



HFI PLANCK

Un regard vers

L'origine de l'Univers

Principaux apports à la cosmologie

Ce que Planck nous a appris de l'univers jeune

La réionisation marque le premier milliard d'années de l'histoire du cosmos, quand les premières générations d'étoiles ont illuminé l'**Univers**. Planck nous raconte cette époque... du moins dans ses grandes lignes.

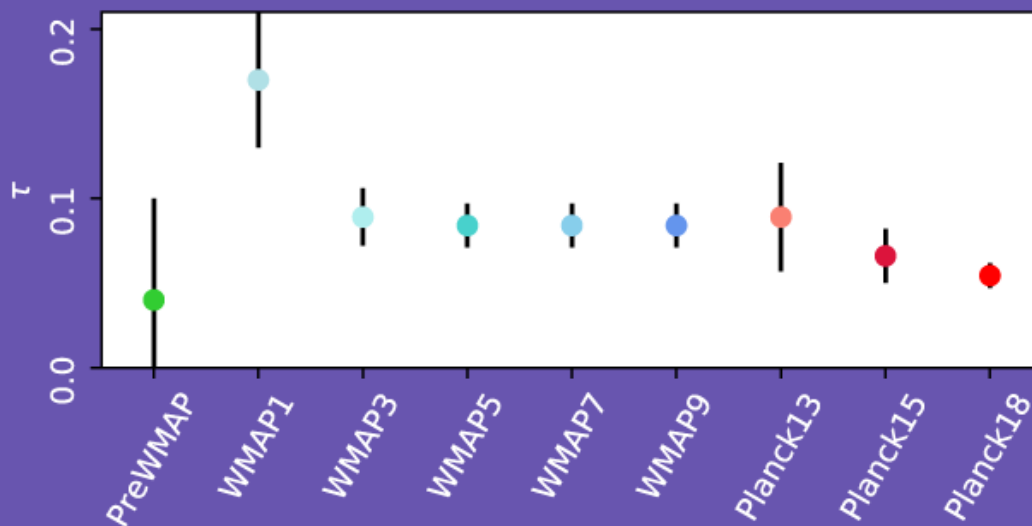
Si les fluctuations de température du **rayonnement** fossile sont plus importantes à certaines échelles que dans d'autres, c'est parce que les photons de ce rayonnement agissent de concert avec la matière ordinaire qui est parcourue d'immenses ondes de densité. Cette situation n'est possible, dans l'Univers primordial, que parce que la matière ordinaire est ionisée, ce qui favorise grandement les interactions entre matière et rayonnement. Mais à mesure que l'Univers se refroidit, il subit une transition assez brutale environ 380 000 ans après le Big Bang : les électrons de la matière ordinaire se combinent pour la première fois aux noyaux atomiques, un phénomène appelé, nonobstant le fait qu'il ne s'est jamais produit auparavant, recombinaison.

Mais la présence d'une bosse dans le spectre de puissance de polarisation E, aux très grandes échelles (vers le multipole $l = 10$), indique que l'univers était à nouveau ionisé environ 500 millions d'années plus tard. Cette seconde transition est appelée réionisation, ou fin des âges sombres. En effet la réionisation est a priori due, du moins en grande partie, à l'allumage des premières étoiles qui illuminent à nouveau le **ciel** qui s'était peu à peu assombri, l'aveuglant éclat du Big Bang s'atténuant à mesure que l'Univers se refroidissait.

Si l'Univers a subi ce phénomène de réionisation, alors les photons du **rayonnement fossile** ont eu une probabilité (faible) d'être à nouveau diffusés par les électrons longtemps après le **Big-Bang**. L'image que l'on voit du rayonnement fossile est ainsi légèrement voilée, ce que l'on peut caractériser quantitativement par un paramètre appelé profondeur optique et traditionnellement noté par la lettre grecque τ . C'est en analysant précisément de combien le rayonnement fossile est « voilé » que l'on peut connaître la profondeur optique et ainsi reconstituer des informations sur l'époque ou la durée du processus de réionisation.

Pour ce faire, il est indispensable d'avoir accès aux données de polarisation car les données de température ne permettent pas de distinguer l'effet spécifique de la profondeur optique d'autres phénomènes. C'est pourquoi Planck a permis des progrès substantiels sur la précision avec laquelle la profondeur optique est estimée, mais cela reste difficile : si les autres paramètres cosmologiques sont estimés par Planck seul avec une précision meilleure que le pour-cent, τ conserve encore une incertitude d'environ 13%.

La connaissance de ce paramètre τ est en principe redondante : connaissant l'état de l'Univers 380 000 ans après le Big Bang on pourrait, en théorie, prédire son évolution future, et donc l'époque d'allumage des premières étoiles, et donc la profondeur optique. Mais, en pratique, la formation des premières étoiles résulte de nombreux processus astrophysiques complexes et mal connus, aussi on procède dans l'autre sens : on détermine la profondeur optique par l'analyse du rayonnement fossile et on en déduit des contraintes sur le processus de formation des premières étoiles. De façon schématique, plus ces étoiles se font tard, plus ténu est le voile qui altère l'image du rayonnement fossile.



Légende : Évolution de l'estimation de la valeur de l'épaisseur optique τ en fonction des analyses de WMAP puis de Planck. L'ajout des données polarisées en 2015 puis les améliorations de l'analyse de ces données ont été particulièrement bénéfiques pour la connaissance de ce paramètre. *Crédits : ESA - collaboration Planck*

D'où vient le processus de réionisation ?

Dans les modèles les plus largement admis, les premières étoiles sont bien plus massives et plus chaudes que celles que nous connaissons (ce qui reste difficile à vérifier directement puisque de telles étoiles ont une durée de vie très courte et aucune d'elles n'a survécu jusqu'à présent). Du fait de leur température, ces étoiles ont une émission intense dans le domaine ultraviolet. Leurs photons ultraviolets sont émis depuis le lieu de naissance de ces étoiles, dans des galaxies toutes jeunes et relativement peu massives, et ces photons sont suffisamment énergétiques pour réioniser progressivement l'hydrogène de l'Univers tout entier entre 350 et 900 millions d'années après le Big-Bang. Après, ce sont les quasars, c'est-à-dire les cœurs de galaxies un peu plus évoluées où un trou noir supermassif engloutit d'importantes quantités de matière tout en émettant d'importantes quantités de rayonnement, qui prennent le relais pour réioniser l'hélium dans les trois premiers milliards d'années. La combinaison de mesures indirectes contraint la nature des sources à l'origine de la réionisation, et ainsi contraint la formation des premières étoiles et galaxies.

Il n'est cependant pas exclu que d'autres processus plus exotiques aient pu participer à la réionisation : particules instables aujourd'hui disparues, mini trous noirs produits lors du Big-Bang, etc., ce qui rend particulièrement intéressante l'étude de la réionisation : elle pourrait révéler l'existence de processus astrophysiques inattendus qui n'ont plus cours désormais.

Pourquoi est-il plus difficile de mesurer ce paramètre cosmologique ?

Cela tient à ce qu'on appelle la variance cosmique. Cette incertitude fait que les informations que l'on recueille sur l'Univers dans son ensemble sont principalement de nature statistique, et est donc soumise au fait que l'on dispose d'un nombre d'échantillons fini (quelle que soit la quantité mesurée) puisque le volume d'Univers auquel on a accès est fini. Cet effet est évident si on considère le cas d'un sondage d'opinion : si l'échantillon de personnes sondées est trop faible, la probabilité pour qu'il soit insuffisamment représentatif augmente. La solution serait de recommencer avec un échantillon plus grand, ou, pour les astrophysiciens, un autre Univers. Mais nous n'avons qu'un seul Univers observable, donc il faut s'en contenter. Le mieux que l'on puisse faire c'est de regarder tout le ciel – seul un satellite en a les moyens. Mais même dans ce cas, il faut tout de même enlever les régions où l'émission galactique domine et rend inexploitable les données de polarisation du rayonnement fossile qui sont

indispensables pour sonder la réionisation. Il reste ainsi environ les deux-tiers du ciel d'utilisables, sur un volume d'Univers grand, mais fini. Or la réionisation est un phénomène de grande échelle : impossible de savoir d'où venait un **photon** qui a été diffusé des centaines de millions d'années après le Big-Bang. C'est la raison pour laquelle l'effet de la réionisation – le « voile » qui s'ajoute à l'image du rayonnement fossile – ne se manifeste qu'à grande échelle. Or, des grandes échelles, il y en a peu sur tout le ciel et encore moins sur une portion de celui-ci, aussi il est impossible de savoir avec certitude si le voile que nous observons retranscrit fidèlement le processus qui lui a donné naissance.

De surcroît, il est difficile de bien maîtriser les incertitudes liées à l'instrument et aux émissions d'avant-plan (même en-dehors du plan galactique, il existe des sources de polarisation d'avant-plan). Et le signal recherché est très faible : quelques dixièmes de milliardième de degré au pic dans le spectre en polarisation... Les résultats définitifs de Planck ne sont plus très loin de la limite « ultime » permise par ses instruments. Pour faire un peu mieux, il faudra un autre satellite, plus sensible, dédié à la mesure de la polarisation.

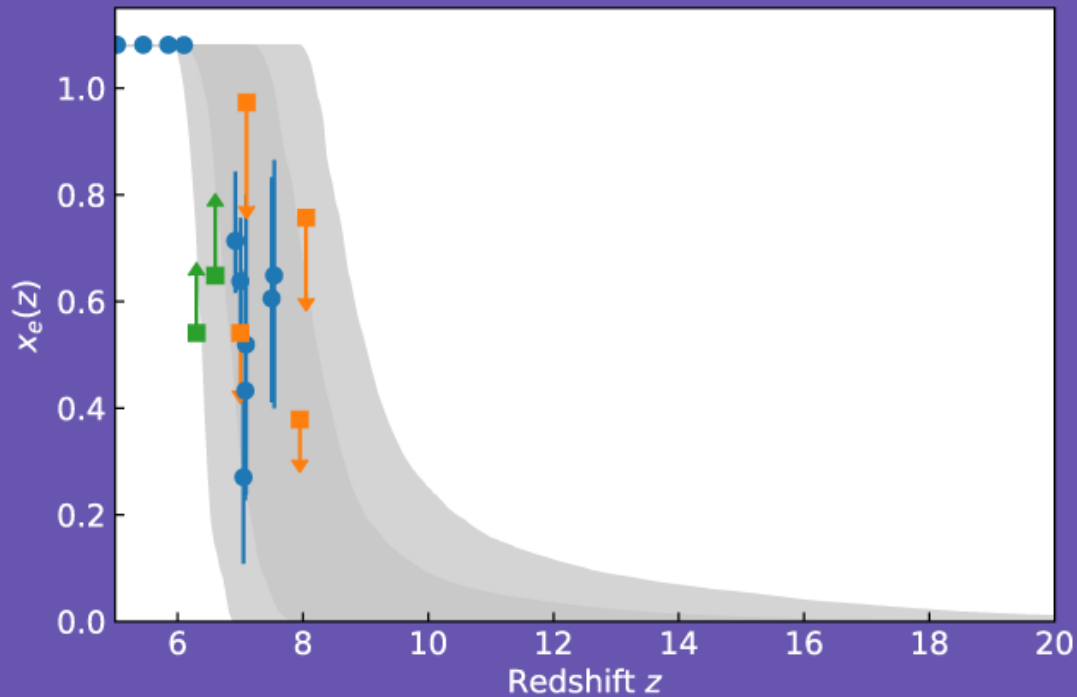
On peut cependant également étudier la réionisation par d'autres biais. Un autre signal est laissé aux petites échelles, c'est ce qu'on appelle l'effet Sunyaev-Zeldovich (ou SZ) cinétique où on étudie comment le halo de matière entourant les amas de galaxies lointains altère localement les propriétés du rayonnement fossile.

Que dit Planck sur l'histoire de la réionisation ?

Même sujettes à des incertitudes frustrantes, les informations sur la réionisation tirées du rayonnement fossile sont cependant très complémentaires aux autres sources d'informations disponibles, par exemple la mesure du flux ultraviolet des galaxies les plus distantes connues et donc vues à des époques très anciennes où le processus de réionisation était déjà entamé.

Les observations récentes pointent vers une réionisation plutôt « tardive et rapide ». En effet le signal en polarisation est faible en amplitude, et donc plutôt vers les plus grandes échelles angulaires, indiquant une réionisation tardive. Nous n'avons que des limites supérieures en ce qui concerne la mesure de l'effet SZ cinétique qui se serait produit pendant la réionisation, suggérant une réionisation relativement rapide. Ces résultats sont par ailleurs en accord avec les informations que l'on peut extraire de la mesure de l'effet de **lentille gravitationnelle** sur le rayonnement fossile.

Pour l'heure, il semble que des processus conventionnels seuls (allumage des premières générations d'étoiles chaudes et massives) soient suffisant pour expliquer la réionisation de l'Univers et que le recours à d'autres processus plus exotiques ne soit pas nécessaire : le scénario simple, basé sur l'évolution des galaxies est satisfaisant, avec la libération de suffisamment de photons ultraviolets pour ioniser tout l'Univers. Les futures observations basées sur la raie d'émission de l'hydrogène à 21 cm permettront d'observer l'Univers à des époques où cette réionisation s'est produite et ainsi devraient permettre d'affiner ce scénario. Pour ce faire, un projet international ambitieux dénommé SKA, pour Square Kilometer Array, devrait voir le jour dans la décennie à venir. Il s'agit de construire un réseau de plusieurs milliers de radiotélescopes, représentant, comme le nom du projet l'indique, une surface collectrice de l'ordre d'un kilomètre carré, qui opérera aux fréquences correspondant à celles d'une raie d'émission caractéristique de l'hydrogène, dont la longueur d'onde est d'ordinaire de 21,106 cm (d'où son nom). La fréquence correspondante ne sera pas de 1420 MHz, mais dix à vingt fois plus faible (voire encore plus) en raison du grand décalage vers le rouge des galaxies observées, permettant ainsi de réaliser une véritable tomographie de l'Univers jeune.



Légende : Fraction du nombre d'électrons libres par rapport au nombre total de noyaux d'hydrogène dans l'univers en fonction du temps (représenté par le redshift z). Les zones grises correspondent aux contraintes mises avec les données de Planck alors que les symboles sont obtenus avec diverses méthodes et diverses données astrophysiques. Il y a un accord global mais la dispersion illustre bien la difficulté de l'estimation. Aujourd'hui, à très bas redshift, cette fraction est supérieure à 1 car l'hélium est également ionisé et donc fournit des électrons libres en nombre total plus grand que les seuls noyaux d'hydrogène. À très grand redshift (non représenté ici), cette fraction était également à sa valeur maximum, avant de baisser brutalement, 380 000 ans après le Big Bang, lors de la recombinaison. *Crédit : ESO - collaboration Planck*

Pour en savoir plus :

- [La réionisation](#)
- [Histoire de l'Univers](#)