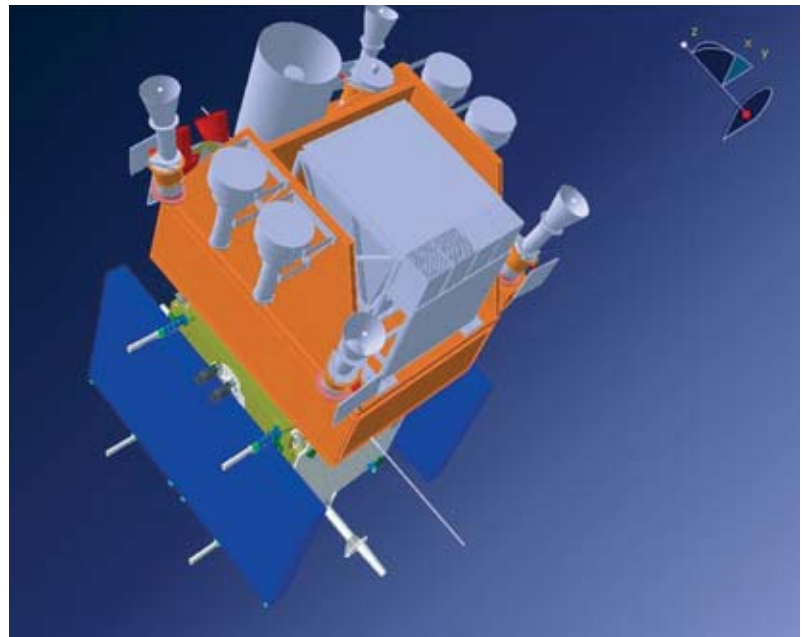
(3) Se dit de phénomènes impliquant des vitesses proches de la célérité de la lumière.

(4) GRB, pour *Gamma-Ray Burst*, littéralement : "sursauts de rayons gamma", suivi de la date de l'événement (année, mois, jours).

astronomes disposent d'un appareil opérant dans le domaine gamma pour détecter l'émission prompte des sursauts et pour en mesurer la direction d'origine, condition nécessaire pour que les grands télescopes puissent étudier l'émission rémanente dans le visible et le proche infrarouge. Mais observer le ciel dans le domaine gamma reste une entreprise des plus ingrates. D'une part, l'atmosphère terrestre constitue un écran opaque à ce type de rayonnement; l'astronomie des rayons gamma doit donc impérativement se pratiquer à bord de satellites artificiels. D'autre part, avec leur longueur d'onde inférieure aux distances qui séparent les atomes, les rayons gamma ne se prêtent pas aux combinaisons de miroirs qui sont à la base des télescopes opérant dans les autres domaines spectraux.

Produire des images sans miroir ni lentille est pourtant possible grâce aux dispositifs à ouverture codée. Dans son principe, une caméra à ouverture codée s'inspire de la chambre noire qu'utilisèrent les premiers photographes. En perçant un trou dans la face avant d'une boîte constituée d'un matériau opaque, et en disposant une plaque sensible sur la face opposée, on réalise une chambre photographique très primitive, qui permet cependant de former des images d'autant plus nettes que le trou est petit. Rien n'empêche alors de transposer ce dispositif dans le domaine gamma. Il suffit pour cela d'utiliser un matériau à **numéro atomique** élevé, et de remplacer l'émulsion photographique par une couche détectrice sensible au rayonnement gamma. On accroît la luminosité des images sans perdre en finesse en perçant la face avant d'un grand nombre de trous, disposés suivant un code précis. Ce dernier est choisi afin de pouvoir décoder l'image complexe ainsi formée par cette multitude de trous à l'aide d'un **algorithme** mathématique simple.

Voilà plus de vingt ans que le SAP contribue à mettre en œuvre des dispositifs à ouverture codée pour explorer le ciel gamma. Ce fut d'abord le télescope Sigma, en orbite de 1989 à 1998 à bord du satellite russe Granat, puis le télescope Ibis, en orbite depuis 2002 à bord du satellite Integral de l'Esa. Ibis, qui associe une ouverture codée à un plan détecteur composé d'un réseau de cristaux semi-conducteurs en tellurure de cadmium (CdTe), s'avère des plus efficaces pour localiser les sur-



Vue schématique du satellite sino-français SVOM.

On distingue, en vert, la plateforme spatiale de type Proteus avec, en bleu, ses panneaux solaires repliés, en orange, le module charge utile où sont montés les équipements scientifiques, en gris, avec au centre, le télescope ECLAIRS.

sauts gamma qu'il détecte au rythme d'un par mois (figure 3). Il est donc parfaitement envisageable de reprendre ce type de dispositif au profit d'une mission spatiale dévolue à l'étude des sursauts gamma, notamment en réduisant la distance entre l'ouverture codée et le plan détecteur afin d'ouvrir largement le champ de vue sans dégrader la précision de localisation des sources. C'est précisément sur ce principe qu'est basé le télescope ECLAIRS, un appareil dont le SAP envisage d'assurer la maîtrise d'œuvre au sein d'une collaboration comprenant le **Centre d'étude spatiale des rayonnements (CESR)** à Toulouse et le laboratoire **Astroparticule et cosmologie** à Paris. Proposé au **Centre National d'études spatiales (Cnes)** en réponse à son appel d'offres 2004, ECLAIRS est désormais l'instrument clef de la mission sino-française SVOM, fruit d'une collaboration entre le Cnes, l'Agence spatiale chinoise et l'Académie des sciences de Chine.

Le lancement de SVOM est prévu fin 2010 début 2011. ECLAIRS sera alors en mesure de détecter près de cent sursauts gamma par an et d'en estimer la position sur la voûte céleste avec une précision de quelques minutes d'arc. Grâce à l'électronique de lecture de nouvelle génération IDeF X, réalisée dans le cadre d'un programme de recherche et développement CEA-Cnes, le plan de détection CdTe du télescope ECLAIRS sera sensible jusque dans la gamme des rayons X, une performance qui doit s'avérer décisive pour détecter les sursauts les plus distants, ceux dont l'éclat gamma apparaît fortement décalé vers le domaine des rayons X en raison de l'expansion de l'Univers. Seule mission entièrement dévolue à l'étude des sursauts gamma à l'horizon 2010, SVOM sera alors le grand pourvoyeur de nouvelles données grâce auxquelles les astrophysiciens pourront enfin arpenter l'Univers jusqu'au début de l'ère de ré-ionisation. Il sera alors possible de contraindre les paramètres cosmologiques au point de clarifier la nature de cette mystérieuse **énergie noire**, reconnue désormais comme le constituant principal de l'Univers.

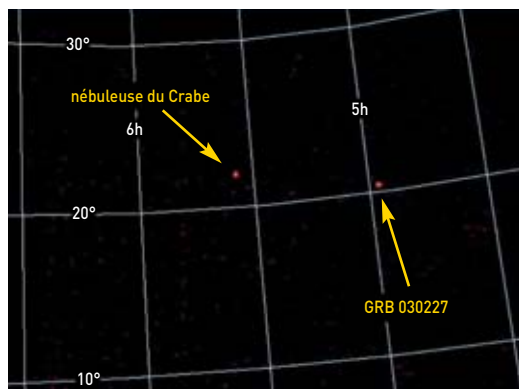


Figure 3. Champ du ciel observé le 27 février 2003 dans la bande des rayons gamma de basse énergie, par le télescope Ibis à bord du satellite Integral, afin d'étalonner le télescope au moyen de la nébuleuse du Crabe, la source étalon de l'astronomie gamma. C'est au cours de cette même séance d'étalonnage qu'est apparu fortuitement dans le champ de l'appareil GRB 030227, un sursaut gamma situé à une distance d'environ huit milliards d'années de lumière.

> Jacques Paul et David Elbaz

Direction des sciences de la matière
CEA Dapnia, centre de Saclay

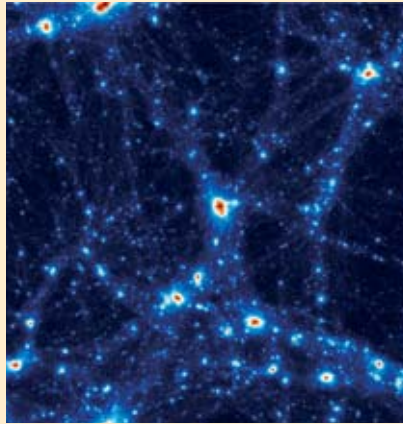
A Le modèle standard cosmologique

Le **modèle standard cosmologique**, représentation actuellement admise de l'Univers, est fondé sur une théorie de la **gravitation**, la **relativité générale** d'Einstein. Ce modèle prend en compte une expansion de l'Univers mise en évidence par les observations de l'astronome Hubble selon lesquelles les **galaxies** s'éloignent les unes des autres d'autant plus rapidement que la distance s'accroît.

Les hypothèses de base du modèle sont que l'Univers est *homogène*, c'est-à-dire qu'il présente partout les mêmes propriétés (à l'échelle cosmologique, s'entend) et qu'il est *isotrope*, c'est-à-dire qu'il se présente de la même façon quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe.

Trois paramètres caractérisent l'évolution de l'univers dans ce modèle : la **constante de Hubble** d'abord, qui caractérise son taux d'expansion, la **densité de masse** (rapport entre sa densité et une *densité critique*) et la **constante cosmologique**. Introduite par Einstein sous la forme d'une force s'opposant à la gravitation afin de tenter de rendre compte d'un univers stable, cette constante correspondrait plutôt à la manifestation de l'*énergie sombre* dans un univers en expansion ⁽¹⁾.

Si la densité de masse est inférieure ou égale à 1, cette expansion se poursuit indéfiniment. Les dernières observations plaident pour une densité de matière égale à 1, ce qui implique un univers "plat" (où la



D. Aubert/CEA-C. Pichon (IAP)

Simulation numérique d'un univers en formation réalisée dans le cadre du projet Horizon, qui fédère les activités en simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies des équipes françaises, dont celle du Dapnia (CEA). Son but est de comprendre les mécanismes physiques à l'origine de la structure et de la distribution des galaxies qui nous entourent, et notamment la nôtre, la Voie Lactée.

somme des angles d'un triangle est exactement égale à 180°).

Le modèle théorique standard de la cosmologie en vigueur table sur un univers observable dont le rayon serait de quelque 45 milliards d'années de lumière et âgé d'environ 13,7 milliards d'années à compter d'une "singularité" (explosion originelle) initiale dénommée **Big Bang**, suivie environ 300 000 ans après par un découplage de la matière et du rayonnement puis par une phase d'**inflation**.

Le modèle permet d'autre part de rendre compte du **bruit de fond cosmologique** (rayonnement diffus) d'une température de 2,7 K et des fluctuations de rayonnement/densité ayant conduit très tôt à la formation des premières structures "germes" des galaxies.

(1) L'interprétation des mesures de la sonde spatiale WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) et de SDSS (Sloan Digital Sky Survey) conduit à une valeur proche de 71 (km/sec)/Mpc +/- 0,03 pour la constante de Hubble, mais des surprises sur la valeur de ce paramètre restent possibles si la surprenante composition de l'Univers, où 95 % de l'Univers est constitué de matière et d'énergie noires, n'est en fait pas correcte.

B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **modèle standard** de la physique des particules est le cadre théorique de référence qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues (tableau 1) et les **interactions** fondamentales auxquelles ces particules participent (tableau 2). Les constituants élémentaires de la matière, appelés **fermions**, se partagent en deux grandes catégories déterminées par leur participation aux interactions ou forces fondamentales (**gravitationnelle**, **électromagnétique**, **faible** et **forte**) par l'intermédiaire de **bosons vecteurs**, particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature⁽¹⁾ (tableau 2). L'appartenance d'une particule à la catégorie des fermions ou à celle des bosons est liée à son **spin** (moment angulaire ou moment de rotation interne intrinsèque), suivant qu'il est de valeur demi-entière (fermion) ou entière (**boson**). À chaque constituant de la matière est par ailleurs associée son **antiparticule**, une particule de même masse mais de charge opposée. Le **positon** est ainsi l'antiparticule de charge positive de l'**électron**, dont la charge est négative.

Leptons et quarks

Les fermions comportent, d'une part les **leptons**, qui peuvent se déplacer librement et ne participent pas à l'**interaction forte** qui assure la cohésion des **noyaux atomiques** (elle est pour cette raison qualifiée de **nucléaire**), et d'autre part les **quarks**, qui participent à toutes les interactions mais ne sont pas observés individuellement, imbriqués qu'ils sont au sein des **hadrons**, les particules sensibles à l'interaction forte dont ils sont les constituants⁽²⁾.

Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** participent à l'**interaction électromagnétique** (qui assure la cohésion des **atomes** et des **molécules**) et à l'**interaction faible** (à la base de phénomènes de désintégration et en particulier de la **radioactivité β**). Les **leptons neutres** ou **neutrinos**, pour leur part, ne participent qu'à l'interaction faible. De masse très réduite, il en existe un type pour chaque type de lepton chargé.

Indépendamment de leur participation aux interactions, les constituants élémentaires de la matière sont classés en trois **générations** ou **familles** de particu-

les. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses, chaque famille étant plus lourde que la précédente.

L'**électron**, le quark haut (u pour *up*) et le quark bas (d pour *down*), qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Ce sont les constituants exclusifs de la **matière ordinaire**, dite **baryonique** (un **baryon** est un assemblage de quarks) faite de **protons** et de **neutrons** qui ne représente pourtant qu'environ 4 % du contenu énergétique de l'Univers!

Les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables, à l'exception des neutrinos, qui ont cependant une masse non nulle mais qui sont stables. Elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les états finals des collisions produites dans les **accélérateurs** ou dans le **rayonnement cosmique** et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.

D'après la **mécanique quantique**, pour qu'il y ait une interaction entre particules de matière ordinaire, il faut qu'au moins une particule élémentaire (un boson) soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le boson **intermédiaire** (ou **vecteur**) de l'interaction électromagnétique, les **W^+** , **W^-** et **Z** sont les bosons intermédiaires de l'interaction faible, et les **gluons** sont ceux de l'interaction forte au niveau des quarks. Quant au **graviton**, vecteur supposé de l'interaction gravitationnelle, il n'a pas été découvert expérimentalement. La **force gravitationnelle**, qui s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse, n'est pas incluse dans le modèle standard, d'autant que la théorie des champs quantiques appliquée à la gravitation n'est pas viable en l'état. Si les effets gravitationnels sont négligeables dans les mesures de physique des particules, ils deviennent dominants aux échelles astronomiques.

La portée des interactions

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons. Le photon ayant une charge électrique nulle, ces particules conservent leur charge électrique après

l'échange. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés**, où les vecteurs de l'interaction sont **W^+** et **W^-** , et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z^0** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c² pour **W^\pm** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W^\pm** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson **Z^0** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changeront pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont capables aussi d'échanger un **Z^0** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z^0** avec une autre particule, mais pas un photon.

Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur⁽¹⁾ échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes

(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue" (ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles). Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

(2) Exemple des **nucléons** : le proton contient deux quarks haut et un quark bas, le neutron deux quarks bas et un quark haut. Un **méson** n'est composé que de deux quarks (un quark et un antiquark).

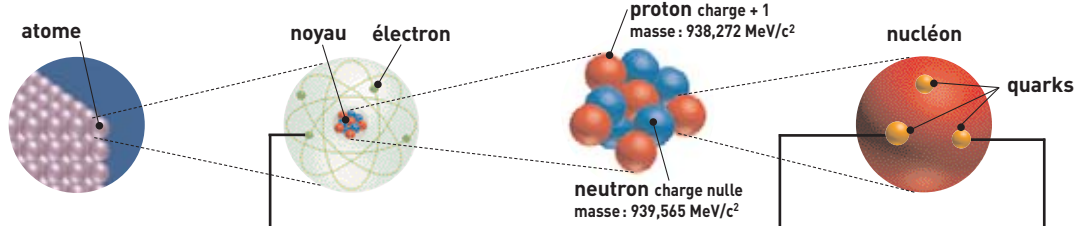
B (suite)

une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluons entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais puisqu'ils sont dotés d'une charge

de couleur, ils peuvent interagir entre eux, ce qui complique grandement le traitement théorique de cette interaction. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10^{-15} m.

La quête de l'unification

Le cadre théorique du modèle standard est la **théorie quantique des champs** qui permet de décrire quantitativement les interactions fondamentales des parti-




	leptons peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν _e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν _μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν _τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W [±] , Z ⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs?	 responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau 1.

Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.

B (suite)

cules élémentaires en respectant les principes de la *relativité restreinte* et ceux de la mécanique quantique. D'après cette dernière, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution souhaitée est fine. Mais d'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut se transformer en apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial : les fermions peuvent être produits ou annihilés par paires particule/antiparticule, les bosons peuvent l'être en nombre arbitraire.

Tous les processus relevant d'une même interaction fondamentale sont reliés les uns aux autres. La démarche de la théorie quantique des champs, dans laquelle les propriétés de **symétrie** jouent un rôle fondamental, vise à décrire l'ensemble des processus relatifs à chaque interaction fondamentale au sein de grandes synthèses théoriques.

L'interaction forte et l'interaction électromagnétique sont respectivement formalisées dans les théories de la **chromodynamique quantique** et de l'**électrodynamique quantique**. L'interaction faible, quant à elle, n'est pas décrite isolément, mais en conjonction avec l'interaction électromagnétique dans le formalisme unifié de la **théorie électrofaible**. Des théories de grande *unification* de toutes les interactions fondamentales existent, mais n'ont pas encore reçu de validation expérimentale.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception jusqu'à présent d'une seule, l'existence du (des ?) **boson(s) de Higgs**, particule(s) que l'on espère bien découvrir au LHC. Le **mécanisme de Higgs** serait responsable de la masse des particules élémentaires, le boson éponyme permettant de donner une masse aux fermions de masse nulle interagissant avec lui. Il permettrait l'unification, à haute énergie, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible et expliquerait efficacement la **brisure de cette symétrie électrofaible** à basse énergie, qui se traduit par deux interactions qu'on peut distinguer à ce niveau d'énergie (voir

L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : la feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP, p.23).

Dépasser ou compléter le modèle standard ?

Le modèle standard comporte une série de paramètres (tels que les masses des particules ou les intensités des forces fondamentales) qui sont "calés" sur les résultats expérimentaux. C'est, en tout état de cause, une théorie susceptible d'être améliorée ou approfondie, voire dépassée. Il ne fournit pas d'explication à la classification des constituants de la matière en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la **violation de l'invariance CP** charge/parité (qui fait qu'un processus physique impliquant l'interaction faible n'est pas équivalent à son image dans un miroir), violation qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/**antimatière** au profit de la première dans l'univers primordial. Il ne permet ni le traitement quantique de la gravitation ni ne fournit d'explication complète à la propriété fondamentale du **confinement** qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons.

Pour dépasser ou compléter le modèle standard, les chercheurs explorent principalement deux voies :

– la **supersymétrie** (communément

appelée SUSY) associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire, respectivement fermion ou boson. Ces partenaires seraient *a priori* très massifs, le plus léger d'entre eux serait une particule n'interagissant que très faiblement. Elle serait un candidat idéal pour expliquer la **masse cachée** (ou **matière noire**) de l'Univers qui représente quelque 21 % du contenu énergétique de l'univers, le reste (près de 75 %) étant constitué d'une **énergie noire** dont la nature reste également à déterminer. Ces WIMPs (acronyme anglais de Weakly Interacting Massive Particles) sont activement recherchés (voir *Edelweiss II, à la recherche des particules de matière noire*).

– la voie de la **sous-structure** présume qu'il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles). Elle déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais de masses deux à trois mille fois plus élevées.

À noter que si les théories supersymétriques donnent des prédictions en accord avec les mesures de précision faites au LEP, les théories qui proposent des sous-structures (du moins leurs versions les plus simples) n'y parviennent pas. Quant aux versions les plus complexes, elles rencontrent des problèmes au niveau théorique.

interaction fondamentale	particules associées (messagers)	actions
gravitation	graviton ?	de portée infinie, elle est responsable de la force d'attraction de deux masses entre elles et de la chute des corps
interaction électromagnétique	photon	de portée infinie, elle est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
interaction faible	W^+ , W^- , Z^0	elle est responsable des radioactivités β^- et β^+ et de réactions impliquant des particules comme le neutrino
interaction forte	gluons (il en existe 8)	elle assure la cohésion du noyau atomique

Tableau 2. Les interactions fondamentales, leurs vecteurs et leurs effets.