

UNIVERS

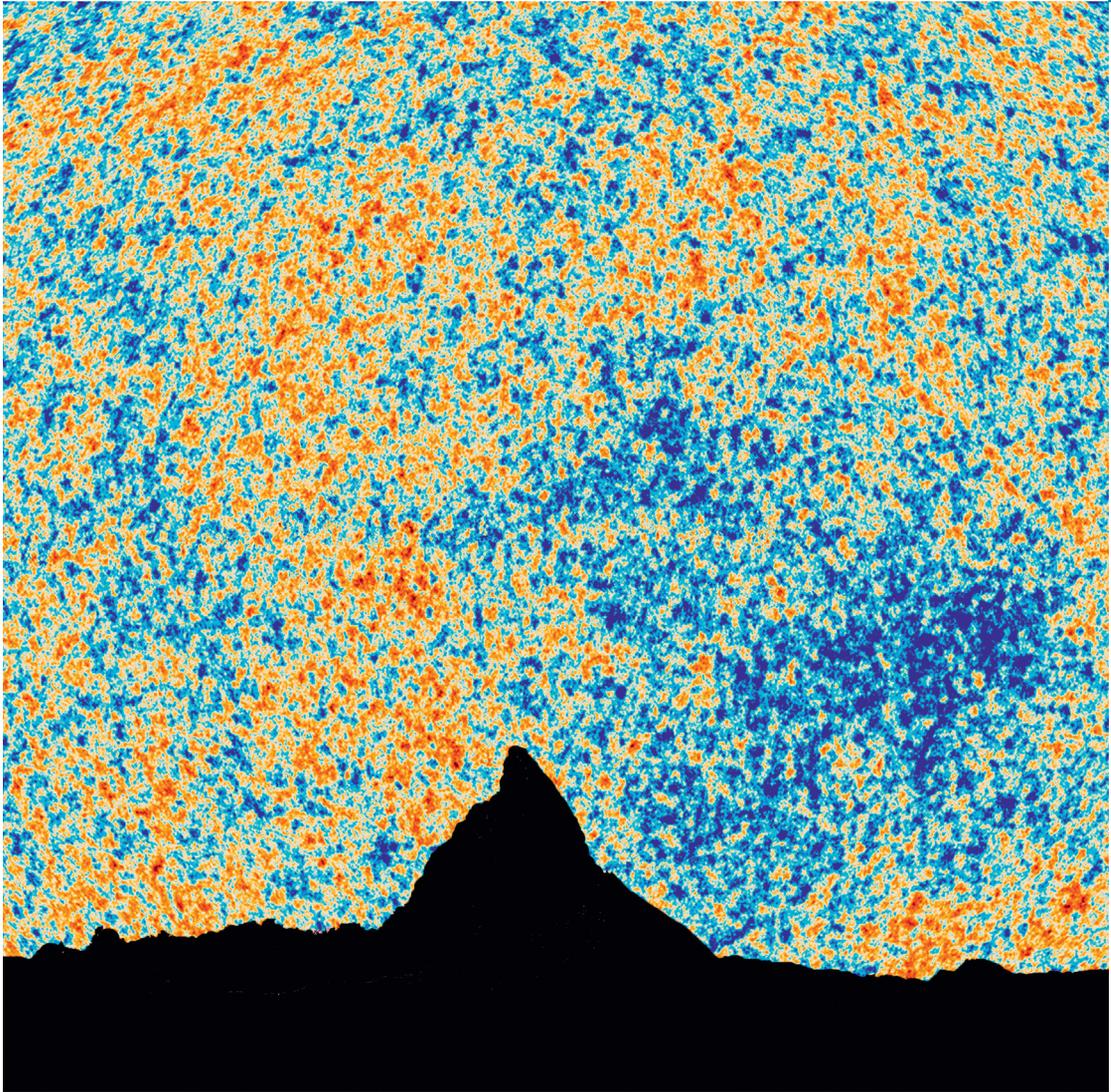


Figure 1.0. Le rayonnement cosmologique.

Quel serait l'aspect de notre ciel si nos yeux pouvaient voir le rayonnement dans le domaine des micro-ondes ? Cette image en donne une impression. Le profil des montagnes avec la pointe bien connue du Cervin a été superposé au fond diffus cosmologique mesuré par le satellite PLANCK de l'Agence spatiale européenne. Ce rayonnement, émis alors que l'Univers avait un âge de 380 000 ans, est une des preuves du Big Bang. Le rayonnement

observé actuellement, 13,8 milliards d'années après son émission, correspond à celui d'un corps noir dont la température est de 2,726 °K. De très faibles variations de température, inférieures au dix-millième de degré, sont mesurées. Elles sont révélées par les couleurs sur l'image.

Crédit : adapté de European Space Agency / PLANCK Collaboration.

“

*Un être humain est une partie du tout que nous appelons l'Univers,
une partie limitée dans le temps et dans l'espace.*

Albert Einstein

”

“

*Il existe deux chemins pour parvenir à la vérité.
J'ai décidé de les suivre tous les deux.*

Georges Lemaître, scientifique et prêtre catholique

”

“

L'histoire de l'astronomie est faite d'horizons qui s'éloignent.

Edwin Powell Hubble

”

1.1. Paradoxe de Cheseaux-Olbers

Le ciel est noir, la nuit, « à côté » des étoiles et des galaxies

Parmi les tests cosmologiques fondamentaux, on peut citer, entre autres, la mise en évidence de l'**expansion de l'Univers** révélée dans les années 1920 par la **loi de Hubble-Lemaître**, puis plus tard par l'observation du **fond diffus cosmologique (FDC)** et la compréhension de la nucléosynthèse cosmologique (cf. **Premières minutes**) des éléments chimiques. Mais le test le plus simple, que chacun peut réaliser à l'œil nu par une nuit claire et sans Lune, est l'observation que le ciel est noir à côté des étoiles (**figure 1.1**). Cette observation primaire est en plus primordiale et son explication a des fondements cosmologiques profonds.

Si l'Univers était statique, infini, transparent et uniformément rempli d'étoiles qui ne s'éteignent jamais, le ciel devrait être partout brillant car toute direction d'observation devrait rencontrer un point lumineux, étoile ou galaxie. Or, ce n'est pas le cas et une des hypothèses au moins n'est donc pas remplie. L'énoncé de ce paradoxe est en général attribué à l'Allemand Heinrich Olbers qui le décrit en 1823. Mais il avait déjà été mentionné par

d'autres, l'Anglais Thomas Digges en 1576, le Germanique Johannes Kepler en 1610, l'Anglais Edmond Halley en 1720, et le jeune astronome suisse Jean Philippe Loys de Cheseaux en 1743.

Ce dernier précisa mathématiquement le paradoxe en imaginant les étoiles placées dans des coquilles concentriques autour de l'observateur. Il obtint que le rayonnement reçu sur Terre devait alors être 180 000 fois plus intense que celui du Soleil, compte tenu des hypothèses de départ. Les diverses explications proposées par les auteurs cités ont été la finitude de l'Univers en âge ou en taille, l'opacité partielle de l'espace pour le rayonnement, la structure non-uniforme de l'Univers et l'âge fini des étoiles.

Les connaissances cosmologiques apportent l'explication de ce paradoxe. La théorie de la relativité générale (Einstein, 1915) prédit un Univers non statique, ce qui est confirmé par l'observation de son expansion (Hubble, 1929). Cette expansion conduit à une origine, le **Big Bang**, qui remonte à 13,8 milliards d'années ; l'Univers

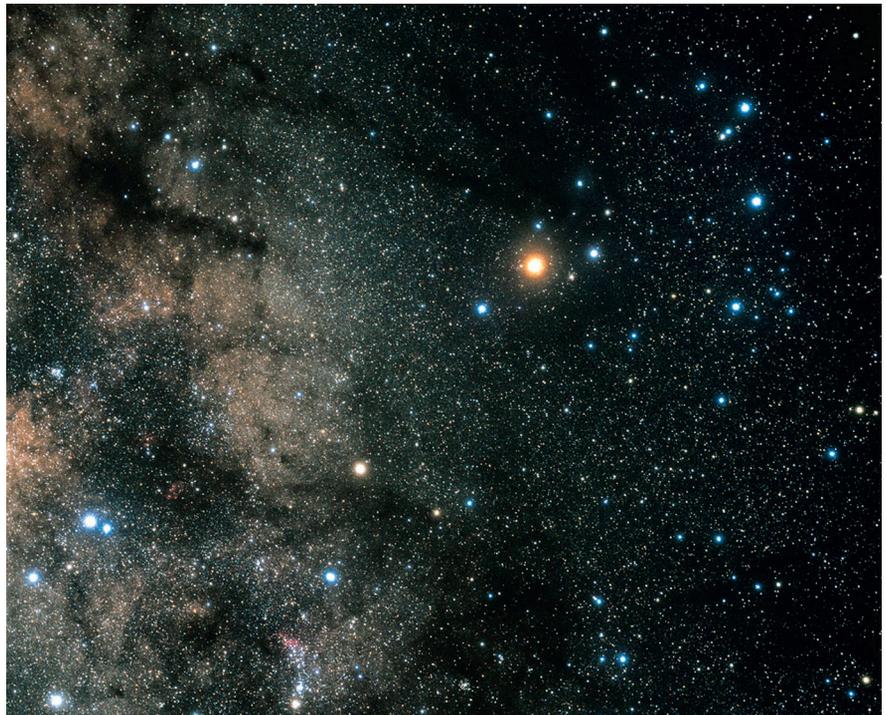


Figure 1.1. La constellation Scorpius avec la Voie lactée.

L'étoile jaune et brillante est Antarès (α Scorpii). Le fait que le ciel est noir « à côté » des étoiles est de nature cosmologique!

Crédit : A. Fujii / Space Telescope archives.

a donc un âge fini et n'est pas statique. Le calcul de la luminosité reçue via des coquilles statiques n'est donc pas valable. De plus, les étoiles ont une durée de « vie » finie et nombreuses sont celles qui se sont éteintes (mais d'autres se sont formées). Par ailleurs, l'extinction interstellaire joue également un rôle en diffusant et absorbant les rayonnements stellaires. Enfin, la lumière des galaxies, et donc des étoiles qui les composent, dans un Univers en expansion subit un décalage spectral vers les grandes longueurs d'onde. La lumière observée transporte donc une énergie décroissante avec la distance des objets.

Il faut toutefois remarquer que si le ciel est noir dans le domaine visible du rayonnement, il ne l'est pas aux plus grandes longueurs d'onde, ainsi que le montre le fond diffus cosmologique (FDC) plus connu sous son appellation en anglais de CMB pour Cosmic Microwave

Background. De plus, à l'époque de l'émission du FDC, quand l'Univers avait 380 000 ans, sa température était de 3 000 °K, soit grossièrement l'équivalent de la température de surface des étoiles. Le ciel d'alors était uniformément brillant. Le paradoxe de Cheseaux-Olbers n'a donc de sens que pour un Univers évolué, comme actuellement.

Par ailleurs, le fait que la **vitesse de la lumière c** a une valeur finie joue aussi un rôle. Si elle était infinie, nous recevions immédiatement et à tout instant la lumière de tous les objets, et le ciel serait brillant. La valeur de c est très grande, mais elle n'est pas infinie. La conséquence est énorme : nous pouvons voir des objets qui ont des âges différents, d'autant plus jeunes qu'ils sont plus distants. Il est dès lors possible de reconstruire l'histoire de l'évolution de l'Univers.

1.2. Big Bang

La quête ultime des origines

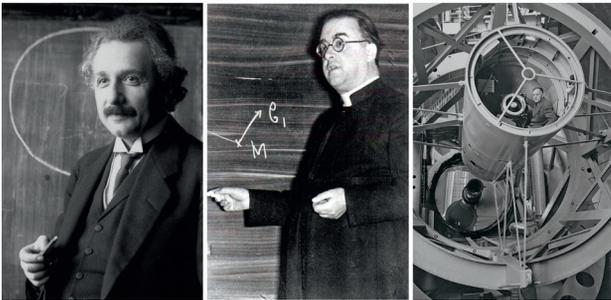


Figure 1.2. Albert Einstein, Georges Lemaître et Edwin Hubble.

Les théoriciens sont au tableau noir, l'observateur est au foyer primaire du télescope du Mont Palomar.

Le Big Bang est un modèle utilisé pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers. Il a été proposé en 1927 par le Belge Georges Lemaître à partir de la relativité générale d'Albert Einstein formulée en 1915. Un élément fondamental en lien avec les conséquences du Big Bang est la mise en évidence observationnelle de l'expansion de l'Univers par Edwin Hubble en 1929 (figure 1.2). Il a établi une loi reliant la vitesse d'éloignement des

galaxies proches en fonction de leur distance. C'est la fameuse **loi de Hubble-Lemaître**, caractérisant l'expansion actuelle de l'Univers.

Le Big Bang marque, pour simplifier, l'origine de notre Univers « actuel ». Il est daté maintenant avec une grande précision et l'âge de 13,8 milliards d'années est adopté dans cet ouvrage, déterminé par les données récentes des satellites PLANCK et WMAP. Pour être plus précis, le Big Bang n'est pas réellement l'instant initial, explosif, de l'Univers car ce qui s'est passé auparavant n'est pas connu. Il caractérise un instant avec une densité et une température si élevée que les lois de la physique actuelle ne sont plus vraiment applicables. L'âge du Big Bang ne marque donc « que » celui de l'Univers « actuel », en partie descriptible, encore que les théories sous-jacentes soient très incertaines au cours des toutes premières périodes (tableau 1.1). Toutefois, ces périodes sont si courtes que l'âge du Big Bang n'est pas vraiment remis en cause.

Lors du Big Bang, que nous appellerons quand même origine malgré les réserves évoquées ci-dessus, tout le contenu de l'Univers était concentré en un « point » où la

température et l'énergie des particules étaient « quasi-infinies ». Cet instant étant impossible à décrire, nous dirons que la densité et la température étaient « extrêmement élevées, juste après le Big Bang ». Depuis lors, l'Univers est en expansion ; sa température moyenne ainsi que l'énergie des particules n'ont fait que décroître jusqu'à aujourd'hui.

Ce sont les expériences de physique des particules qui permettent de tester les propriétés de la matière et des rayonnements aux très hautes énergies. Mais les valeurs extrêmes qui régnaient dans l'Univers au moment du Big Bang sont (actuellement) inaccessibles à l'expérimentation. Le grand accélérateur de particules LHC du CERN (cf. **Premières minutes**) a atteint la limite de 10^{13} eV (électronvolt, voir **Annexe**) en 2017, correspondant à la température de $\sim 10^{17}$ °K. Ces valeurs sont encore inférieures d'au moins 15 ordres de grandeurs aux conditions initiales données par le Big Bang.

La relation entre l'énergie cinétique E_c des particules et la température T utilisée dans le **tableau 1.1** est basée sur celle d'un gaz parfait avec équipartition de

l'énergie : $E_c = (3/2) \cdot kT$ où k est la constante de Boltzmann (cf. **Annexe**). C'est une approximation utile pour donner des ordres de grandeurs, mais la physique du milieu est beaucoup plus complexe.

Les seules particules mentionnées dans le tableau sont les quarks, ainsi que les protons, les neutrons, les électrons et leurs antiparticules. Ces particules sont la base essentielle des éléments chimiques (**figure 6.3**) dont le premier, l'atome d'hydrogène, a été créé en combinant un proton et un électron quand la température est descendue à environ 3000 °K, avec l'émission du FDC (fond diffus cosmologique) à l'âge de 380 000 ans. Mais le monde des particules élémentaires est très vaste ; elles sont nombreuses et peuplaient les premières époques. De multiples formations et désintégrations existaient dans la « soupe » primordiale. Ces interactions ont joué un rôle, dont il faut tenir compte pour décrire en détail l'évolution de l'Univers se refroidissant. Cet aspect fondamental ne sera toutefois pas évoqué dans cet ouvrage, qui ne contient que le descriptif qualitatif des époques, ou ères, initiales.

| Époque | Événements | Temps | Tempér. [°K] | Énergie [eV] | Redshift z |
|---------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ère de Planck | I_{FO} , I_{EL} , I_{FA} et I_{GR} sont unifiées | $< 10^{-43}$ s | $> 10^{32}$ | $> 10^{28}$ | $> 10^{32}$ |
| Grande unification | Découplage de I_{GR} | 10^{-43} - 10^{-35} s | 10^{32} - 10^{27} | 10^{28} - 10^{23} | 10^{32} - 10^{27} |
| Ère des quarks | | 10^{-35} - 10^{-9} s | 10^{27} - 10^{25} | 10^{23} - 10^{21} | 10^{27} - 10^{15} |
| | Inflation | 10^{-35} - 10^{-33} s | | | |
| | découplage de I_{FO} | 10^{-30} s | | | |
| | I_{EL} et I_{FA} se découplent | 10^{-12} s | | | |
| Ère des hadrons | Formation des p^+ , anti- p (p^-), n , anti- n | 10^{-9} - 10^0 s | 10^{25} - 10^{10} | 10^{21} - 10^6 | 10^{15} - 10^{10} |
| Ère des leptons | Formation des e^- , e^+ | 10^0 - 10^2 s | 10^{10} - 10^9 | 10^6 - 10^5 | 10^{10} - 10^5 |
| Ère des photons | | 10^2 s- 10^6 a | 10^9 - 10^3 | 10^5 - 10^{-1} | 10^5 - 10^3 |
| | Nucléosynthèse cosmologique | 10^2 - 10^3 s | | | |
| | FDC (CMB) | 380 000 a | 3 000 | $4 \cdot 10^{-1}$ | 1'100 |
| Ère de la matière | Étoiles et galaxies | 10^6 - 10^{10} a | 10^3 -10 | 10^{-1} - 10^{-3} | 10^3 -0,3 |
| | Âges sombres | 10^6 - $5 \cdot 10^8$ a | | | |
| | Réionisation | $5 \cdot 10^8$ - $9 \cdot 10^8$ a | | | |
| | Premières étoiles | $9 \cdot 10^8$ a | | | |
| Ère du vide | L'Univers s'est dilaté | $> 10^{10}$ a | < 10 | $< 10^{-3}$ | $< 0,3$ |
| | Aujourd'hui | $1,38 \cdot 10^{10}$ a | 2,726 | $3,5 \cdot 10^{-4}$ | 0 |

Tableau 1.1. Époques de l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang.

Notations.

Interactions fondamentales : nucléaire forte (I_{FO}), électromagnétique (I_{EL}), nucléaire faible (I_{FA}) et gravitation (I_{GR}).

Particules : quarks, proton (p^+), antiproton (p^-), neutron (n), antineutron (anti- n), électron (e^-) et antiélectron ou positron (e^+).

FDC : fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background, CMB).

Unités de temps : seconde (s) ou année (a).

Unité d'énergie des particules : électronvolt (eV).

Le redshift z est défini dans le chapitre Vitesses radiales.

Référence : adapté du livre *Cosmologie et Relativité Générale* d'Alice Gasparini, Presses polytechniques et universitaires romandes (2018).

La loi d'équivalence entre masse et énergie (voir l'encadré à la fin du chapitre) permet d'établir la succession des particules créées dans l'Univers se refroidissant. Par exemple, une paire électron-positron peut être créée par un photon si son énergie est supérieure à celle de l'énergie de masse de la paire, soit 2,0,511 MeV. L'énergie d'un tel photon (1,022 MeV) correspond à une longueur d'onde de $1,213 \cdot 10^{-12}$ m, situé dans le domaine des rayons gamma-X (cf. **Rayonnement**). Le milieu était alors très chaud, avec une température supérieure au milliard de °K et des vitesses très élevées des particules créées.

Les valeurs du redshift z (cf. **Vitesses radiales et Expansion de l'Univers I**) aux différentes époques sont également données dans le tableau. Formellement, le redshift n'a un sens que si un décalage du rayonnement vers les grandes longueurs d'onde peut être observé. Cette condition est satisfaite dans le cas des galaxies, pour lesquelles des études de leur spectre (distribution de leur **rayonnement** électromagnétique en fonction de la longueur d'onde) sont réalisées, soit pour un âge de l'Univers supérieur à environ un milliard d'années. Les valeurs pour les époques antérieures, pour lesquelles aucun spectre classique n'est produit, sont obtenues via des modèles d'Univers. Le redshift est alors une extension de la définition standard ; c'est la valeur qui serait obtenue si des spectres existaient.

Les époques principales de l'évolution de l'Univers sont décrites ci-dessous.

Ère de Planck (âge $t < 10^{-43}$ s)

Aucune théorie globale ne décrit l'Univers avant le temps de Planck, $t = 10^{-43}$ s. Mais une propriété importante est admise : toutes les particules élémentaires existantes étaient en équilibre thermique, c'est-à-dire qu'elles avaient la même énergie moyenne et qu'elles interagissaient entre elles. Même les neutrinos interagissaient avec les autres particules en raison de la très haute densité du milieu, alors que dans les conditions « normales » (même au cœur des étoiles) leurs interactions sont extrêmement rares. La conséquence est que toutes les propriétés antérieures au temps de Planck ont été effacées, d'où notre ignorance sur ces premiers instants.

Il est admis qu'avant le temps de Planck, les interactions nucléaires fortes, électromagnétique, nucléaire faible et gravitationnelle étaient unifiées, selon une théorie globale encore à établir. Ce sont les quatre interactions fondamentales de la physique, décrites dans l'encadré à la fin du chapitre. La théorie de cet état primordial avec les quatre interactions fondamentales unifiées est la *Théorie du tout* (en anglais, *Theory of Everything*, TOE). Suite à la baisse de la température de l'Univers, ou de

l'énergie des particules, les quatre interactions connues aujourd'hui sont ensuite apparues successivement par découplages des autres, d'abord l'interaction gravitationnelle, puis, lors de l'ère des quarks, l'interaction nucléaire forte, et enfin les interactions nucléaire faible et électromagnétique.

Grande Unification (10^{-43} - 10^{-35} s)

Juste après le temps de Planck, l'interaction gravitationnelle s'est découplée des trois autres interactions fondamentales. Des **ondes gravitationnelles** cosmologiques pourraient avoir été émises, à l'image du FDC électromagnétique émis lors de la formation des atomes d'hydrogène, quand l'Univers avait 380 000 ans. Par analogie, cette émission d'ondes gravitationnelles serait un « fond diffus gravitationnel », encore à découvrir, et qui apporterait des confirmations sur la justesse du modèle du Big Bang, encore très incertain aux origines. Ce serait aussi un moyen extraordinaire d'observer les premières phases de l'évolution, en remontant dans le temps d'une étape supplémentaire.

La théorie de la grande unification porte sur l'Univers après le découplage de la gravitation. C'est donc un modèle de physique des particules avec les trois interactions fondamentales, nucléaire forte, nucléaire faible et électromagnétique, alors qu'elles étaient encore unifiées. Cette théorie porte aussi le nom de *Grand Unified Theory* (GUT).

Ère des quarks (10^{-35} - 10^{-9} s)

Cette ère, comme les précédentes, est encore inaccessible aux instruments actuels. Elle est caractérisée par l'inflation, entre 10^{-35} et 10^{-33} s, par le découplage de l'interaction nucléaire forte à 10^{-30} s, et par le découplage des interactions nucléaire faible et électromagnétique à 10^{-12} s. Depuis ce dernier instant, les quatre interactions fondamentales sont celles connues aujourd'hui. À cette époque, les protons et les neutrons (nucléons) ne pouvaient pas exister en raison de la violence des chocs résultant de la très haute température, donc de leur énergie cinétique. Cette ère comportait en particulier les quarks, constituants des futurs nucléons (cf. **Éléments chimiques**) ; leur énergie de masse vaut 2,01 MeV (quark u) et 4,79 MeV (quark d). À ce stade, l'Univers était constitué de photons, de leptons (voir ci-dessous), entre autres des électrons et des neutrinos, et des quarks libres, pas encore contraints de former les nucléons, ce qui est le cas aujourd'hui suite à la diminution de la densité des particules.

Ère des hadrons (10^{-9} - 10^0 s)

La diminution de la densité des particules a produit le confinement des quarks en hadrons (protons et neutrons entre autres, ainsi que leurs antiparticules) par l'interaction nucléaire forte. Les rencontres entre particules et antiparticules ont produit leur annihilation et l'émission de rayonnement, mais avec aussi la réaction inverse. Il s'est alors établi un équilibre qui maintenait « stable » la population de ces particules. À partir de l'âge de 10^{-7} s, l'Univers contenait des neutrons et des protons (nucléons des futurs noyaux atomiques), des électrons, des neutrinos ainsi que leurs antiparticules. Ces particules étaient libres (et en interaction), et leur énergie était encore trop grande pour que des noyaux atomiques puissent se former.

À l'âge de 10^{-6} s, l'énergie n'était plus suffisante pour créer des paires protons-antiprotons et neutrons-antineutrons. A priori, il devrait donc y avoir le même nombre de nucléons et d'antinuécléons. Ce n'est pas le cas : l'observation montre que l'Univers est constitué de matière avec une absence d'antimatière, sauf celle produite par des réactions spécifiques et locales de particules. Cette absence d'antimatière résulte d'un phénomène nommé *brisure de symétrie*, qui n'est pas totalement expliqué actuellement. Mais c'est un fait fondamental car, sans cela, il y aurait autant de particules que d'antiparticules dans l'Univers, avec des productions de rayonnement lors des rencontres d'annihilation. La recherche de galaxies d'antimatière, ou de régions constituées uniquement d'antimatière, n'a pas abouti. Jusqu'à preuve du contraire, le gaz, les étoiles et les galaxies de notre Univers ne sont constitués que de matière, et non d'antimatière.

Ère des leptons (10^0 - 10^2 s)

À l'âge de 1 s, la densité était devenue trop faible pour maintenir un taux élevé de collisions des neutrinos avec le processus création-annihilation ; ils se sont découplés des autres particules en créant un « fond diffus de neutrinos », à l'image du FDC et du fond diffus gravitationnel (voir ci-dessus). Étant donné la très faible probabilité d'interaction des neutrinos avec les autres particules, il est peu probable que ce fond diffus de neutrinos soit mis en évidence prochainement. L'observation des fonds diffus gravitationnels et de neutrinos est un des enjeux majeurs de la cosmologie observationnelle pour le futur, à moyen ou long terme.

Les électrons et les positrons font partie de la classe de particules des *leptons*. La création des électrons s'est arrêtée quand l'énergie du milieu est devenue inférieure à 1,02 MeV, soit l'énergie de masse d'un électron plus d'un positron. Comme pour les hadrons (voir ci-dessus), on devrait alors avoir le même nombre d'électrons et de

positrons. Ce n'est pas le cas, l'Univers ne contient que des électrons. C'est à nouveau une brisure de symétrie qui est évoquée, favorisant les électrons au détriment des positrons. Un fait notable doit gouverner l'explication de ces brisures de symétrie : quelles que soient leurs natures, mal comprises, les nombres de protons et d'électrons sont les mêmes, l'Univers actuel étant globalement électriquement neutre !

Ère des photons (10^2 s- 10^6 ans)

À l'âge d'environ 10^2 s, la température avait baissé jusqu'à une valeur permettant aux protons et neutrons libres de fusionner pour former des noyaux atomiques. C'est de début de la période de la nucléosynthèse cosmologique, avec la création de noyaux de deutérium, d'hélium 3, de tritium, d'hélium 4 (2 protons et 2 neutrons), de béryllium 7 et de lithium 7. La création cosmologique de l'hélium 4 est très importante pour l'**évolution chimique** ultérieure de l'Univers via les **étoiles**. Une quantité en masse de 25 % d'hélium a été fabriquée par la nucléosynthèse cosmologique durant une courte période, entre les âges d'environ 10 et 1 000 s.

La nucléosynthèse cosmologique a été limitée dans le temps. Avant ~ 10 s, la température et donc l'énergie des particules étaient trop élevées pour que la fusion nucléaire soit possible (vitesse des particules trop grandes). Après $\sim 1 000$ s, elles étaient devenues trop faibles pour vaincre le *barrage coulombien* (les protons ont la même charge, il y a donc répulsion). Dans l'Univers primordial comme dans le cœur des étoiles, pour que la fusion des protons soit efficace, il faut une température du milieu comprise de façon simplifiée entre environ 10^6 et 10^9 °K. Il est important de souligner que la composition chimique globale est en parfait accord avec les prédictions théoriques de la nucléosynthèse cosmologique. C'est un des tests cosmologiques majeurs, qui tient aussi compte, comme un « correctif », de l'évaluation de la quantité des mêmes éléments chimiques produits dans les étoiles au cours des milliards d'années de l'évolution de l'Univers.

À l'âge d'environ 70 000 ans, correspondant à un redshift z d'environ 4 000, le contenu énergétique était réparti de façon environ égale entre le rayonnement et la matière (cf. **Évolution de l'Univers I**).

À l'âge de 380 000 ans ($T = 3 000$ °K, $z = 1 100$) l'énergie des particules avait assez baissé pour que les premiers atomes, ceux de l'hydrogène, se forment par combinaison des protons et des électrons. C'est l'époque de l'émission du FDC qui constitue un autre des tests cosmologiques fondamentaux. La formation des atomes a produit un découplage entre rayonnement et matière. Avant leur formation, les photons se déplaçaient dans un milieu ionisé (cf. **Éléments chimiques**) et étaient

continuellement diffusés par les interactions électromagnétiques; le milieu était opaque. Après la formation des atomes, qui sont électriquement neutres, les photons du rayonnement électromagnétique ont pu se déplacer dans un milieu devenu transparent. C'est la raison pour laquelle le FDC est observable, encore actuellement.

Ère de la matière (10⁶-10¹⁰ ans)

Les fluctuations observées aujourd'hui dans le FDC sont la trace des différences de densité de la matière à l'époque de son émission. Depuis lors, la matière a évolué indépendamment du rayonnement. Ces régions de surdensité ont attiré gravitationnellement la matière environnante, produisant une augmentation du contraste en densité, à l'origine des grandes structures de matière et des galaxies (cf. **Distribution des galaxies**). Dans ce cadre, la **matière noire**, si elle existe, a forcément joué un rôle, en accord avec ses propriétés supposées.

Entre la combinaison des protons et des électrons en atomes d'hydrogène, symbolisée par l'émission du FDC, et la formation des premières étoiles, l'Univers était sombre; c'est l'époque des âges sombres qui s'est étendue d'environ 10⁶ à 5·10⁸ ans.

Les premières étoiles, constituées quasi uniquement d'hydrogène et d'hélium, se sont formées par

effondrement des nuages de gaz à un âge situé à environ 500 millions d'années. Les plus massives d'entre elles ont produit du rayonnement très énergétique (UV et X) qui a ionisé le gaz environnant. C'est l'époque de la *réionisation*. En conséquence, l'Univers était complètement ionisé avant l'émission du FDC, il a ensuite été neutre pendant les âges sombres, puis a été réionisé par la première génération d'étoiles.

Ère du vide (> 10¹⁰ ans)

Au-delà d'un âge de 10 milliards jusqu'à aujourd'hui, la poursuite de la dilatation de l'Univers a fait baisser sa densité moyenne jusqu'à sa valeur actuelle (cf. **Évolution de l'Univers I**). Cette époque récente est parfois appelée ère du vide. Sa température globale moyenne est donnée par l'observation de l'évolution du FDC, soit actuellement de 2,726 °K ou -270,424 °C. Mais il s'agit bien sûr d'une température globale, hors des régions occupées par les étoiles et le gaz dans les galaxies.

Cette description des ères de l'Univers repose sur des notions complexes de physique. Il est heureux dans ce contexte que toute cette histoire, au sens noble du terme, se résume par la simple question du chapitre précédent : pourquoi le ciel est-il noir la nuit ?

Équivalence masse-énergie

Selon la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein de 1905, tout système immobile de masse m possède une énergie de masse E donnée par la fameuse relation donnant l'*équivalence masse-énergie*:

$$E = m \cdot c^2$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Avec m en kg et c en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, E est en joule.

Pour les particules, E est en général donnée en électronvolt (eV), avec:

$$1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

En raison de l'équivalence entre masse et énergie décrite par cette équation, la masse des particules est souvent

donnée en eV/c^2 : par exemple la masse du proton au repos, $1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, vaut $938,272 \text{ MeV}/c^2$ en termes d'énergie de masse.

Cette équation est sans doute l'une des plus connues, même si son sens profond est parfois (souvent ?) ignoré. Elle a révolutionné notre vision de la physique, et du monde, car elle met en relation une énergie (à gauche) avec une masse (à droite). Le terme c^2 est très grand ($9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), l'énergie équivalente contenue dans un gramme de matière est donc énorme. À toute variation Δm de la masse du système au repos, correspond une variation ΔE de son énergie, et réciproquement, selon l'expression: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. C'est la raison de la puissance phénoménale dégagée par les bombes nucléaires, par conversion de masse en énergie.