



Une gigantesque toile d'araignée. C'est ainsi que se présente aujourd'hui l'Univers.

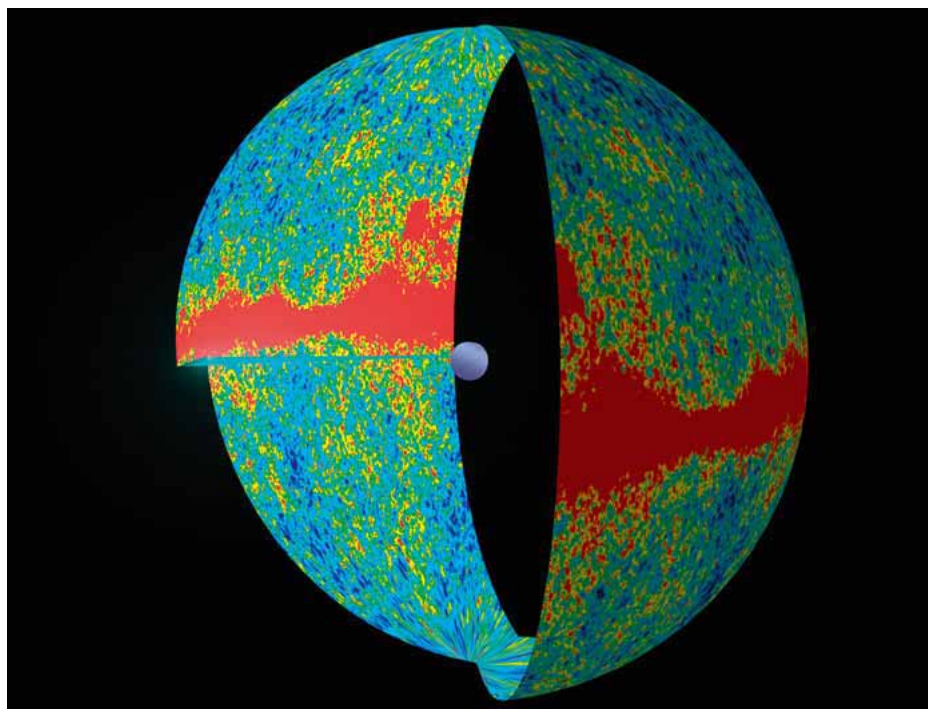
Essentiellement vide et froid, il est peuplé de galaxies concentrées le long de filaments aux croisements desquels se trouvent les plus gros objets connus : les amas de galaxies. Comment une structure aussi définie a-t-elle pu apparaître ? Le rayonnement fossile datant des premiers âges de l'Univers montre au contraire une « soupe » chaude, dense et homogène dans toutes les directions. D'infimes variations locales de densité auraient donné naissance aux futurs objets, principalement par le jeu de la gravité ralentie par l'expansion. Le moteur de cette évolution est la force de gravité qui conduit la fameuse matière noire, toujours mystérieuse, à s'effondrer dans de grandes structures filamenteuses où la matière « ordinaire » est à son tour entraînée. Étonnamment, alors que tant de questions demeurent ouvertes, celles de la forme et de la finitude de l'Univers pourraient recevoir rapidement des réponses.

L'Univers, une « soupe » homogène devenue une structure hiérarchisée

La grande histoire thermique de l'Univers

La révélation du fond diffus cosmologique a donné naissance à une nouvelle discipline : la cosmologie observationnelle. Depuis le satellite COBE, des données observationnelles peuvent enfin corroborer les modèles théoriques d'évolution de l'Univers. Les cosmologues projettent maintenant de nombreuses expériences pour affiner le scénario.

Vue d'artiste des observations, par le satellite Planck, du fond diffus cosmologique, ce rayonnement fossile dans le domaine des micro-ondes qui baigne tout l'Univers. Dans cette image, la Terre est placée au centre de la sphère céleste. Le satellite, à chaque rotation, observe (peint) sur la sphère céleste la carte du fond diffus cosmologique.



Aujourd'hui, les astronomes observent un Univers raréfié, froid et transparent à la lumière. Essentiellement constitué de grands vides, il ne comprend en moyenne que quelques **atomes** par mètre cube. À l'ombre du rayonnement des astres brillants, la température du rayonnement ne dépasse pas 2,763 K, soit environ -270 °C. Enfin, l'Univers est en expansion : dans toutes les directions, les **galaxies** lointaines s'éloignent les unes des autres.

Il n'en a pas toujours été ainsi. Un observateur imaginaire remontant le temps verrait l'Univers se contracter, et devenir plus dense, « se compresser ». Un physicien sait que lorsque l'on compresse de la matière, sa température augmente. Il en est de même pour l'Univers : il y a 13 milliards d'années, sa densité était telle que sa température atteignait celle de la surface du **Soleil**. Dans ces conditions, la matière ne se présente plus sous forme d'atomes mais de **plasma**, sorte de « soupe » de **photons**, de **noyaux** et d'**électrons** sans atomes. Une « soupe » certes très brillante car très chaude, comme le Soleil, mais complètement **opaque**. Les photons diffusent en effet incessamment sur les **électrons libres** d'un plasma et ne peuvent le traverser.

Au cours du temps, l'Univers s'est donc dilaté et refroidi. À un moment donné, la température est devenue tellement basse que les photons n'avaient plus assez d'énergie pour **ioniser** les atomes. Les électrons se sont alors recombinaison. Assez brutalement, l'Univers est devenu transparent aux photons. Depuis lors, ceux-ci se propagent en ligne droite et forment le fond diffus cosmologique **micro-onde** (FDCM), appelé également rayonnement fossile. Le fond diffus cosmologique, autour de 100 GHz, constitue donc une photo de l'Univers **primordial**, tel qu'il était à l'âge de 380 000 ans, au moment du « découplage électrons-photons » (figure 1).

Une « photo » pleine d'enseignements

Au premier regard sur cette image, le ciel semble briller uniformément : c'est ce que les Américains Arno A. Penzias et Robert W. Wilson⁽¹⁾ ont découvert en 1965, au moyen d'antennes radio, et que les cosmologues appellent maintenant le « monopôle » du FDCM (figure 2a). L'Univers primordial était donc extrêmement homogène. Un regard plus attentif, soustrayant la brillance moyenne de la carte du ciel, laisse apparaître une carte où dominent un point chaud et un point froid (la « composante dipolaire » du FDCM), plus de petites structures correspondant au rayonnement des poussières « chaudes » (environ 20 K !) de la **Voie lactée** (figure 2b). La composante dipolaire, conséquence du mouvement de la Terre, n'apporte pas d'information sur l'Univers primordial. Après soustraction de cette composante dipolaire, et quatre années de mesures, le satellite COBE

(1) Les Américains Arno A. Penzias et Robert W. Wilson ont obtenu le prix Nobel de physique en 1978 pour cette découverte.

(2) Les Américains John C. Mather et George F. Smoot ont obtenu le prix Nobel de physique en 2006 pour cette découverte.

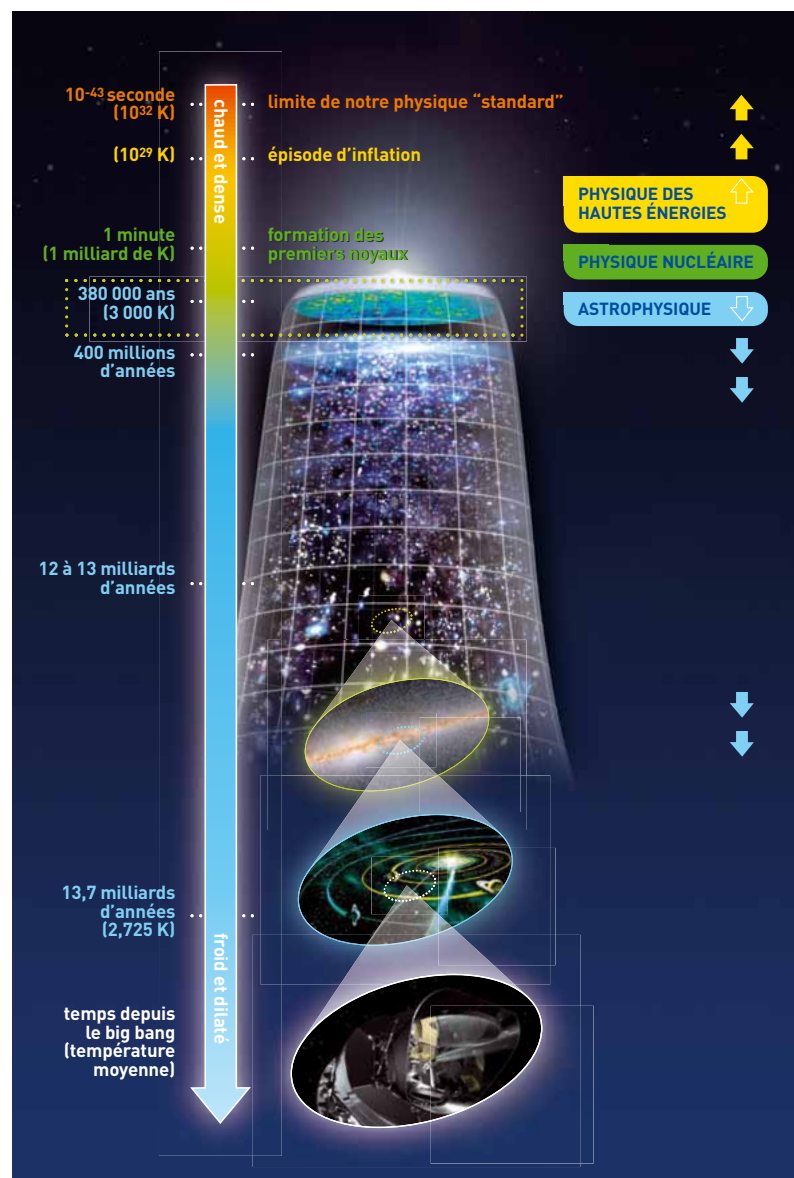


Figure 1. Cette figure résume en une image ce que savent les physiciens de l'histoire thermique de l'Univers.

(*Cosmic Background Explorer*) a pu révéler les minuscules variations de brillance du FDCM primordial⁽²⁾ (figure 2c). La bande rouge centrale correspond à l'émission des poussières du plan galactique, qui saturent complètement l'image. Plus récemment, le satellite WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) a encore affiné cette carte du ciel, donnant une image où la composante galactique est soustraite et les couleurs correspondent à des variations de température apparente de l'ordre de 50 μK – alors que la température moyenne est de 2,763 K (figure 2d).

L'extraordinaire homogénéité en brillance de la carte de COBE souligne donc que l'Univers était extrêmement homogène en température, et donc en pression, au moment du découplage. Les détails infimes, sur la carte de WMAP, sont des variations locales de température apparente, et donc de pression, du plasma à ce moment. Si minimes soient-elles, ces variations ont donné naissance aux grandes structures de l'Univers : galaxies, **amas de galaxies** et filaments.

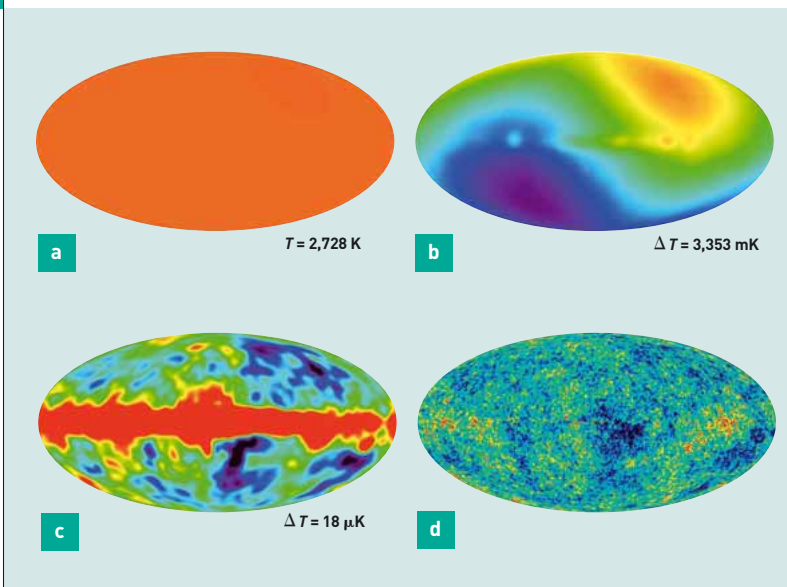


Figure 2. Cartes du ciel montrant les structures du fond diffus cosmologique à différents niveaux de détails.

Modéliser l'Univers primordial

Personne ne peut témoigner de l'histoire de l'Univers aux époques primordiales. Aussi, les cosmologues ont-ils recours à des **modèles**. Ils imaginent un scénario qui, obéissant aux lois de la physique constatées sur Terre, reproduit autant que possible toutes les observations disponibles de l'Univers primordial et de l'Univers récent. La **nucléosynthèse primordiale** apprend par exemple que l'Univers a connu une température supérieure à 10^{10} K, et depuis est en expansion. Or les cosmologues savent mesurer précisément les variations de densité et de pression du plasma au moment du découplage. Ils supposent alors que dans l'Univers très primordial, des mécanismes de physique **quantique** ont produit spontanément des fluctuations de densité aléatoires mais minimales dans le plasma primordial. En utilisant les lois de la mécanique des fluides, ils ont calculé l'évolution de ces fluctuations de densité sous l'action des principales forces en présence : la **gravité** et les forces de pression, essentiellement dues à cette époque au gaz de photons. La photo du FDCM permet enfin de confronter ces modèles à la réalité de l'époque.

La naissance des premiers objets

Après le découplage, les photons du FDCM n'interagissent plus avec les atomes, ce qui supprime les forces de pression engendrées par le gaz de photons. La gravité travaille seule à creuser les surdensités, seulement modérée par la dilution générale du fluide de matière due à l'expansion de l'Univers. Des calculs montrent que, quand un grumeau de matière atteint une densité de 4,6 fois celle du fluide, il ne se dilue plus dans l'expansion de l'Univers mais s'effondre sur lui-même pour former un objet astrophysique : un **halo** de matière. Ce halo, dont la masse est dominée par sa composante de **matière noire**, sera le berceau des futurs objets astrophysiques **brillants** : **étoiles**, puis galaxies naines, qui en fusionnant les unes avec les autres

(ainsi que leurs halos) vont former les galaxies, puis les amas de galaxies.

Finalement, le FDCM permet donc d'observer les germes des grandes structures de l'Univers. Mais il y a plus ! Aux longueurs d'onde millimétriques, le monopôle du FDCM forme un écran brillant illuminant tous les objets astrophysiques. Si un photon du FDCM traverse un amas de galaxies, il rencontre un plasma chaud d'une température de quelques dizaines de millions de degrés sur des distances d'un million d'**années-lumière**. Il a alors une probabilité d'environ 1/10 000 de diffuser sur un électron du gaz chaud par **effet Compton**, et de voir ainsi son énergie augmenter. C'est l'effet Sunyaev-Zel'dovich⁽³⁾. Pour le détecter, il faut observer le ciel avec une **résolution angulaire** améliorée, et à plusieurs fréquences. Dans la direction d'un amas, aux fréquences inférieures à 220 GHz, la carte du ciel montre une tache froide, correspondant à l'**absorption** des photons du FDCM. En revanche, aux fréquences supérieures, elle présente une tache chaude due à l'effet Sunyaev-Zel'dovich. Cela permet de distinguer un amas de galaxies des inhomogénéités primordiales du FDCM.

La grande traque

Le Service de physique des particules du CEA/Irfu s'est donc engagé dans les expériences en ballon stratosphérique Olimpo (figure 3) et, avec le Service d'astrophysique de l'Irfu, dans le satellite Planck⁽⁴⁾ (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Ces expériences fourniront deux catalogues complémentaires d'amas de galaxies. Le satellite Planck, lancé en mai 2009, détectera les amas massifs ou proches, et couvrira tout le ciel. L'instrument Olimpo, qui devrait prendre ses premières données en 2010, ne couvrira que 300 degrés carrés du ciel, mais avec une meilleure profondeur.

Or en cosmologie, du fait de la vitesse finie de la lumière, voir loin signifie voir vieux. Ces catalogues

(3) Effet prédit en 1970 par les physiciens soviétiques Rashid A. Sunyaev et Yakov B. Zel'dovich.

(4) Pour en savoir plus sur ce satellite, voir <http://public.planck.fr>.



Figure 3. Lancement, depuis l'Antarctique, du ballon stratosphérique Boomerang, précurseur de l'expérience Olimpo. La détection du fond diffus cosmologique par Olimpo sera réalisée à l'aide de quatre plans de bolomètres placés au foyer d'un télescope de 2,6 m de diamètre.

d'amas de galaxies retraceront donc la distribution en masse des amas au cours des âges, et permettront aux cosmologues de vérifier si leurs modèles de formation de structures, construits et sélectionnés pour reproduire les mesures des inhomogénéités du FDCM, prédisent bien la bonne abondance d'amas de galaxies dans l'Univers contemporain et au cours du temps... Le croisement de ces données avec celles des autres observations cosmologiques, telles que la distribution de brillance des **supernovae** de type Ia au cours des âges, contribuera à la sélection de modèles cosmologiques valides, et finalement à l'élaboration d'une histoire fiable de la genèse de notre Univers.

Vers un scénario détaillé

L'avenir des expériences d'observation du FDCM prend deux orientations. À court terme, de nombreuses expériences au sol (*South Pole Telescope, Atacama Cosmology Telescope...*) doivent cartographier le FDCM à très haute résolution angulaire, c'est-à-dire mieux que la **minute d'arc**. Ces expériences nécessitent des miroirs de grande taille (environ 10 mètres) et des technologies de

pointe pour les détecteurs (les **bolomètres**). Elles devraient aboutir à la détection de l'essentiel des amas de galaxies dans leur champ d'observation. À plus long terme, les équipes européennes et américaines proposent un satellite pour succéder à Planck – projets BPOL, CMBPOL – et des expériences au sol telles que BRAIN, EBEX et bien d'autres. Tous ces projets ont pour but de mesurer les composantes **polarisées** du fond diffus cosmologique, qui révéleront les mouvements de matière à l'époque de son émission. Ainsi, 17 ans après la publication des premiers résultats de COBE, qui marqua l'acte de naissance de la cosmologie observationnelle, une nouvelle communauté scientifique veut se donner les moyens d'écrire dans tous ses détails le scénario de la formation des grandes structures de l'Univers.

> Dominique Yvon

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