

## Le rayonnement primordial

Georges Paturel, g.patu@orange.fr

*Le rayonnement primordial, ce premier cri électromagnétique de l'univers en train de naître, nous enveloppe aujourd'hui. Il avait été imaginé dès les années 1950 par G. Gamow et ses collaborateurs, puis plus tard par Dicke et Peebles dans le cadre de la théorie de G. Lemaître. Il a été détecté expérimentalement, de manière fortuite, en 1965, par deux physiciens, Penzias et Wilson. Il semble provenir de toutes les directions de l'espace de manière quasiment isotrope, comme une sorte de bruit de fond. La distribution d'énergie en fréquence obéit à celle d'un rayonnement thermique (corps noir). Un modèle simple de l'expansion de l'Univers, permet de comprendre l'origine isotrope de ce rayonnement. Les calculs de l'époque à laquelle ce rayonnement a pris naissance et de la température à laquelle il s'est produit, sont expliqués à partir des connaissances de physique classique. Enfin, les observations modernes des caractéristiques de ce rayonnement obligent à analyser son lien avec la formation des grandes structures de l'univers.*

La science n'est pas un dogme. Tout postulat, toute idée, doivent être testés par l'expérience, avant d'être contestés. De ce point de vue, le rayonnement dont nous allons parler est une excellente illustration. La présentation sera faite dans le cadre admis aujourd'hui, celui du modèle cosmologique standard basé sur deux piliers différents : la relativité générale et la mécanique quantique.

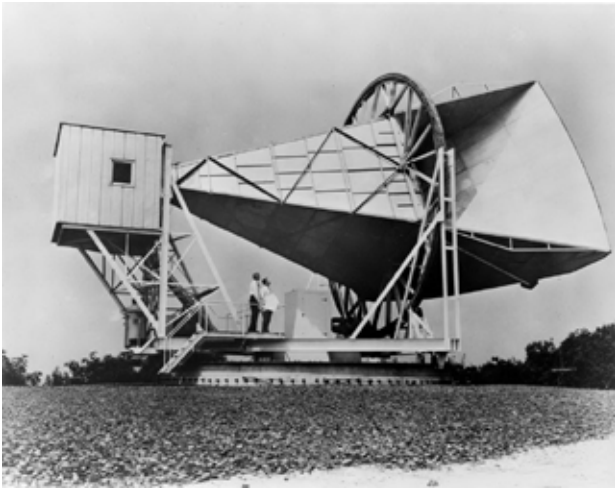


Fig.1. Le radiotélescope de Penzias et Wilson.

### Rappels historiques

Ce rayonnement a été détecté en 1940. Mais les esprits n'étaient pas prêts pour l'interpréter. En effet, dans ces années-là, Adams et Dunham détectèrent, dans le milieu interstellaire proche, des raies spectrales de molécules qui furent identifiées par Wilson et Herzberg comme étant des raies des molécules CH, CH<sup>+</sup> et CN. Voici ce que Herzberg écrivait en 1950 :

« Du rapport d'intensité des raies [...] découle

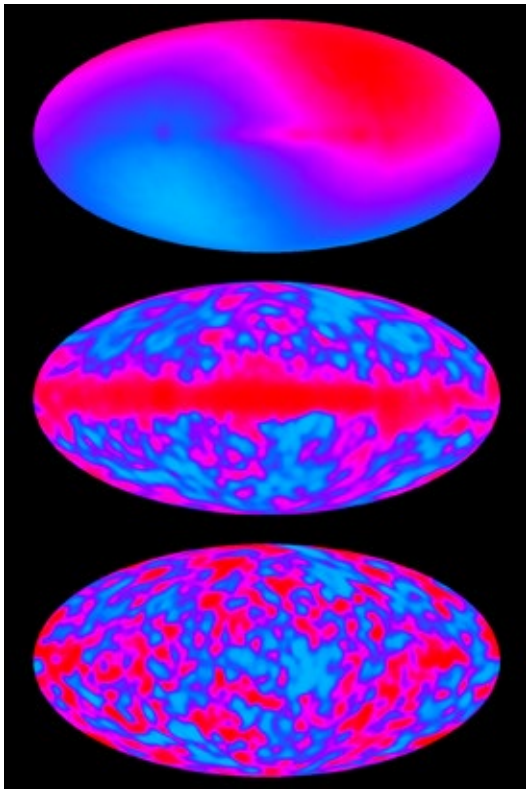
une température de rotation de 2,3 K, qui n'a naturellement qu'une signification restreinte. »

À cette époque, l'expansion de l'Univers était déjà admise comme un fait. Les premiers spectres des nébuleuses, effectués par V. Slipher dès 1915, montraient que les nébuleuses spirales lointaines présentaient un décalage du spectre vers les grandes longueurs d'onde, du côté du rouge. Ce *redshift* suggérait qu'elles s'éloignaient de nous, en vertu de l'effet **Doppler-Fizeau**. L'astronome E. Hubble démontra en 1925 qu'il existait des nébuleuses extérieures à notre Galaxie (notre Voie lactée). On a appelé ces nébuleuses extragalactiques des *galaxies*. Une classe de galaxies était bien reconnaissable : celle des galaxies spirales. Les résultats de V. Slipher suggéraient la conclusion plus générale, que toutes les galaxies nous fuyaient. Or justement les théoriciens, dont G. Lemaître en 1927, avaient prévu que l'univers pouvait se dilater, « comme un gaz dont les galaxies seraient les molécules » (sic). Les galaxies nous fuyaient et se fuyaient mutuellement, car aucun observateur n'est au centre de cette fuite (l'anthropocentrisme n'était déjà plus défendable !).

C'est G. Gamow et ses collaborateurs qui les premiers en tirèrent les conséquences en 1949. Dans un lointain passé, l'univers devait être plus condensé et donc plus chaud. Il devait en résulter un rayonnement observable aujourd'hui, à une température de quelques kelvins (5 K précisément).

À peu près à la même époque les laboratoires de la *Bell Compagny* développaient un récepteur radio très sensible pour communiquer avec les satellites. Il s'agissait d'une sorte de radiotélescope en forme de

cornet (figure 1), capable de pointer n'importe quelle région du ciel. Quand le radiotélescope eut terminé sa mission, en 1963, deux jeunes radioastronomes, Penzias et Wilson, utilisèrent l'instrument pour faire des observations astronomiques à grandes longueurs d'onde (plusieurs cm). Ils constatèrent qu'il y avait un bruit de fond qui ne dépendait pas de la région observée. Ils s'ingénierent, avec une grande ténacité, à réduire ce bruit parasite, mais en vain. En mangeant à la cantine, ils parlèrent de ce problème à un collègue, B. Burke, qui avait entendu parler d'un rayonnement d'origine cosmique lors d'un séminaire.



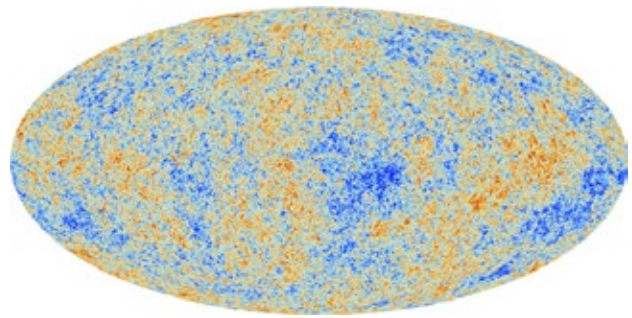
**Fig.2.** Projection des variations de température du rayonnement cosmologique sur l'ensemble du ciel, en coordonnées galactiques obtenue par le satellite COBE.

**En haut :** Données brutes (anisotropie dipolaire).

**Au milieu :** Après correction dipolaire (anisotropie due à notre Galaxie).

**En bas :** Après correction totale.

En effet, R. Dicke et J. Peebles, avaient été conduits à la même conclusion que celle de Gamow, mais dans un modèle d'univers oscillant entre expansion et contraction. Finalement, après quelques échanges, Penzias et Wilson comprirent que le bruit de fond qu'ils avaient mesuré était bel et bien d'origine cosmique. D'autres observations, à d'autres longueurs d'onde (de 2,6 mm à 21 cm), montrèrent que ce rayonnement ressemblait à un rayonnement thermique *de corps noir* à une température de 3 K, comme l'équipe de Gamow l'avait imaginé. En 1978, Penzias et Wilson furent récompensés par le



**Fig.3.** Après correction totale, observation avec une haute définition angulaire par le satellite Planck.

prix Nobel.

Le rayonnement qu'ils observèrent, est quasiment *isotrope* une fois corrigé d'une anisotropie *dipolaire* (figure 2a), interprétée comme résultant du mouvement du Soleil par rapport au référentiel de la source du rayonnement. La variation dipolaire de température est de  $\Delta T/T = 0,001$  conduisant, d'après la **loi de Wien** ( $\lambda_{\max} T = \text{constante}$ ) pour un corps noir et avec la relation **Doppler-Fizeau**, à une vitesse de module 300 km/s. La direction est trouvée par l'orientation du dipôle observé. Une autre correction doit être apportée. Elle provient de notre Galaxie elle-même dont l'émission radio brouille le signal du rayonnement (figure 2b). Finalement (figures 2a et 3), le rayonnement est remarquablement isotrope, avec des fluctuations de seulement  $\Delta T/T = 0,3 \times 10^{-5}$ .

Après les résultats obtenus par satellite (COBE, WMAP et PLANCK), la température du rayonnement est évaluée à :

$$T = 2,726 \pm 0,01 \text{ K}$$

Le rayonnement suit parfaitement la loi du *corps noir* découverte par M. Planck et à l'origine de la mécanique quantique.

Peut-on comprendre pourquoi ce rayonnement semble provenir de toutes les directions avec la même intensité ? Peut-on prévoir la température à laquelle ce rayonnement s'est produit ? Quelle information peut-on en tirer sur le début de notre univers ? C'est ce que nous allons voir.

## Modèle d'évolution de l'univers

A. Einstein en imaginant la théorie de la relativité a été conduit à travailler non pas avec un espace et un temps séparés, mais avec un espace-temps, où le temps et l'espace sont imbriqués. La raison profonde vient du fait que quand deux points sont éloignés dans l'espace, ils sont *ipso-facto* éloignés dans le temps, à cause de l'hypothèse fructueuse de la constance de la vitesse de la lumière, considérée comme une vitesse que les interactions physiques ne peuvent pas

dépasser. Dans cette théorie, la gravitation est décrite comme une courbure de l'espace-temps.

On peut décrire notre univers en expansion par un modèle géométrique simple (voir l'encadré A page 24 pour les calculs). Ce modèle souffre de bien des critiques, mais il correspond, à ce qu'on imaginait au début de la découverte de l'expansion. La plus importante critique est qu'il donne l'idée que l'espace est très courbé, alors que nous verrons que ce n'est pas le cas. Plus loin, nous corrigerons ce modèle pour donner une représentation plus conforme à ce qu'on imagine aujourd'hui. Pour l'instant, il nous permettra de comprendre les faits observés, et en particulier pourquoi le rayonnement cosmologique nous vient de toutes les directions.

Nous ne pouvons pas nous représenter facilement l'espace-temps à quatre dimensions. Alors, imaginons un univers à deux dimensions (la surface sphérique d'un ballon de rayon  $R_0$ ). Tous les points de la surface sont équivalents. Le temps correspond à la croissance du ballon qui se gonfle. Déjà, nous pouvons représenter de cette façon le fait que chaque point de la surface s'éloigne de tous les autres. Il n'y a pas de point privilégié. Il n'y a pas d'observateur privilégié, comme l'exige le principe relativiste. L'extérieur du ballon est le futur, l'intérieur le passé. Le présent n'existe pas globalement. Chaque observateur a son présent ponctuel. Dans un passé lointain, la surface du ballon était plus petite. Or cette surface est l'équivalent du volume de notre univers réel. Ce modèle décrit bien le fait que dans un passé lointain, le volume de l'univers était plus petit, donc plus chaud.

Imaginons un individu plat A, à la surface du ballon, observant un autre individu B. A verra B tel qu'il était dans le passé, puisque l'information lui parvient à la vitesse de la lumière, donc avec un certain retard. A voit donc B en B' sur un ballon de plus petit rayon. Si A regarde d'autres individus de plus en plus lointains, comme C, il les verra en C'' sur des ballons de plus en plus petits. À la limite, il devrait voir l'ultime individu sur un ballon quasiment ponctuel, en O, au centre de son ballon univers. Il est facile de comprendre que tous les individus situés à cette même distance ultime seraient vus en ce même ballon ultime, quelle que soit la direction dans laquelle A a observé. Ce ballon ultime serait son horizon absolu, visible *dans toutes les directions*. L'abbé Lemaître l'avait appelé, avec peut-être un soupçon de mysticisme, *l'atome primitif*, car il aurait donné naissance à l'univers dans un formidable Big Bang. Notre modèle fait comprendre aussi que le Big Bang

ne s'est pas produit en un point de l'univers, mais qu'il *était* l'univers tout entier. Nous ne le voyons plus comme il était, très chaud, car il s'est refroidi au cours de l'expansion de l'univers. Nous le voyons comme un rayonnement très froid, comme prédit par Gamow et observé par Penzias et Wilson.

Cet univers lointain était très condensé et très chaud. La matière n'y était pas encore structurée comme nous le voyons à petite distance, où les galaxies sont regroupées, sous l'effet de la gravitation, en amas, voire en superamas gigantesques. Les étoiles elles-mêmes n'étaient pas encore formées. L'univers était alors un gaz d'atomes primordiaux très chauds. En regardant encore plus loin, la température devient si élevée, que les atomes eux-mêmes sont cassés en particules élémentaires, protons et électrons, pour les plus importantes.

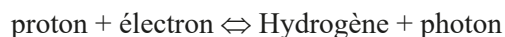
Quand tous les atomes d'hydrogène sont ionisés, l'espace ne laisse plus passer les images cohérentes. En effet, les électrons étant libres, ils absorbent la lumière pour la ré-émettre dans toutes les directions. On ne voit plus rien au-delà de ce mur de diffusion. Pour prendre une image triviale, le milieu ionisé se comporte comme le brouillard. Les images cohérentes ne passent plus, on ne voit que la lumière diffusée.

Au-delà de ce mur opaque, il y a un plasma très chaud, sans doute agité de vibrations d'ensemble, telle une goutte d'eau en apesanteur.

## La recombinaison

Si on prend l'évolution dans le sens normal du temps, du passé vers le futur, l'univers est d'abord opaque (aucune image cohérente ne passe) et en se dilatant il se refroidit et devient transparent quand les protons et les électrons se combinent en atomes d'hydrogène. C'est ce qu'on appelle *la (re)combinaison* ou encore, *l'époque de dernière diffusion*. Pour reprendre notre exemple du brouillard qui masque le paysage, on peut dire que, quand la température baisse, le brouillard devient givrant et se condense, rendant l'atmosphère transparente. L'univers fait un peu la même chose en se refroidissant.

Essayons d'en savoir plus sur la température au moment de la recombinaison. Il s'agit d'un équilibre au sens chimique du terme :



Les photons émis constituent le rayonnement cosmologique. Or la physique atomique de laboratoire nous dit quelle énergie  $\chi$  est nécessaire pour casser une liaison proton-électron, c'est-à-dire

pour ioniser un atome d'hydrogène. Cette valeur bien connue est  $\chi = 13,6$  eV (électron-volt). Avec cette information, on peut calculer la température à laquelle protons et électrons sont séparés. On peut alors savoir à quelle distance et à quelle époque ce rayonnement a été émis. Les calculs, sans être très complexes, dépassent le cadre d'une présentation élémentaire. Mais il me paraît dommage de ne pas les expliquer. En effet, entre les articles de spécialistes et les articles de vulgarisation, il y a peu d'articles intermédiaires, accessibles à ceux que ne rebutent pas, quelques équations. Ces explications sont données à la fin de l'article (encadré B page 25).

On trouve que la recombinaison s'est produite à une température de l'ordre de 4 000 K et que l'événement s'est produit environ 260 000 années après le Big Bang. Ce n'était pas la naissance de l'univers, mais la naissance des premiers atomes.

Par une approche similaire, on peut prédire la formation d'atomes primordiaux comme celles du deutérium, de l'hélium ou du lithium. Les rapports d'abondance calculés sont compatibles avec ceux observés aujourd'hui, ce qui est un succès remarquable du modèle.

La détection récente des ondes gravitationnelles, nous laisse espérer des observations au-delà du mur de la recombinaison. Ce serait fabuleux, car il doit s'y produire des événements importants, comme nous allons le voir.

## Les grandes structures

Nous avons vu que, après correction, le rayonnement cosmologique est remarquablement isotrope, avec des fluctuations de seulement  $\Delta T/T = 0,3 \times 10^{-5}$ . Que signifient-elles ? Comment évoluent-elles ?

Après les premières mesures faites depuis le sol, ou en ballon, il est apparu que le  $\Delta T/T$  dépendait de l'échelle de mesure. La méthode classique pour représenter la distribution d'une donnée (ici la température) sur une sphère (ici, la surface de dernière diffusion sur la sphère céleste), consiste en une décomposition en *harmoniques sphériques*. Il s'agit de fonctions constituant une base mathématique de représentation, comme le sont les fonctions trigonométriques pour représenter une onde sonore complexe. De la même façon, qu'une analyse de Fourier fait ressortir les fréquences les plus représentatives d'une onde sonore, l'analyse en harmoniques sphériques fait ressortir les échelles angulaires les plus représentatives (figure 4).

On suppose actuellement que ces fluctuations sont

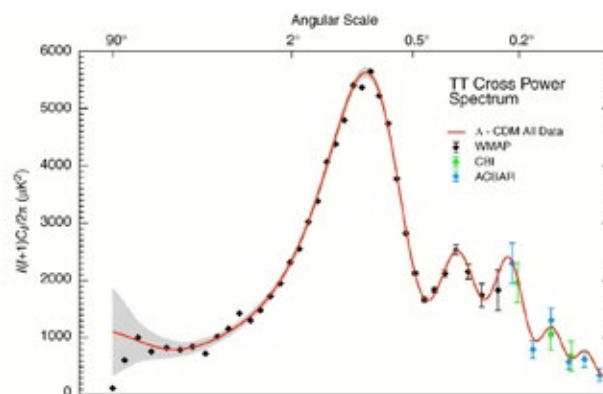


Fig.4. Le pic acoustique (histogramme des échelles angulaires) vu par Wmap.

produites avant la recombinaison, à l'époque où les particules formaient un plasma très chaud. Des ondes mécaniques, analogues aux ondes sonores, peuvent s'y propager à grande vitesse (image de la goutte d'eau en apesanteur). Il s'ensuit des fluctuations de densité de matière, à différentes échelles. Ce sont ces fluctuations qui pourraient être à l'origine des premières condensations de matière en nuages d'hydrogène neutre, puis en étoiles, dès la fin de la recombinaison. Il a été possible de mesurer ces fluctuations primordiales. Au fur et à mesure des progrès techniques, la courbe s'est affinée (figure 4), montrant un pic dominant (désigné par *pic acoustique*) pour une échelle angulaire de l'ordre de 1 degré, suivi par plusieurs pics secondaires pour des échelles de plus en plus petites.

Ces premières oscillations mécaniques, pourraient être amplifiées au cours de l'expansion par des processus non linéaires, qui devraient produire les surdensités observables aujourd'hui. Mais il semble très difficile d'y parvenir. Il faut ajouter un ingrédient supplémentaire, comme la matière noire, ou modifier de manière *ad hoc* quelques hypothèses fondamentales sur la dynamique.

Plusieurs questions sont posées par ces observations :

- pourquoi l'univers primordial est-il si homogène alors que les différentes régions ne peuvent pas communiquer entre elles pour homogénéiser leurs températures ? (problème de l'horizon) ;
- pourquoi l'univers primordial semble être euclidien sans courbure ? (problème de la platitude).

Une idée a été proposée par le physicien Alan Guth en 1980 pour résoudre ces deux problèmes par un seul mécanisme, l'*inflation*, selon laquelle l'univers aurait connu, avant la recombinaison, une expansion fulgurante. L'énergie aurait pu venir d'un changement de phase du plasma, un peu comme la surfusion. Si on refroidit, en dessous de zéro degré, une bouteille

d'eau très pure, avec beaucoup de précaution pour éviter les vibrations, l'eau reste liquide. Mais dès qu'une perturbation minimale se produit, l'ensemble de la bouteille se prend en glace, très brutalement. L'univers primordial pourrait s'être comporté ainsi.

À quoi cela correspondrait-il, dans notre modèle de ballon qui gonfle ? L'inflation, serait un gonflement initial extrêmement rapide. Notre ballon aurait un rayon quasiment infini. Le ballon serait tellement gros, que la surface au moment de la recombinaison serait plane et presque parfaitement lisse, comme on l'observe. La surface actuelle serait plane, mais déformée par la gravitation des structures (amas de galaxies, super-amas...). Cette idée, d'abord bien acceptée, est parfois contestée. Mais que trouver d'autre ?

## Conclusion

L'observation du rayonnement du fond cosmologique est la clef de voûte du modèle du Big Bang, cherchant à expliquer l'évolution de l'Univers depuis sa naissance jusqu'à aujourd'hui. Il reste encore bien des questions à élucider, mais il est fascinant de voir qu'avec notre physique, encore incomplète, il est possible de bâtir un modèle cohérent.

Doit-on pour autant être satisfait ? Ce n'est pas sûr. En effet, nos deux théories principales, relativité et mécanique quantique, n'arrivent pas à se rejoindre, même si elles cohabitent avec de fructueux échanges. Pour expliquer les observations, on est obligé d'introduire des ingrédients nouveaux, matière noire, énergie noire, inflation. Ces éléments ajoutés ont en commun d'apparaître comme de l'énergie (ou de la masse) inattendue et encore cachée. N'y a-t-il pas une faille dans les bases même de notre physique ? La nature nous réservera peut-être des surprises, comme elle a l'habitude de le faire. La science n'est pas un dogme. Il faut être prêt à remettre en cause les idées, mais sous le couperet impérieux de l'expérience.

## Bibliographie

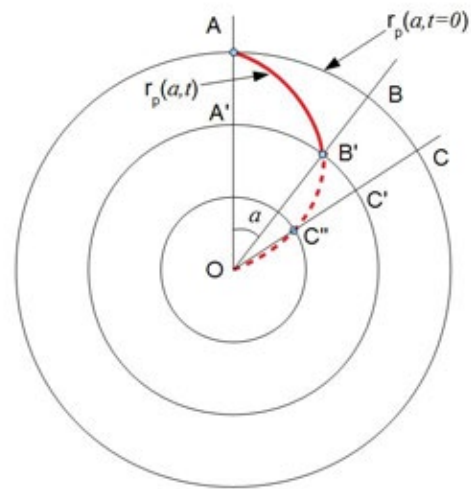
*Le rayonnement cosmologique*, M. Lachièze-Rey et E. Gunzig, Ed. Masson, 1995 (très complet et très technique).

*L'univers*, A. Blanchard, Ed. Flammarion (Dominos), 1995 (assez facile à lire et bien illustré).

■

## Encadré A

### Un modèle simplifié



La distance entre un observateur A et une galaxie lointaine B se mesure en intégrant le temps de parcours des photons  $c dt$  le long de l'arc B'A (en rouge sur la figure). C est la distance propre  $r_p(a,t)$  le long de la géodésique tracée par les photons.

La cosmologie est décrite par la métrique ( $ds$ ) dite de Robertson-Walker. Cette métrique s'écrit pour les photons ( $ds = 0$ ) dans une direction donnée :

$c dt = R(t) f(a) da$  où  $f(a)$  est une fonction connue de la distance *co-mobile*,  $a$ , invariable avec le temps. En intégrant le membre de gauche sur le temps de parcours des photons de B' à A on trouve :

$$r_p(a,t) = R(t) X(a)$$

où  $X(a)$  est l'intégrale de  $f(a) da$  sur le même trajet. En normalisant par l'équation écrite pour  $t = 0$ , on a :

$$r_p(a,t) = \frac{R(t)}{R_0} r_p(a,t=0)$$

qui exprime que toute distance cosmique augmente avec le temps, proportionnellement au facteur d'échelle  $R(t)$ .

En effet, en dérivant cette expression par rapport au temps, on obtient la loi de Hubble-Lemaître :

$$V = H(t) \cdot r_p(a,t) \text{ où } H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR}{dt}$$

ou plus simplement pour  $t = 0$  :

$$V = H_0 r$$

Un *modèle cosmologique* fixe la fonction  $R(t)$ . Par exemple, dans le modèle de Einstein-de Sitter,  $R(t)$  est proportionnel à  $t^{2/3}$ .

## Encadré B

### La recombinaison en équation

#### Prérequis

Les grandeurs indexées par zéro correspondent au temps actuel de l'observateur. Les valeurs non indexées correspondent à celles observées dans l'univers lointain.

Définition conventionnelle du *redshift*

$$z = -\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \quad (B1)$$

Relation entre z, R et la température (déduite de la métrique de Robertson-Walker appliquée aux photons : ds = 0 et de la loi du corps noir<sup>1</sup>)

$$1 + z = R_0 / R = T / T_0 \quad (B2)$$

Masse volumique de l'univers en fonction de R et T (déduit des équations de Friedman-Lemaître et de B2)

$$\frac{\rho}{\rho_0} = (R_0 / R)^3 = (T / T_0)^3 \quad (B3)$$

#### La recombinaison

C'est un équilibre au sens chimique du terme, entre protons, électrons et atomes d'hydrogène :



Les photons émis constituent le rayonnement cosmologique. On écrit la relation liant les nombres d'entités par unité de volume sous la forme :

$$\frac{n_H}{n_p n_e} = f(T)$$

Les quantités propres à chaque type de particule, sont notées avec un indice H, p ou e. La physique statistique nous fournit l'équation de Saha (cf. Wikipedia) qui concerne justement l'ionisation d'un plasma :

$$\frac{n_H}{n_p n_e} = \frac{g_H}{g_p g_e} \left( \frac{2\pi m_e k}{h^2} \right)^{-3/2} T^{-3/2} \exp\left(\frac{\chi}{kT}\right)$$

k est la constante de Boltzman et h la constante de Planck, m<sub>e</sub> est la masse de l'électron. Les quantités g donnent le nombre d'états de spin. On a :

$$g_p = g_e = 2 \text{ (2 états de spin } \uparrow, \downarrow)$$

$$g_H = 4 \text{ (4 états de spin } \uparrow\downarrow, \uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow, \downarrow\uparrow)$$

Les termes g se compensent mutuellement.

On appelle n<sub>t</sub> = n<sub>p</sub> + n<sub>H</sub> le nombre total de particules massives par unité de volume et comme m<sub>H</sub> = m<sub>p</sub> (masse des électrons négligeable), on peut exprimer n<sub>t</sub> en fonction de la masse volumique ρ de l'univers au moment de la recombinaison :

$$\rho = m_p n_t$$

Ce qui conduit, avec l'équation (B3), à :

$$n_t = \frac{\rho_0}{m_p T_0^3} T^3$$

Si on remarque qu'on a en permanence n<sub>p</sub> = n<sub>e</sub>, puisqu'il y a combinaison en nombre égal, on peut définir le degré d'ionisation par :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_t} = \frac{n_p}{n_t} = \frac{n_e}{n_H + n_e}$$

α = 0 univers transparent ; α = 1 univers opaque

La relation de Saha peut alors s'écrire :

$$\frac{(1-\alpha)}{\alpha^2} = \frac{\rho_0}{m_p T_0^3} \left( \frac{2\pi m_e k}{h^2} \right)^{-3/2} T^{3/2} \exp\left(\frac{\chi}{kT}\right)$$

Les valeurs pour la densité et la température de l'univers actuel sont :

ρ<sub>0</sub> = 9,24 × 10<sup>-27</sup> kg m<sup>-3</sup> et T<sub>0</sub> = 2,726 K et l'énergie d'ionisation de H est χ = 13,6 eV.

On trouve alors l'expression numérique pour une ionisation à 50 %, c'est-à-dire α = 0,5 :

$$2 = 12\,224 \rho_0 T^{3/2} \exp\left(\frac{157\,612}{T}\right)$$

On trouve T par calcul numérique avec un programme informatique. La température quand 50 % des atomes d'hydrogène se sont formés est :

$$T = 4\,066 \text{ K}$$

En utilisant la relation (B2) on trouve que le *redshift* au moment de la recombinaison (à 50 %) est :

$$z = \frac{T}{T_0} - 1 = 1\,490$$

Dans un modèle d'univers d'Einstein-de Sitter : R/R<sub>0</sub> est proportionnel à t<sup>2/3</sup>, on sait calculer la relation entre le temps de vol τ des photons et le *redshift* z.

$$\tau = t_0 - t = t_0 \left[ 1 - \left( \frac{R}{R_0} \right)^{3/2} \right] = t_0 \left[ 1 - \frac{1}{(1+z)^{3/2}} \right]$$

La valeur t<sub>0</sub> (pour z infini) est l'âge actuel de l'univers. En calculant pour z = 1 500 et pour t<sub>0</sub> = 14 × 10<sup>9</sup> ans, on trouve que la recombinaison était terminée à 50 % au temps :

$$t_{0,5\%} = t - \tau = \frac{t_0}{(1+z)^{3/2}}$$

Soit 241 000 ans après le Big Bang.

Pour une recombinaison plus complète avec α = 0,1, on trouve :

$$T \approx 3\,700 \text{ K}, z \approx 1\,400 \text{ et } t_{0,9\%} = 267\,000 \text{ ans.}$$

1 Après la recombinaison la loi du corps noir demeure inchangée car il n'y a plus d'interaction avec la matière, mais juste une dilution et un redshift à cause de l'expansion.