

Le rayonnement de fond cosmologique : de Gamow à Planck

Elisa Di Pietro

Résumé

Cela fait près de quarante ans que fut mise en évidence l'existence d'un bruit de fond cosmique dans lequel baigne tout l'univers. Très vite interprété comme le témoin de l'univers primordial, ce rayonnement fossile est aujourd'hui considéré comme un élément fondamental de la cosmologie.

La date de 1965 et les noms de Penzias et Wilson reviennent sur toutes les lèvres dès que l'on évoque ce rayonnement. Son histoire a pourtant débuté dans le courant des années 40 et se poursuit encore aujourd'hui. C'est cette histoire passionnante, parsemée d'occasions manquées, de hasards et de succès, qui sera abordée au fil de ces pages.

MOTS-CLES : Cosmologie, rayonnement cosmologique, histoire des sciences

Abstract

Almost forty years ago, astrophysicists discovered that our universe was bathing in a cosmic electromagnetic noise. Soon interpreted as a primordial universe relic, this fossil radiation is now considered as a fundamental element of cosmology.

We refer to the date of 1965 and to the names of Penzias and Wilson when this radiation is mentioned. However its history has begun in the 1940s and is still going on today. It is this fascinating history filled with failures, coincidences and successes, that is related in this paper.

KEY-WORDS : Cosmology, cosmic microwave background, history of sciences

TITLE : The cosmic microwave background : from Gamow to Planck

1 Introduction au rayonnement de fond

Le *modèle cosmologique standard* adopté par la majorité des physiciens aujourd'hui est celui du *Big Bang chaud* qui décrit un univers en expansion issu d'un état initial très dense et très chaud. Selon ce modèle, lorsqu'une seconde s'était écoulée après le Big Bang, le fluide cosmique était composé de photons, de neutrinos, d'électrons et, en petite concentration, de protons et de neutrons. La densité de ce fluide primordial était tellement importante que la matière et la radiation y étaient en équilibre thermodynamique. La distribution des photons était alors celle d'un corps noir parfait et leur intensité spécifique¹ avait la forme suivante :

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

qui se réduit à $I_\nu^W \approx (2h\nu^3/c^2) e^{-h\nu/kT}$, dans le domaine de Wien du spectre ($h\nu \gg kT$), et à $I_\nu^{RJ} \approx 2\nu^2 kT/c^2$, dans la région Rayleigh-Jeans ($h\nu \ll kT$).

C'est également une seconde après le Big Bang, lorsque la température de l'univers était de l'ordre de 10^{10} Kelvins, que les neutrinos se découplent du reste du fluide cosmique et commencent à se comporter comme des particules libres. Rien d'essentiel ne se produit suite à ce découplage et la température de l'univers continue à diminuer avec l'expansion. Lorsqu'elle atteint la valeur de trois milliards de Kelvins, environ 14 secondes après le Big Bang, la masse au repos des électrons et des positrons devient supérieure à l'énergie des photons et l'annihilation des paires électrons-positrons ne peut plus alors être compensée par la création de nouvelles paires. A partir de ce moment-là, ces particules cessent de constituer une contribution importante au contenu énergétique de l'univers : avant l'annihilation électron-positron, le nombre d'électrons (et de positrons) était égal au nombre de photons tandis qu'après, il ne reste plus qu'un seul électron pour chaque milliard de photons, ce rapport étant conservé au cours de l'expansion. A partir de ce moment-là et jusqu'à 300 000 ans après le Big Bang, la dynamique de l'univers est dominée par la radiation.

Avec l'expansion, la température continue à baisser. Lorsqu'elle approche un milliard de Kelvins, soit trois minutes après le Big Bang, la dilution de l'univers qui accompagne l'expansion rend les réactions de formation de neutrons par collisions de protons et d'électrons inefficaces : la désintégration des neutrons n'est alors plus compensée par la création de neutrons et il s'en suit une production massive de protons par désintégration des neutrons, ce qui explique l'importante abondance de l'hydrogène dans l'univers actuel. De plus, c'est aussi à ce moment-là que l'univers s'est suffisamment refroidi pour permettre la réalisation de la nucléosynthèse primordiale qui voit la formation des premiers noyaux d'atomes². Il est important de signaler que les abondances actuelles des éléments

¹L'intensité spécifique, ou densité de flux, est l'énergie incidente par unité de surface, par unité d'angle solide, par unité de fréquence, par unité de stéradian (pour les sources diffuses) et par unité de temps. En général, elle est exprimée en $W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$.

²Cfr. appendice pour davantage de détails concernant la nucléosynthèse primordiale.

légers telles qu'elles sont prédites ainsi par le modèle du Big Bang chaud sont en excellent accord avec les observations. La théorie de la nucléosynthèse primordiale est d'ailleurs l'un des grands succès de ce modèle. On voit donc que les neutrons présents dans l'univers soit se désintègrent en protons, soit sont capturés par des protons pour former les premiers noyaux d'atomes. Finalement, au bout des trois premières minutes de l'histoire de l'univers, la soupe primordiale est composée essentiellement de photons et d'un petit nombre d'électrons et de noyaux d'éléments légers (surtout des protons libres et des noyaux d'hélium).

Bien que l'univers primordial était alors globalement neutre, cette soupe constituait un plasma complètement ionisé qui a joué un rôle extrêmement important dans l'histoire de l'univers : les nombreux électrons libres qui étaient présents perturbaient sans cesse la trajectoire des photons par le processus *free-free*, lorsque la densité du plasma était encore suffisante, et par la diffusion Compton ensuite. Les photons étaient, dès lors, incapables de se propager en ligne droite. Le libre parcours moyen de ceux-ci était donc très faible. On dit que l'univers était *opaque* à la radiation.

D'après les modèles de Big Bang, une coupure fondamentale existe dans l'histoire de l'univers : il s'agit de la *recombinaison*. Celle-ci se produit au bout d'environ 300 000 ans, ce qui correspond à un décalage spectral³ z de l'ordre de 1000. La température était alors de 3000 K et l'énergie d'agitation des électrons devenait insuffisante pour échapper à l'attraction des noyaux positifs. Les noyaux et les électrons se sont alors *combinés* pour former les premiers atomes et le fluide cosmique est passé progressivement de l'état de plasma ionisé à un état neutre. Ainsi, la recombinaison est l'époque de transition entre l'univers primordial qui était complètement ionisé et l'univers actuel qui est neutre. Après la recombinaison, l'équilibre thermodynamique entre la matière et les photons, qui était principalement dû à la diffusion des photons sur les électrons libres, est rompu : les photons se découplent complètement de la matière et peuvent alors se déplacer librement sur de longues distances. L'univers est devenu *transparent* au rayonnement.

Ainsi, au moment où les photons cessent d'interagir avec la matière, 300 000 ans après le Big Bang, leur distribution suivait une loi de Planck. Après le découplage, n'interagissant plus avec la matière, ces photons ne subissent plus que l'expansion de l'univers qui, comme nous allons le voir, ne modifie pas le spectre de Planck des photons primordiaux. L'expansion de l'univers entraîne le refroidissement du rayonnement primordial selon une loi qui, d'après le modèle cosmologique standard, s'écrit $T(z) = T_0(1 + z)$, où T_0 est la température actuelle du rayonnement primordial et $T(z)$, sa

³Un décalage spectral est observé pour chaque source astrophysique lointaine. Il est dû à l'expansion de l'univers qui introduit un effet Doppler sur les photons émis par toute source de rayonnement électromagnétique. Le décalage spectral z d'une source particulière est défini comme étant égal, à une constante près, au rapport entre sa fréquence d'émission ν_e et la fréquence ν_o à laquelle l'observateur terrestre va réellement détecter cette source. Dans le cadre du modèle standard du Big Bang, ce rapport est égal au rapport entre la valeur actuelle R_0 du facteur d'échelle, ou taille caractéristique de l'univers, et sa valeur R_e au moment de l'émission. Il vient alors $1 + z = \nu_e / \nu_o = R_0 / R_e$. Vu la relation entre le décalage spectral et la taille caractéristique de l'univers, on comprend dès lors la possibilité d'utilisation de ce décalage pour repérer les différentes époques de l'histoire de l'univers.

température à un décalage spectral z . De plus, toujours d'après le modèle standard, la fréquence d'un photon se propageant dans un univers en expansion dépend du décalage spectral de celui-ci via la relation $\nu(z) = \nu_0 (1 + z)$. Ainsi, comme l'expression de la loi de Planck ne fait intervenir que le rapport T/ν , on voit que l'expansion de l'univers, en l'absence de mécanismes parasites après le découplage, ne modifie pas la forme du spectre du rayonnement primordial qui reste celle d'un corps noir parfait, seule sa température s'en trouve diminuée.

Différents phénomènes astrophysiques pourraient perturber la distribution de corps noir du rayonnement primordial après la recombinaison, lorsque la comptonisation du rayonnement n'est plus possible. En voici quelques exemples : la formation des premières étoiles, galaxies ou autres structures, la désintégration de certaines particules exotiques à long temps de vie, l'annihilation de paires de particules-antiparticules de masse inférieure à celle de l'électron, l'évaporation de trous noirs primordiaux, une réionisation quelconque de l'univers après la recombinaison, ... Tous ces phénomènes peuvent laisser des empreintes qui leurs sont propres dans le spectre du rayonnement de fond. Cependant, comme la densité de photons primordiaux est beaucoup plus importante que celle des baryons (un milliard de photons pour chaque baryon), seules des perturbations importantes laisseront une trace détectable dans le rayonnement primordial. On comprend l'intérêt de pouvoir mesurer précisément l'allure de ce spectre afin de contraindre au mieux les scénarios théoriques qui décrivent ces différents phénomènes. A ce jour, aucune distortion dans le spectre du rayonnement de fond n'a été observée, ce qui fournit des contraintes importantes pour les différents modèles théoriques qui en prévoyaient.

Un autre phénomène important laisse sa trace dans le rayonnement de fond cosmologique : notre déplacement par rapport à ce fond cosmologique. Si la Terre se déplace à une vitesse v par rapport au rayonnement primordial, l'effet Doppler entraîne un décalage en fréquence du fond cosmologique proportionnel à la projection du vecteur vitesse dans la direction d'observation. D'après la théorie de la relativité générale, l'application de cet effet à la distribution de température du fond cosmologique fournit la loi suivante pour la dépendance de cette température avec la direction d'observation :

$$T(\theta) = \frac{T_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}}{1 - (v/c) \cos(\theta)} \approx T_0 \left[1 + (v/c) \cos(\theta) + \frac{(v/c)^2}{2} \cos(2\theta) \right]$$

où θ est l'angle compris entre la direction d'observation et celle du déplacement de la Terre et où la seconde "égalité" est une approximation valable pour des petites valeurs du rapport v/c . Le premier terme présent dans les crochets représente le monopôle, autrement dit la température moyenne du fond cosmologique. Le second terme, au premier ordre en v/c , correspond au *dipôle*. Il est aisé de le comprendre : dans la direction dans laquelle se déplace la Terre, le fond cosmologique nous apparaît décalé vers le bleu et donc plus chaud. L'effet est inverse dans la direction opposée au mouvement, et intermédiaire dans les autres directions. Le troisième terme entre crochets, celui au second ordre en v/c , représente une composante quadrupolaire qui est, en fait, un effet purement relativiste. Elle est aussi beaucoup moins intense que la composante dipolaire. Ainsi,

toute vitesse de la Terre par rapport au rayonnement de fond cosmologique engendre une composante dipolaire et une composante quadrupolaire dans la distribution dans le fond cosmique dont la détection permet d'étudier la somme (et uniquement la somme) de tous les mouvements auxquels nous participons par rapport au rayonnement de fond cosmologique : rotation de la Terre autour du Soleil, déplacement du système solaire dans notre Galaxie, mouvement propre de la Voie Lactée, ...

Hormis les moments dipolaires et quadrupolaires, d'autres anisotropies doivent être présentes dans le rayonnement de fond cosmologique. En effet, l'univers actuel contenant des structures plus ou moins grandes (galaxies, amas de galaxies, superamas, ...), on s'attend à ce que le rayonnement de fond ne soit pas infiniment isotrope : les fluctuations de densité ayant donné lieu aux galaxies actuelles doivent avoir imprégné le fond cosmologique d'anisotropies. En effet, on ne peut expliquer la présence de galaxies et de grandes structures sans supposer l'existence de fluctuations à un moment ou à un autre dans l'histoire de l'univers. Le processus créateur de ces fluctuations et l'instant de leur création restent inconnus mais si cet instant est postérieur à celui de la recombinaison, il devient alors très difficile, pour ne pas dire impossible, aux théories de formation des grandes structures de produire des structures suffisamment grandes pour rendre compte de celles qui sont observées aujourd'hui dans l'Univers. La détection et l'étude précise de la distribution de ces fluctuations de température dans le fond cosmologique permettent de mieux comprendre comment les grandes structures se sont formées ainsi que de contraindre les différents paramètres intervenant dans les modèles cosmologiques.

Au cours de cette introduction, nous avons vu qu'un grand nombre d'informations et de contraintes astrophysiques pouvaient être déduites des observations du rayonnement du fond : contraintes sur les théories de formation des premières étoiles et des quasars, contraintes sur la vitesse de notre Galaxie par rapport au fond cosmologique, contraintes sur les scénarios de formation des grandes structures présentes dans l'univers, contraintes sur les paramètres cosmologiques... On comprend ainsi aisément que ce rayonnement cosmologique soit considéré aujourd'hui comme un outil fondamental de la cosmologie aussi bien sur le plan théorique qu'observationnel. Dans la suite, nous allons remonter le temps pour voir comment les astrophysiciens sont parvenus à prédire l'existence d'un tel rayonnement, dans quelles circonstances il a été détecté ainsi que les différentes étapes importantes qui parsèment l'histoire de sa découverte.

2 La physique de la première moitié du 20^e siècle

En physique nucléaire, la fin du 19^e et le début du 20^e siècle voyaient la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel et de la physique subatomique par Ernest Rutherford et Joseph John Thomson. Ainsi, dans les années 20, les physiciens savaient qu'un atome était constitué d'électrons gravitant autour d'un noyau composé de protons et de neutrons. Ils connaissaient également le phénomène de fusion dont la première expérience fut réalisée en 1919 par Rutherford : il s'agissait du bombardement d'atomes d'azote par des noyaux d'hélium. La fusion sera l'idée de base de la théorie de Gamow.

En ce qui concerne l'astrophysique, le début du siècle était synonyme de début de la nucléosynthèse stellaire. En 1920, le physicien Eddington proposa que la source d'énergie du Soleil pourrait être due à des réactions thermonucléaires. Dans les années 20, l'astronome américano-britannique Cecilia Payne-Gaposchkin montra que le Soleil était essentiellement formé d'hydrogène et d'hélium. Les théoriciens en conclurent que le Soleil puisait son énergie non pas dans la fission des éléments lourds, comme on le pensait à l'époque, mais bien dans la fusion des éléments légers. En 1938, les physiciens Hans Albrecht Bethe et Charles Critchfield mirent au point les premières théories de réactions thermonucléaires comme source de la chaleur du Soleil et des étoiles de la séquence principale, en l'occurrence la combustion de l'hydrogène en hélium. Il s'agissait du cycle du carbone pour Bethe et de la chaîne $p - p$ pour Critchfield.

A l'époque, les astrophysiciens pensaient que tous les éléments chimiques avaient été synthétisés dans le coeur des étoiles et que les théories de Bethe et de Critchfield n'étaient qu'un début : d'autres théories devaient pouvoir expliquer la combustion de l'hélium en éléments plus lourds. Un problème avec l'abondance de l'hélium demeurait cependant : les conditions à l'intérieur des étoiles n'étaient pas assez extrêmes pour permettre la formation de suffisamment d'hélium par la fusion de protons. Pour permettre la formation d'une grande quantité d'hélium, il fallait donc trouver un endroit plus chaud que l'intérieur des étoiles. Cet endroit n'existait pas jusqu'à l'arrivée, dans les années 30, de la théorie du Big Bang.

Le point de départ de la cosmologie contemporaine est la théorie de la relativité générale proposée par Einstein en 1915. Selon celle-ci, la gravitation est liée à la nature de l'espace-temps qui peut être courbé par la présence de matière. Cette théorie a été vérifiée lors de l'éclipse solaire de 1919 où il a été montré que les rayons lumineux émis par les étoiles étaient bel et bien défléchis lorsqu'ils passaient à proximité du Soleil, ce dernier courbant l'espace-temps, alors qu'ils ne l'étaient pas lorsque le Soleil ne se trouvait pas au voisinage de leurs trajectoires.

En 1929, Hubble étudiait le spectre de galaxies et mit en évidence l'existence d'un décalage spectral systématique vers le rouge. Ce phénomène a été interprété comme la preuve de l'expansion de l'univers. En 1931, Lemaître esquaissa la première version de la théorie du Big Bang qu'il appela l'*Atome Primitif*⁴. Il proposait que l'univers soit né d'un unique quantum d'énergie primordial qui a été sans cesse divisé jusqu'à engendrer toute la matière présente aujourd'hui dans l'univers. Lemaître pensait déjà à l'époque qu'il devait subsister des traces de cet univers primordial chaud et avait suggéré de considérer les rayons cosmiques⁵ comme ces traces. Il avait raison de dire qu'il devait exister une preuve que l'univers avait été jadis très chaud mais il avait tort de considérer les rayons cosmiques comme cette preuve. Il a fallu attendre plus de trente ans pour détecter cette preuve qui est finalement arrivée juste avant le décès de George Lemaître.

⁴G. Lemaître, La Revue des Questions Scientifiques, novembre 1931; *M.N.R.A.S.* **91**, 483 (1931); "*L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie*", Ed. du Griffon, Bruxelles (1946).

⁵Les rayons cosmiques sont des rayons très énergétiques (1 – 10 MeV) constitués d'ions et d'électrons qui se déplacent à une vitesse proche de la vitesse de la lumière. Leur origine est probablement galactique mais reste assez mystérieuse.

L'avènement de la théorie du Big Bang apporta non seulement une vision nouvelle sur l'origine de l'univers mais définit également un endroit plus chaud que le coeur des étoiles, ce qui laissait entrevoir une éventuelle solution au problème de l'abondance de l'hélium.

Le décor était en place. Le génie de Gamow n'avait plus qu'à entrer en scène.

3 George Gamow

George Gamow est né en 1904 à Odessa, en Ukraine. Il étudia la cosmologie à l'Université de Saint-Petersbourg avec Alexander Friedmann. Il quitta ensuite la Russie et fit quelques séjours en Europe au cours desquels il rencontra de grands physiciens, tels Ernest Rutherford, fondateur de la physique nucléaire, à Cambridge et Niels Bohr, créateur de l'image moderne de l'atome, à Copenhague. Finalement, il émigra aux Etats Unis alors qu'il était âgé d'une trentaine d'années.

Gamow était un grand physicien qui pouvait avoir des idées géniales, en avance sur son temps même. Il n'hésitait d'ailleurs jamais à les faire connaître, même s'il savait qu'elles n'étaient pas en accord avec les théories en place. Pour lui, l'important était les idées cachées derrière les théories : les développements mathématiques qu'elles contenaient n'étaient, selon lui, que des détails qui ne l'intéressaient guère. Gamow n'avait d'ailleurs pas toujours les compétences et la patience voulues pour traiter tous ces détails et mettre en équations ces idées. De plus, c'était quelqu'un qui ne se prenait pas au sérieux : il aimait faire des blagues et s'amusait en faisant de la physique. Malheureusement, ce caractère un peu hors du commun accompagné, de surcroît, d'un penchant non caché pour l'alcool lui attira le mépris de ses collègues plus souvent que leur reconnaissance.



Figure 1: George Gamow était le premier à prédire l'existence d'un rayonnement de fond primordial

“He had the ability to ferret out the essential elements of the most complicated physics.” (Jim Peebles)

“It was not Gamow’s style, or his interest, to work out the mathematical details of his theoretical ideas and speculations.” (John Mather)

Dans les années 30, Gamow chercha à comprendre l’origine des éléments chimiques. Alors qu’à l’époque, la majorité des scientifiques pensaient que les éléments chimiques avaient été synthétisés dans le cœur des étoiles, Gamow n’en était pas convaincu, notamment à cause de l’abondance inexplicée de l’hélium. De plus, lorsqu’il commença à se pencher sur la question, les astrophysiciens avaient déjà examiné un millier de spectres d’étoiles et avaient ainsi pu montrer que les éléments chimiques existaient dans des proportions relativement semblables *partout dans l’univers*, ce qui laissait sous-entendre une même origine pour les éléments en tout point de l’univers⁶. L’idée suggérée par Gamow en 1946 était que l’univers primordial chaud ait servi de four pour la production des éléments chimiques. Cet univers primordial devait être un gaz très chaud et très dense : sa température devait être supérieure à l’énergie de liaison au sein des noyaux, soit typiquement $10^9 - 10^{10}$ K. Ce gaz primordial, par la suite appelé “*ylem*” par un de ses collaborateurs⁷, était constitué de neutrons, de protons et d’électrons, particules considérées comme élémentaires à l’époque.

Au départ, la température de l’univers est tellement élevée que le nombre de neutrons présents était constant. En effet, les neutrons, étant libres, sont instables et se désintègrent suivant la réaction : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. Mais cette perte de neutrons était exactement compensée par la création de neutrons par le processus inverse, processus efficace à haute température : $p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$. La dilution de l’univers qui accompagne son expansion rend ce processus de moins en moins efficace. Ainsi, la désintégration spontanée des neutrons en protons a donc fini par ne plus être compensée par la production de neutrons. Gamow expliquait ainsi la grande quantité d’hydrogène observée aujourd’hui dans l’univers. D’un autre côté, la diminution de la température favorise les processus d’agrégation de particules au cours desquels les neutrons restants s’attachent aux protons pour donner des agrégats avec différents niveaux de complexité. Ces agrégats seraient les prototypes des noyaux atomiques d’aujourd’hui. Leurs abondances relatives dépendent de la densité initiale du ylem ainsi que du taux d’expansion. Ainsi, en 1946, Gamow estimait que tous les éléments de l’univers avaient dû être produits au cours des 20 premières minutes qui suivirent le Big Bang par addition de neutrons⁸. Telles étaient donc les idées un peu à contre-courant qui se trouvaient à la base de la théorie du ylem de Gamow.

⁶A l’époque de Gamow, on pensait que l’univers était constitué de 55 % en masse d’hydrogène et de 44 % en masse d’hélium, le reste étant des éléments plus lourds. Ces chiffres étaient basés sur l’étude de spectre d’étoiles et ne reflétaient en fait que la constitution de la Voie Lactée et non les abondances universelles qui sont de 75 % pour l’hydrogène et de 24 % pour l’hélium.

⁷“*ylem*” signifie matière primordiale en grec.

⁸G. Gamow, *Phys. Rev.* **70**, 572 (1946).

En 1946, Ralph Alpher, un étudiant chercheur intéressé par la nucléosynthèse primordiale, chercha à travailler avec Gamow. Ce dernier lui proposa comme sujet de thèse de doctorat de calculer les abondances des différents éléments telles que la théorie les prédisait et de les comparer avec celles observées. Ralph Alpher termina sa thèse en 1948 et, un an plus tard, écrivit un article avec Gamow qui allait devenir célèbre. Cet article présentait les résultats contenus dans la thèse de Alpher sur leur théorie de la nucléosynthèse primordiale. Gamow avait le sens de l'humour : il proposa à l'astrophysicien Hans Bethe de co-signer leur article de manière à ce que ses auteurs soient Alpher, Bethe, Gamow. Cet article est aujourd'hui connu sous le nom de " $\alpha\beta\gamma$ paper", ou parfois "*the alphabetical paper*"⁹.

Robert Herman, un jeune étudiant de Princeton, les rejoignit rapidement dans cette recherche sur la nucléosynthèse primordiale. Il s'agissait d'un ami de Ralph Alpher : ils s'étaient rencontrés quelques années auparavant à l'*Applied Physics Laboratory* de *John Hopkins* à Baltimore et avaient continué à collaborer ensemble car ils avaient les mêmes centres d'intérêt. Gamow était assez frustré avec Herman car son nom ne s'intégrait pas dans la série $\alpha\beta\gamma$. Il lui demanda de changer de nom et lui proposa de s'appeler Delter mais Herman refusa. En 1949, dans un de ses articles, Gamow poussa la plaisanterie jusqu'à parler d'un de ses collaborateurs, un dénommé Delter, en faisant allusion à Herman¹⁰.

Gamow avait réalisé très tôt que le ylem ne devait pas contenir uniquement de la matière : toute matière portée à une certaine température émet un rayonnement. Dans ce cas-ci, comme la substance primordiale se trouvait à une température de l'ordre du milliard de Kelvins, l'émission du ylem devait se faire dans le domaine du rayonnement gamma. Le ylem devait contenir également de la radiation qui, cependant, ne pouvait pas voyager sur de longues distances car les nombreux électrons libres présents les diffusaient sans cesse dans des directions toujours changeantes. Vu la fréquence importante des collisions, Gamow avait suggéré que ce rayonnement soit en équilibre thermique avec la matière et donc possède une distribution de type corps noir parfait. Mais, au début, Gamow ne trouvait pas l'existence d'un tel rayonnement importante. Pour lui, les conséquences observationnelles d'un tel rayonnement devaient être négligeables : en effet, comment le différencier de radiations émises par d'autres sources ? En fait, ce qui importait vraiment aux yeux de Gamow, c'était la production des éléments chimiques dans l'univers primordial, et non cette radiation.

Alpher et Herman n'étaient pas convaincus que cette radiation était réellement un détail. Ainsi, tout en continuant leurs calculs d'abondances chimiques, ils se mirent à réfléchir sérieusement à ce rayonnement qui aurait dû exister dans l'univers primordial. Comme Gamow, ils pensaient qu'elle devait avoir une distribution de corps noir mais ce qu'ils réalisèrent, et qui avait échappé à Gamow, c'est que l'univers actuel devait être

⁹R. A. Alpher, H. Bethe and G. Gamow, *Phys. Rev.* **73**, 803 (1949). Lors de la soumission de l'article, il avait été inscrit *in absentia* à côté du nom de Bethe, cette annotation s'étant perdue entre la soumission et la publication.

¹⁰G. Gamow, *Rev. Mod. Phys.* **21**, 361 (1949).

rempli de ce rayonnement fossile, certes largement refroidi par l'expansion de l'univers, mais possédant toujours une distribution de corps noir. Ainsi, en 1948, ils publièrent un article dans *Nature* qui contenait une prédiction simple et profonde¹¹ : l'univers actuel devait baigner dans un bain de photons à la température de $5 K$, trace d'une époque passée très chaude. La méthode qu'ils avaient utilisée était simple : le rapport de la densité de baryons sur la densité de photons présents dans l'univers à un moment donné s'écrit $\eta = n_b / 20.3 T^3$ où n_b est la densité numérique de baryons et où $20.3 T^3$ est le nombre de photons contenus dans un rayonnement de corps noir de température T . Ce rapport, supposé constant entre le moment de la synthèse de l'hélium dans l'univers primordial et aujourd'hui, peut être déterminé à partir de l'abondance de l'hélium dans l'univers actuel. Toujours dans le contexte de la théorie du ylem et des estimations d'abondances de l'époque, Gamow et ses collaborateurs avaient estimé que le paramètre η devait être de l'ordre de 4.10^{-10} . Ainsi, en supposant que la densité de baryons présentes dans les galaxies était de l'ordre de $10^{-30} g cm^{-3}$, ce qui conduisait à $n_b \sim 10^{-6} cm^{-3}$, Alpher et Herman aboutirent à une estimation pour la température du rayonnement relique qui devait être de l'ordre de $5 K$ ¹².



Figure 2: Ralph Alpher (gauche) et Robert Herman (droite), les étudiants de George Gamow qui prédirent, en 1948, que l'univers actuel devait baigner dans une radiation primordiale à $5 K$.

Suite à leur prédiction, Alpher et Herman réalisèrent que le rayonnement fossile devait posséder une signature propre que des télescopes suffisamment sensibles pourraient dis-

¹¹R. A. Alpher and R. Herman, *Nature* **162**, 774 (1948); *Phys. Rev.* **75**, 1089 (1949).

¹²Aujourd'hui, cette méthode est utilisée dans le sens inverse : connaissant la température du fond cosmologique et en tenant compte d'estimations plus récentes du paramètre η , le nombre de baryons présents aujourd'hui dans l'univers peut ainsi être déterminé. L'appendice à la fin de cet article donne davantage de détails concernant la relation entre la nucléosynthèse primordiale et la température actuelle du rayonnement de fond.

tinguer facilement d'un rayonnement électromagnétique émis par une toute autre source astrophysique. Par la suite, Gamow changea d'opinion quant à l'importance de ce rayonnement. Ainsi, en 1952, il publia son livre "*The creation of the Universe*"¹³ dans lequel figurait un calcul indiquant qu'il devait subsister dans l'univers actuel un rayonnement cosmologique de fond de type corps noir, vestige de l'univers primordial. Mais ses calculs aboutirent à une température de fond de 50 K. Gamow avait fait une petite erreur de calcul...

Vers la fin des années 40 et le début des années 50, Alpher et Herman s'étaient renseignés auprès de quelques radioastronomes de l'époque pour savoir s'il existait un instrument suffisamment sensible pour détecter une telle radiation mais il leur avait été répondu qu'il n'en existait aucun. En fait, il en existait bel et bien un dont nous reparlerons plus loin, le radiomètre de Dicke, mais il ne leur a pas été renseigné. Aussi la prédiction d'Alpher et Herman fut-elle vite oubliée par les scientifiques et ce, pendant près de 20 ans. La principale raison de cet oubli n'était cependant pas d'ordre technologique : elle était liée aux difficultés rencontrées par la théorie du ylem de Gamow : il n'existe pas dans la nature d'atomes de masse atomique égale à 5 et à 8 alors que l'idée à la base de la théorie du ylem de Gamow était la formation des atomes de plus en plus lourds par capture successive de neutrons et de protons. Ainsi, selon cette théorie, il devait exister des atomes à toutes les masses atomiques. En 1949, Fermi et Turkevich montrèrent que, comme les noyaux de masse atomique 5 sont beaucoup trop instables pour avoir le temps d'absorber d'autres protons ou neutrons et former des noyaux plus lourds avant de se désintégrer, la production graduelle d'éléments de plus en plus lourds par capture de neutrons devait donc s'arrêter à l'hélium¹⁴. Ces calculs plaçaient la théorie du ylem en mauvaise posture. Gamow tenta de remédier à ce problème en proposant de "dépasser la crevasse de la masse atomique 5" par des méthodes ingénieuses, pour ne pas dire assez tortueuses, mais ce fut vain. Gamow accorda que sa théorie était manifestement encore incomplète mais il pensa, jusqu'au bout, pouvoir la sauver et ainsi synthétiser tous les éléments dans l'univers primordial.

De l'autre côté de l'Atlantique, en Angleterre, Hoyle et ses collègues proposaient une théorie qui allait être néfaste pour la théorie du ylem et même, plus généralement, néfaste pour la théorie du Big Bang. En effet, dans les années 50, ils proposèrent une théorie de combustion de l'hélium dans les géantes rouges. Cette théorie était capable d'expliquer les abondances des éléments lourds présents dans l'univers. Ils suggérèrent ainsi qu'une grande partie des éléments plus lourds que l'hélium n'avaient pas été synthétisés dans l'univers primordial, comme le proposaient Gamow et ses collaborateurs, mais bien dans le coeur des étoiles, comme la plupart des astrophysiciens le pensaient à l'époque¹⁵. Hoyle et ses collègues admettaient cependant que leur théorie ne pouvait pas facilement expliquer l'importante abondance de l'hélium dans l'univers actuel et que la théorie du ylem semblait le faire de manière plus naturelle. Mais le problème de l'hélium, succès de la

¹³G. Gamow, "*The Creation of the Universe*", Viking Press (1952).

¹⁴E. Fermi, *Phys. Rev.* **75**, 1169 (1949).

¹⁵E. M. Burbidge *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 (1957).

théorie de Gamow, n'était pas vraiment une préoccupation première dans les années 50 : à ce moment-là, le fait que l'hélium avait été synthétisé à partir d'hydrogène à l'intérieur d'étoiles similaires au Soleil était largement accepté dans le milieu des astronomes et l'impossibilité d'expliquer, de cette façon, son importante abondance dans l'univers actuel était un problème secondaire qui ne semblait pas préoccuper outre mesure les astronomes de l'époque. Ainsi, l'impossibilité pour Gamow et ses collègues d'expliquer l'abondance des éléments lourds à l'aide de la nucléosynthèse primordiale alors que Hoyle et ses collaborateurs y parvenaient dans le cadre des idées en place à l'époque a, pour beaucoup de physiciens, jeté un discrédit sur l'ensemble du travail de Gamow, Alpher et Herman.

Alors qu'il aurait suffi d'oublier la partie de leur travail consacrée à la production des éléments plus lourds que l'hélium et de garder la synthèse des éléments légers ainsi que la prédiction du fond cosmologique, la réalité a été beaucoup plus dévastatrice : la théorie de Gamow et de ses collègues a été considérée comme formant un tout et tout leur travail est donc passé à la trappe avec l'arrivée de la théorie de la nucléosynthèse stellaire de Hoyle et de ses collaborateurs. Le fait que Gamow était porté sur l'alcool et ne se prenait pas au sérieux dans son travail a très certainement influencé le comportement des scientifiques à son égard et à l'égard de ses collaborateurs.

“Alpher and Herman’s association with Gamow may also have been a negative factor. Gamow was recognized as extremely creative by the astronomy community, yet his ideas often were not taken seriously by other physicists. Perhaps this was because of his jocular irreverence toward his work, along with his penchant for irritating practical jokes. Or perhaps, unfortunately, it was because of his well-known alcoholism.” (John Mather)

La rumeur dit qu'au moment où la théorie de Gamow a été mise en difficulté, Bethe, co-auteur *in absentia* de l'article $\alpha\beta\gamma$, pensait sérieusement à changer son nom pour celui de Zacharias afin de ne plus être associé au nom de Gamow.

Les dégâts ne se limitèrent pas là... La théorie du Big Bang étant, pour beaucoup, indissociable de la théorie du ylem de Gamow, a subi le même sort que cette dernière : la théorie de Gamow ayant été mise en difficulté et celle-ci étant basée sur la théorie du Big Bang, cette dernière devait également être erronée. De plus, Hoyle et ses collègues proposaient, en plus d'une théorie de la nucléosynthèse qui était en accord avec les observations, un modèle cosmologique concurrent au modèle du Big Bang : la théorie de l'état stationnaire¹⁶. Selon celle-ci, de la matière pouvait être continuellement créée grâce à un hypothétique champ de création, analogue aux champs gravitationnel et électromagnétique. Dans ce contexte, c'est la création de matière qui cause l'expansion, “les anciens devant faire de la place aux nouveaux qui arrivaient”. La théorie de l'état stationnaire plaisait à beaucoup notamment pour son esthétisme. En effet, celle-ci ne

¹⁶H. Bondi and T. Gold, *M.N.R.A.S.* 108, 252 (1948); F. Hoyle, *The Nature of the Universe*, Harper & Brothers, New York 1951.

prévoyait ni commencement de l'univers, ni phase extrêmement chaude et dense dans son passé : l'univers a toujours été identique à celui que nous observons aujourd'hui, il était stationnaire.

Ainsi, les difficultés rencontrées par la théorie du ylem ainsi que les avancées de l'astrophysique stellaire dans le courant des années 50 ont provoqué une mise en retrait de la théorie du Big Bang pendant une dizaine d'années. Découragés, Alpher et Herman publièrent leur dernier article sur la nucléosynthèse primordiale en 1953¹⁷ et leur prédiction sur le rayonnement de fond cosmologique tomba dans l'oubli.

Pour terminer cette section, il est important de souligner le grand mérite qui revient à Gamow : il fut en effet le premier à oser faire de la "physique de l'univers primordial" en réalisant que l'univers, dans sa jeunesse, avait dû être une fournaise où se sont formés les constituants de l'univers actuel. Jusqu'alors (et même peut-être encore un peu après), les physiciens étaient très sceptiques quant à l'utilisation de la physique pour décrire un soi-disant univers primordial et en déduire des phénomènes observables dans l'univers d'aujourd'hui. Notons également que les théories de nucléosynthèse primordiale actuelles s'inspirent très fortement des calculs réalisés dans les années 40 et 50 par Gamow et ses collègues.

4 Robert Dicke

Au début des années 60, le travail de Gamow était tombé dans l'oubli depuis bien longtemps mais la théorie du Big Bang, jusqu'alors effacée par celle de l'état stationnaire, commençait à refaire parler d'elle. En effet, les premières menaces contre sa rivale étaient apparues vers la fin des années 50 et le début des années 60, lorsque Martin Ryle, précurseur de la radioastronomie, montra que les radiogalaxies n'étaient pas distribuées de manière uniforme dans l'espace-temps : plus elles étaient distantes, plus elles étaient nombreuses. Les quasars, découverts au début des années 60, semblaient également plus nombreux dans le passé. Ainsi, les premières preuves d'un univers différent dans le passé, comme le prévoyait la théorie du Big Bang et contrairement à ce qui était défendu par l'état stationnaire, commençait à apparaître. Au début des années 60, la théorie de l'état stationnaire semblait au bord du gouffre et la théorie du Big Bang commençait à refaire surface. C'est dans ce contexte que commence l'épisode lié à Robert Dicke.

Robert Dicke était un grand physicien de Princeton, aussi bien théoricien qu'expérimentateur. Pendant la seconde guerre mondiale, il fut un personnage clef dans le développement des radars. C'est lui qui, en 1946, inventa ce qui s'appelle aujourd'hui de radiomètre de Dicke ("*Dicke microwave radiometer*"). En 1961, il proposa, avec Brans, la première théorie relativiste de la gravitation alternative à la relativité générale, connue aujourd'hui sous le nom de la *théorie de Brans-Dicke*¹⁸. Il a également proposé un certain nombre d'expériences visant à tester les théories de la gravitation et, en particu-

¹⁷R. A. Alpher, J. W. Fellin and R. Herman, *Phys. Rev.* **92**, 1347 (1953).

¹⁸C. Brans and R. H. Dicke, *Phys. Rev* **124**, 925 (1961).

lier, le principe d'équivalence. Dicke était un défenseur de la théorie du Big Bang plus que de l'état stationnaire mais ce qui le dérangeait dans la théorie du Big Bang, c'était l'idée d'un univers issu de rien et donc, avec un commencement. Dicke proposa alors



Figure 3: Robert Dicke qui passa tout près du Prix Nobel.

une vision alternative à celle du Big Bang, une vision dans laquelle l'univers ressemblait à un énorme coeur qui bat, sa dynamique étant constituée d'une succession de phases d'expansion et de phases de contraction au cours desquelles toute la matière produite au cours de la phase d'expansion précédente était comprimée jusqu'à une densité critique à laquelle se produisait un rebond. Ce type d'univers était également défendu par Gamow et porte aujourd'hui le nom d'*univers oscillant*. Ainsi, dans ce cadre-là, tout comme pour l'état stationnaire, il n'y avait plus de commencement : un nombre infini de cycles, et donc de big bang, s'étaient ainsi succédés. Cependant, comme il avait été montré que les éléments chimiques avaient été produits dans le coeur des étoiles, il fallait qu'à chaque commencement de cycle, aucune trace du cycle précédent ne subsiste afin que notre univers primordial ne contienne pas d'éléments plus lourds que l'hydrogène. Il devait donc exister un phénomène capable de les détruire tous entre la fin d'une phase de contraction et le début d'une phase d'expansion. Il se rendit compte qu'une chaleur extrême, de l'ordre du milliard de Kelvins, pouvait faire l'affaire. Ainsi, Dicke arriva à la conclusion que la phase de contraction devait durer suffisamment longtemps pour que l'univers devienne suffisamment chaud et permette la destruction de toute la matière produite pendant la phase d'expansion. Une conséquence inévitable de cet univers primordial chaud était l'existence d'un rayonnement intense dans le domaine gamma. Dicke était arrivé à la conclusion qu'il devait exister, dans l'univers actuel, un rayonnement cosmologique de fond largement refroidi jusqu'à une température de quelques Kelvins par l'expansion. Il est intéressant de remarquer que Dicke voulait détruire les éléments chimiques alors que Gamow cherchait à les synthétiser. De manière un peu ironique, ils sont

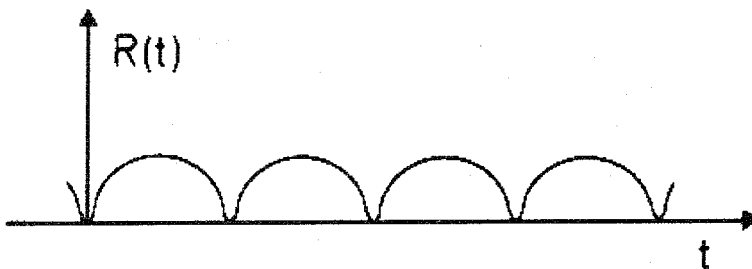


Figure 4: Le modèle d'univers oscillant défendu par Robert Dicke.

arrivés à la même conclusion : il devait exister, dans l'univers actuel, un rayonnement de fond de quelques Kelvins, relique d'un univers primordial chaud¹⁹.

Dicke réalisa que ce rayonnement qui devait se manifester aujourd'hui dans le domaine des ondes radios courtes (microondes) était détectable. En effet, il ne faut pas oublier que Dicke était un spécialiste des radars et de la radioastronomie appliquée aux ondes millimétriques. Il parla de sa théorie à deux jeunes physiciens de Princeton, David Wilkinson et Peter Roll, et leur proposa de construire un instrument capable de détecter ce rayonnement. C'est ainsi qu'au printemps 1964, munis des conseils du spécialiste, Wilkinson et Roll commencèrent la construction de l'instrument sur le toit du bâtiment de géologie de Princeton.

"It wasn't obvious from the beginning that it was a good way to spend a few years [...] Most people at the time believed in the Steady State theory, not the Big Bang [...] I thought we had a fifty-fifty chance of finding it." (David Wilkinson)

99 % de la radiation présente aujourd'hui dans l'univers provient du fond cosmologique mais, observé de la Terre, celui-ci paraît 100 millions de fois plus faible que le rayonnement émis par la Terre elle-même. Ainsi, Wilkinson et Roll devaient construire leur instrument de manière à ce que le moins possible de rayonnement provenant du sol ou de sources proches puissent entrer dans l'antenne une fois celle-ci orientée vers le ciel. Ceci explique la forme en cornet de l'antenne finalement construite. Mais cela ne suffisait pas : en effet, en radioastronomie conventionnelle, le télescope pointe tantôt vers la source radio que l'on désire étudier, tantôt légèrement à côté, de sorte qu'en soustrayant les deux

¹⁹Dans le cas de Gamow, ce sont ses étudiants qui ont fait la prédiction de l'existence d'un fond cosmologique et non Gamow lui-même.

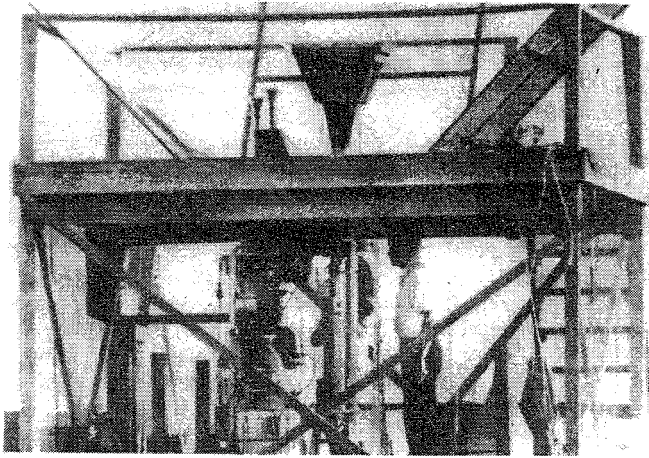


Figure 5: Au printemps 1964, Peter Roll et David Wilkinson commencèrent la construction d'un instrument capable de détecter le rayonnement de fond cosmologique sur le toit du bâtiment de géologie de Princeton.

signaux, tous les bruits parasites disparaissaient et seul subsistait le signal originaire de la source à étudier. Cette méthode "source on/source off" fonctionne parfaitement bien pour l'observation de sources ponctuelles mais elle est impossible à utiliser pour le rayonnement de fond cosmologique qui, lui, nous arrive de toutes les directions à la fois : il n'était donc pas possible de "pointer à côté". L'idée émise par Wilkinson et Roll avait été de créer une source artificielle de type corps noir, appelée référence froide ("cold load"), dont l'émission se faisait dans le domaine millimétrique et dont la température était connue exactement. Ainsi, la calibration pouvait s'effectuer en comparant les mesures observationnelles avec l'émission de la source artificielle incluse au détecteur. Cette méthode est appelée l'*alternance de faisceaux* ou "*chopping*". Idéalement, cette source devait avoir une température proche de celle de la source à observer. Ainsi, comme ils s'attendaient à détecter le rayonnement de fond à une température de quelques Kelvins, la source artificielle devait avoir une température inférieure à 10 K , ce qui justifiait l'utilisation d'hélium liquide comme référence froide²⁰. Wilkinson et Roll se sont donc arrangés pour que leur instrument pointe tantôt vers la référence froide, tantôt vers le ciel, de manière à toujours comparer la température du ciel à celle de la source artificielle. Le dispositif qui permet de faire pivoter l'instrument d'une position à une autre porte aujourd'hui le nom de "*switch de Dicke*".

En même temps que Wilkinson et Roll s'occupaient de monter le dispositif instrumental, Dicke avait proposé à James Peebles, alors jeune théoricien canadien qui venait de terminer sa thèse avec Dicke, d'essayer d'estimer la température actuelle de ce rayonnement ainsi que d'étudier les implications dans l'univers actuel de l'existence d'une

²⁰L'hélium liquide bout à 4.2 K .

phase très chaude dans le passé de l'univers. Peebles a tout d'abord résolu le problème de l'hélium. En effet, Hoyle et ses collègues avaient montré que les éléments lourds avaient été synthétisés dans le cœur des étoiles mais il n'était pas possible d'expliquer que 25 % en masse des constituants de l'univers se trouvaient aujourd'hui sous forme d'hélium si celui-ci était produit dans les étoiles. Peebles montra que cette abondance pouvait être expliquée si l'on admettait que l'hélium avait été produit dans la fournaise primordiale, comme l'avait prédit Gamow, Alpher et Herman quinze ans plus tôt.

James Peebles travailla également sur le rayonnement de fond cosmologique. Ainsi, à son premier colloque sur le Big Bang chaud, il annonça que, si l'univers était passé par une phase extrêmement chaude dans son histoire, il devait subsister, dans l'univers actuel, un rayonnement relique à une température de l'ordre de $10 K$ ²¹. Il ne savait pas que Alpher et Herman avaient fait la même prédiction 10 ans plus tôt. Il annonça également que son équipe de Princeton était en train de mettre en place une expérience pour détecter ce rayonnement. En 1964, il écrivit un article dans lequel il présenta la prédiction du rayonnement de fond à $10 K$. Cet article a été refusé avec, comme explication, qu'il n'apportait rien de nouveau. Ce que Peebles ignorait à ce moment-là, c'était que les referees de son article n'étaient autres qu'Alpher et Herman.



Figure 6: Dans les années 60, James Peebles a résolu le problème de l'hélium et a prédit une température de $10 K$ pour le fond cosmologique.

Le travail de l'équipe de Dicke allait donc bon train : James Peebles pour les aspects théoriques et David Wilkinson et Peter Roll pour le côté instrumental, le tout sous l'oeil avisé de Robert Dicke. Toutes les semaines, l'équipe se réunissait dans le bureau de ce dernier pour faire part des différentes avancées de chacun ainsi que des divers problèmes rencontrés. Un jour d'avril 1965, au cours d'une de ces réunions, le téléphone sonna. Dicke décrocha. Il posa à son interlocuteur des questions techniques assez précises qui attirèrent l'attention de ses collègues présents dans la pièce.

²¹Cfr. appendice pour les détails concernant la méthode utilisée (nucléosynthèse primordiale).

“As soon as we heard those words²², we knew the game was up.”
(David Wilkinson)

En raccrochant, Dicke se tourna vers ses collaborateurs et leur lança :

“Well boys, we’ve been scooped.”

Au bout du fil, c’était Arno Penzias...

5 Penzias et Wilson

Pendant l’été 1964, alors que David Wilkinson et Peter Roll s’occupaient de la construction de l’antenne sur le toit du bâtiment de géologie de Princeton, deux jeunes radioastronomes commençaient à travailler avec l’antenne radio des Laboratoires Bell Telephone à Holmdel (New Jersey). Il est amusant de noter que moins d’une heure de route séparait les Laboratoires Bell Telephone de l’Université de Princeton.

Fin des années cinquante et début des années soixante, les américains lancaient les premiers prototypes de satellites de communication : il s’agissait de Echo 1 et de Telstar. Le but était de voir si la communication par satellite, proposée dès 1945 par Arthur Clarke, était ou non réalisable. Pour ces expériences menées par les Laboratoires Bell Telephone, une antenne en forme de cornet très sensible au radio avait été construite afin de recueillir les signaux radios réfléchis par les satellites. La forme en cornet permettait d’éviter au maximum l’émission venant du sol, une fois l’antenne dirigée vers le ciel.

Après avoir fait ses études à Caltech (Pasadena), Arno Penzias se rend à l’Université de Columbia où, en 1960, il présenta sa thèse de doctorat en radioastronomie expérimentale. Il fut ensuite recruté par les Laboratoires Bell où son premier travail consistait à trouver un moyen de minimiser ou de modéliser au mieux les bruits parasites qui s’ajoutaient au signal reçu du satellite. Après ce travail, il décida de revenir à la radioastronomie. Ce moment coïncida avec celui où la recherche concernant les satellites de communication a été abandonnée par les Laboratoires Bell et reprise par *Communications Satellite Corporation* (COMSAT). Penzias réussit alors à convaincre les Laboratoires Bell de lui confier l’antenne radio pour faire de la science. Au printemps 1963, il fut rejoint par Robert Wilson qui venait juste de présenter sa thèse de doctorat à Caltech, en radioastronomie lui aussi. Ce n’est qu’au printemps 1964 que Penzias et Wilson purent réellement commencer à utiliser l’antenne pour faire de la radioastronomie. Ce fut, pour eux, le début d’une année de frustration.

Lors de sa thèse de doctorat avec John Bolton²³, Robert Wilson avait dressé une carte des sources radios ponctuelles présentes dans la Voie Lactée. Il avait soupçonné l’existence d’un halo de gaz qui devait lui aussi émettre dans le radio mais il n’avait pas pu le montrer car le matériel qu’il utilisait à l’époque ne lui permettait de faire que

²²cold load, excess noise, horn antenna, liquid He calibrator, ...

²³John Bolton est un radioastronome largement impliqué dans la construction de l’Observatoire radio de Caltech dans l’*Owens Valley* (Californie).



Figure 7: Arno Penzias (droite) et Robert Wilson (gauche) devant l'antenne radio des Laboratoires Bell Telephone.

des mesures relatives : il utilisait la méthode "source on/source off" et ne pouvait donc détecter aucune structure continue. En possession de l'antenne des Laboratoires Bell très sensible dans le radio, Penzias et Wilson avaient donc entrepris de mettre en évidence ce halo. Ils avaient décidé d'observer à la longueur d'onde de 21 cm car il s'agissait de la longueur d'onde d'émission de l'hydrogène neutre, constituant majeur du halo. Afin de pouvoir réaliser des mesures absolues, Penzias avait eu l'idée de construire une référence froide, comme l'a fait peu de temps après Peter Roll à Princeton. Il s'agissait également d'une référence froide à l'hélium liquide. En fait, c'était une pure coïncidence que ces deux éléments froids soient construits de la même façon : aujourd'hui, l'hélium liquide est quelque chose d'assez commun mais en 1964, c'était d'une idée tout à fait nouvelle. On voit que les problèmes auxquels ont été confrontés Roll et Wilkinson à Princeton avaient été résolus quelques mois plus tôt par Penzias et Wilson aux Laboratoires Bell.

Comme le rayonnement radio émis par le halo était supposé être très faible, Penzias et Wilson devaient très bien connaître l'instrument qu'ils utilisaient afin de pouvoir parfaitement modéliser son émission propre, en plus des émissions terrestre, atmosphérique et galactique. Penzias et Wilson s'attendaient à ce que très peu de bruit soit émis par la structure de l'antenne car, comme cela a déjà été dit, celle-ci avait été construite de manière à émettre elle-même très peu. Toutefois, afin de vérifier cette supposition et avant de tenter la détection du halo de la Voie Lactée, ils commencèrent la calibration de l'instrument avec le récepteur à la longueur d'onde de 7.35 cm utilisé précédemment par l'équipe de Telstar. À cette longueur d'onde, la Voie Lactée était supposée être invisible,

contrairement à la longueur d'onde de 21 *cm*, ce qui justifiait l'utilisation de ce récepteur pour la calibration de l'instrument.

Cette calibration a commencé en juin 1964. Une fois l'antenne tournée vers le ciel, un signal indésirable était immédiatement apparu à la fréquence de 4080 *MHz*. Il correspondait à celui qu'émettrait un corps noir de 3.5 *K*. Penzias et Wilson ont tenté d'en découvrir son origine afin de pouvoir le soustraire²⁴. Il était très vite apparu que le signal était parfaitement isotrope : le signal enregistré était indépendant de la direction dans laquelle pointait l'antenne (pas de différence entre la direction de l'horizon et celle du zénith) et aucun effet jour/nuit ou saisonnier ne semblait apparaître. Une telle isotropie excluait que le signal parasite provienne du sol, de l'atmosphère, du système solaire ou même de notre galaxie.

Penzias et Wilson ne connaissaient aucune source astrophysique capable de générer un signal radio aussi constant. Ils en conclurent que l'origine de leur signal devait être liée à l'instrument lui-même. Ils passèrent tous les circuits électriques en revue et remplacèrent les composants suspects. Mais rien ne changea : le signal parasite subsistait. Ils envisagèrent la possibilité d'un défaut dans la structure même de l'antenne. Ainsi, en scrutant l'intérieur de l'antenne, ils découvrirent qu'un couple de pigeons avait élu domicile dans l'antenne. Leurs excréments pouvaient-ils posséder des propriétés diélectriques particulières ? Ils décidèrent donc de chasser les intrus et de nettoyer l'antenne. Mais ce fut en vain : le signal mystérieux persistait.

Cela faisait un an que Penzias et Wilson tentaient en vain de fournir une explication à ce bruit millimétrique mystérieux, lorsqu'un jour d'avril 1965, Penzias téléphona à l'une de ses connaissances, Bernard Burke, un radioastronome du MIT. A la fin de cette conversation téléphonique qui n'avait en fait rien à voir avec le bruit parasite, Penzias mentionna le problème qu'il rencontrait avec l'antenne. Burke venait juste d'entendre parler par un de ses collègues, Ken Turner, de l'équipe de Dicke à Princeton qui prédisait l'existence d'un rayonnement à quelques Kelvins, vestige d'un Big Bang chaud. Burke conseilla à Penzias de téléphoner à Dicke, ce qu'il fit...

"Well boys, we've been scooped"
(Robert Dicke)

6 La rencontre des deux équipes

Le jour qui suivit ce coup de téléphone, Dicke, Roll et Wilkinson se rendirent aux Laboratoires Bell mais ils étaient déjà persuadés avant de s'y rendre que Penzias et Wilson avaient bien détecté la relique du Big Bang chaud.

²⁴ Ce signal parasite avait déjà été remarqué par Ed Ohm, un ingénieur qui travaillait avec cette antenne dans le cadre du projet Echo. Il nota cette constatation dans le *Bell System Technical Journal* mais n'y prêta pas une grande importance car les incertitudes sur les mesures qu'il effectuait étaient plus grandes que l'intensité du signal parasite. De toute façon, sans la référence froide, il était difficile de localiser le signal. Ce bruit parasite avait été appelé *sky temperature*. [E. Ohm, *Bell System Technical J.* **40**, 1065 (1961)].

“Before we went over to Bell Labs, we were pretty convinced that they’d found the Big Bang radiation” (David Wilkinson)

Ils savaient que le signal était tellement faible que la seule antenne au monde capable, à l’époque, de détecter le fond cosmologique était celle des Laboratoires Bell. De plus, le signal était tellement simple à détecter que n’importe qui possédant le matériel adéquat pouvait y arriver. Lors de cette visite, ils ne posèrent que très peu de questions... Dicke en avait déjà posé beaucoup au téléphone la veille. Pour le reste, sans doute connaissaient-ils déjà les réponses.

Les groupes de Princeton et des Laboratoires Bell décidèrent d’annoncer ensemble la découverte. Ils ont ainsi écrit deux articles, publiés l’un à la suite de l’autre, dans l’*Astrophysical Journal Letters*. Le premier, “*Cosmic Black-Body Radiation*”, fut celui du groupe de Princeton²⁵ dans lequel l’accent fut mis sur l’importance de la découverte : il s’agissait d’une grande victoire pour le modèle de Big Bang... Le second article fut celui de Penzias et Wilson²⁶ qui restaient très prudents en titrant “*A measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*”. Dans cet article, Penzias et Wilson insistaient très peu sur l’importance de la découverte : ils notèrent juste que “*A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one by Dicke, Peebles, Roll and Wilkinson in the companion letter in this issue*”. Penzias et Wilson n’avaient pas réalisé tout de suite l’importance de leur découverte. En effet, au cours d’une des premières conversations téléphoniques avec Dicke, Penzias s’exclama :

“ Well, that’s a big relief. We understand this thing at last. Now we can forget it and go and do some real science.” (Arno Penzias)

Ils n’ont d’ailleurs pas cru tout de suite que l’origine était bel et bien cosmologique, et ce, d’autant plus que Wilson était un partisan de l’état stationnaire. Ironiquement, il contribua, malgré lui, à l’anéantissement de cette théorie...

Remarquons également qu’en 1964, deux scientifiques soviétiques, Doroshkevich et Novikov qui connaissaient les travaux de l’équipe de Gamow, publièrent un article en russe, traduit en anglais plus tard, dans lequel ils suggéraient que le rayonnement de fond de type corps noir prédit par Alpher et Herman était détectable à l’aide de l’antenne des Laboratoires Bell, utilisée par Penzias et Wilson...

7 Les lendemains de la découverte

Lorsque Gamow lut les deux publications dans l’*Astrophysical Journal*, il fut assez étonné de voir que son nom ne figurait nulle part, du moins en ce qui concerne la prédiction du rayonnement de fond²⁷. D’autant plus qu’après une série d’articles techniques dans les années 40, Gamow avait pris la peine (ou le plaisir) d’écrire un livre, “*The Creation of*

²⁵R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll and D. T. Wilkinson, *Ap. J.* **142**, 414 (1965).

²⁶A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Ap. J.* **142**, 419 (1965).

²⁷Il était en effet cité pour ses travaux sur la nucléosynthèse primordiale.

the Universe”, ainsi que différents articles de vulgarisation dans le but de faire connaître son travail au grand public.

“*We absolutely didn't know about Gamow's work*”
(David Wilkinson)

Penzias et Wilson essayèrent de faire comprendre à Gamow qu'ils ne connaissaient pas son travail antérieur sur le rayonnement de fond, ou plutôt celui de ses étudiants Ralph Alpher et Robert Herman, mais en vain : Gamow décéda en 1968, trois ans après la découverte du rayonnement de fond, sans jamais avoir pardonné à Dicke pour son omission.

C'est en décembre 1965 que la théorie du Big Bang chaud réussit un test important : c'est en effet à ce moment-là que Roll et Wilkinson purent enfin effectuer leur mesure. Ils détectèrent à la longueur d'onde de 3.2 cm un rayonnement de 3 K , ce qui confirmait finalement la prédiction de la théorie du Big Bang chaud : cette nouvelle mesure, avec la première, était en accord avec un spectre de corps noir à une température de l'ordre de 3 K . Il s'agissait là d'une grande victoire pour la théorie du Big Bang. Les premières menaces sérieuses contre la théorie de l'état stationnaire étaient apparues avant la découverte du rayonnement de fond cosmologique²⁸. Mais ce n'est qu'en 1965, suite aux deux premières détections du rayonnement cosmologique de fond, que la théorie de l'état stationnaire, déjà au bord du gouffre, perdit la plupart de ses adeptes, parfois à contre-cœur :

“Pour moi, la perte de l'état stationnaire est une grande tristesse. Elle avait une beauté et une ampleur que, pour une raison inexplicable, l'architecte de l'univers a négligées. L'univers se révèle un travail baclé, mais je suppose qu'il faudra faire avec.” (Dennis Sciama)

Il était en effet très difficile, pour ne pas dire impossible, d'expliquer l'existence d'un tel rayonnement sans faire appel à une phase primordiale très dense dans l'histoire de l'univers. De plus, ce n'est qu'après la découverte du rayonnement de fond cosmologique que les physiciens ont commencé à prendre au sérieux la physique de l'univers primordial déjà introduite par Gamow vingt ans plus tôt et à admettre que la cosmologie pouvait ainsi acquérir un statut de science, statut qui n'est peut-être pas reconnu par tout le monde aujourd'hui encore...

Après la découverte de Penzias et Wilson, tout astronome en possession d'un télescope radio valable chercha à mesurer le fond cosmologique. Ainsi, au début des années 70, on comptait 12 expériences au sol qui visaient à mesurer le spectre du rayonnement de fond. Elles permirent de montrer que la température de ce rayonnement devait être proche de 3 K . Le maximum situé dans les longueurs d'onde plus petites n'avait pas été observé au cours de ces expériences car l'émission atmosphérique, très importante dans ces longueurs d'onde, noyait le signal cosmologique. Pour l'anecdote, lorsqu'une équipe de Princeton,

²⁸cfr. distribution des radiogalaxies et des quasars semblant indiquer un univers plus dense dans le passé.

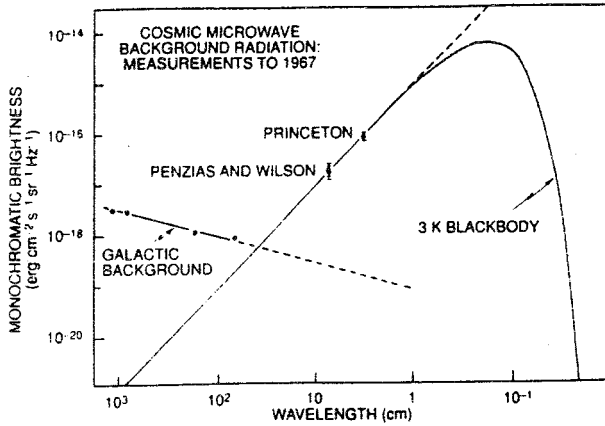


Figure 8: Les deux observations du rayonnement de fond : celle de Penzias et Wilson à 7.35 cm et celle de Wilkinson et Roll à 3.2 cm . [A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Ap. J.* **142**, 419 (1965) et P. G. Roll and D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 405 (1966). Figure scannée de R. B. Partridge, *3K : The Cosmic Microwave Background Radiation*, Cambridge University Press (1995)] .

formée entre autres de David Wilkinson et Bruce Partridge, se rendit sur le sommet de la White Mountain pour une nouvelle expérience. ils y rencontrèrent Bernard Burke et un petit groupe de personnes du MIT qui se trouvaient là dans le même but qu'elle. Le grand boom dans la recherche consacrée à la détection du rayonnement de fond cosmologique commençait à se produire...

Ainsi, jusqu'au début des années 70, seule la partie à basse fréquence du spectre (domaine de Rayleigh Jeans) du rayonnement primordial avait été observée. Pour démontrer qu'il s'agissait bien du spectre du rayonnement primordial prédit par la théorie du Big Bang, il aurait fallu observer la totalité du spectre et, en particulier, le pic du maximum qui devait se situer à une longueur d'onde de l'ordre de 1 mm . Ainsi, dans la suite, les astronomes entreprirent d'observer le spectre dans les plus petites longueurs d'onde, du millimétrique au submillimétrique, afin de mettre en évidence le maximum d'émission et le domaine de Wien du spectre.

Il est important de noter que certaines mesures du rayonnement de fond au voisinage de son maximum d'émission avaient déjà été réalisées 10 ans avant la prédiction de son existence par Alpher et Herman en 1948. En effet, vers la fin des années 30, Walter Adams, alors directeur de l'Observatoire du Mont Wilson (près de Pasadena en Californie), pointa son télescope vers une étoile proche de la constellation du Serpent et remarqua la présence de raies particulières dans son spectre. Ces raies ont été identifiées, pour la première fois, par Pol Swings & Leo Rosenfeld²⁹ : il s'agissait des raies d'excitation des molécules di-

²⁹P. Swings and L. Rosenfeld, *Ap. J.* **86**, 483 (1937).

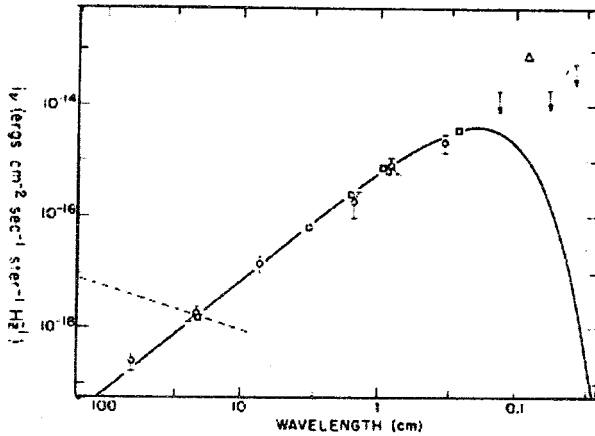


Figure 9: Au début des années 70, seule la partie de Rayleigh-Jeans du spectre avait été observée. Les flèches noires représentent cependant les mesures indirectes réalisées par l'étude de nuages interstellaires vers la fin des années trente (voir texte). [Figure scannée de P. J. E. Peebles, *Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (1971)]

atomiques CN présentes dans un nuage gazeux interstellaire³⁰. Quelle pouvait être la cause de cette excitation ? A cet époque, nul ne le savait mais, en 1941, Andrew McKellar proposa une explication : ces raies pouvaient provenir de l'excitation des molécules CN par une radiation à $2.3 K$ et à la longueur d'onde de $2.64 mm$ ³¹. Il était cependant incapable de fournir une origine à ce rayonnement : il parlait de "*effective temperature of space*". Ainsi, la première détection, certes involontaire, du rayonnement de fond date de la fin des années trente bien que l'année 1941 soit, en général, retenue. Ces observations du milieu interstellaire sont tombées dans l'oubli jusqu'en 1965 où, suite à la découverte par Penzias et Wilson, certaines personnes se sont souvenues du travail de Adams et de McKellar et l'ont réinterprété dans le cadre du rayonnement de fond : ces mesures étaient bel et bien en accord avec un spectre de corps noir à environ $3 K$. Il est utile de remarquer que ces mesures permettaient de déterminer la température exacte du nuage interstellaire ainsi observé³². Le nuage ne pouvant être plus froid que le rayonnement de fond, ces mesures fournissaient donc une limite supérieure à la température du rayonnement de fond cosmologique. Depuis, un grand nombre d'expériences ont été réalisées en vue d'observer le rayonnement de fond par l'intermédiaire du milieu interstellaire.

³⁰Il y avait également des raies d'excitation des molécules diatomiques CH et CH^+ mais en plus petites quantités.

³¹A. McKellar, *Pub. Dom. Astrophys. Observatory*, Victoria, B. C. 7, 251 (1941).

³²moyennant l'hypothèse que ce dernier est en équilibre thermodynamique avec le rayonnement de fond.

Hormis ces observations indirectes, l'observation directe de ce rayonnement à des longueurs d'onde proches du maximum, ou plus grandes, était rendue difficile car l'atmosphère se fait très gênante dans ce domaine de longueurs d'onde et noie donc le rayonnement recherché. La nécessité de s'affranchir au maximum de l'atmosphère commençait à se faire sentir : il était devenu très difficile de progresser dans l'étude du rayonnement de fond cosmologique avec les conditions technologiques qui existaient alors. Une nouvelle ère devait donc s'ouvrir pour la technologie microonde et, en attendant celle-ci, beaucoup d'astronomes qui étudiaient jusqu'alors le rayonnement de fond avaient commencé à travailler sur d'autres sujets.

Le début des années 70 fut une période creuse pour l'observation du rayonnement fossile mais de nombreuses techniques se sont développées ou ont été adaptées durant cette période-là : ballons, fusées et avions volant en haute altitude, d'une part, et bolomètres et caméras CCD, d'autre part. Les bolomètres sont des détecteurs plus sensibles que les récepteurs radio précédemment utilisés. Ainsi, dès la fin des années 70, de nouvelles expériences ayant pour but la mesure du rayonnement de fond ont pu revoir le jour. Il s'agissait d'expériences en ballon ou en fusée visant à tenter d'observer le rayonnement de fond à des fréquences plus petites. Certaines d'entre elles, et en particulier celle de la fusée Nagoya-Berkeley, semblaient mettre en évidence une propriété inattendue du spectre : un excès d'intensité du rayonnement apparaissait dans les petites longueurs d'onde. Le Big Bang produisant naturellement un parfait spectre de corps noir, quel processus, survenant après le découplage, pouvait causer un tel excès ? Une solution possible était de supposer, par exemple, que les photons du rayonnement de fond avaient traversé des nuages de gaz extrêmement chauds suspendus entre les galaxies. Cette hypothèse était justifiée : en 1962 fut découvert un fond diffus dans le domaine des rayons X, cette fois-ci, dont la première explication fournie à son origine était l'existence d'un gaz chaud intergalactique. Néanmoins et bien qu'il eut été observé à plusieurs reprises, beaucoup de scientifiques ne croyaient pas en l'existence d'un tel excès de rayonnement aux petites fréquences car il semblait beaucoup plus important que ce que pouvaient prédire les différentes explications théoriques possibles. De plus, d'autres expériences ne l'observaient pas. La question restera non tranchée jusqu'au lancement de COBE.

Avec l'arrivée des bolomètres qui permettaient des mesures plus précises du fond cosmologique, les astronomes commençaient ainsi à espérer pouvoir détecter les anisotropies tant attendues qui devaient absolument être présentes dans les cartes du fond cosmologique. En effet, celui-ci paraissait très uniforme mais l'univers actuel étant on-ne-peut-plus anisotrope (présence de galaxies, amas de galaxies, ...), des traces de ces fluctuations devaient forcément exister dans le rayonnement de fond cosmologique et la mise au point d'instruments plus sensibles laissait entrevoir l'espoir de les détecter.

Nous savons que les galaxies n'ont pas pu se former pendant les premiers 300 000 ans qui ont suivi le Big Bang car la pression de radiation exercée par les photons présents dans le plasma primordial rendait impossible la formation de structures importantes. Les galaxies n'ont donc réellement pu commencer à se former qu'après le découplage matière-rayonnement. Mais comment auraient-elles pu le faire si aucune fluctuation n'existait

préalablement ? En fait, si aucune perturbation n'existe avant le découplage, il est impossible d'expliquer la formation des structures par instabilité gravitationnelle, processus à la base de tout scénario de formation de grandes structures aujourd'hui. En effet, si aucune graine de galaxies n'existe préalablement, les structures n'ont alors pas assez de temps pour croître suffisamment et pouvoir reproduire l'univers très structuré que nous observons aujourd'hui. La présence de ces fluctuations de densité de matière au moment du découplage devait être révélée par les photons du rayonnement de fond : lorsqu'un photon, au moment où il se découplait de la matière, passait au voisinage d'une région de surdensité, il devait donc affronter un potentiel gravitationnel plus important pour pouvoir s'échapper. La relativité générale prévoit, dans ce cas-là, une perte d'énergie pour le photon et un décalage vers le rouge de sa fréquence : il y a création d'un "coldshot". L'inverse se produit lorsque le photon traverse une région de densité plus faible : il y a création d'un "hotshot".

La théorie standard du Big Bang prévoyait que les perturbations dans le fond cosmologique devaient être de l'ordre de 10^{-4} . Cette échelle devenait accessible à la nouvelle génération de détecteurs : les bolomètres. Ainsi, les astronomes pouvaient enfin espérer détecter ces anisotropies tellement importantes à leurs yeux : s'ils ne les découvraient pas, beaucoup de choses devraient être remises en question, de la formation des structures par instabilité gravitationnelle jusqu'à, peut-être, la théorie du Big Bang elle-même. Ainsi, avec l'arrivée des bolomètres, la recherche des anisotropies a pu réellement commencer et, vers la fin des années 70, la plus importante d'entre elles, en amplitude, a finalement pu être découverte. Il s'agissait du *dipôle* : le rayonnement de fond cosmologique apparaît légèrement plus chaud dans une direction du ciel que dans la direction opposée. Le moment dipolaire observé résultait de notre mouvement par rapport au fond cosmologique : rotation de la Terre autour du Soleil, rotation du Soleil dans la Voie Lactée, mouvement de cette dernière dans le Groupe Local et vitesse propre de celui-ci. Après différentes annonces de détections marginales, c'est en 1976 et 1977 que trois groupes travaillant indépendamment les uns des autres³³ annoncèrent avec certitude avoir détecté que le ciel apparaissait comme $\sim 0.1\%$ plus chaud dans la direction de la constellation du Lion que dans la direction opposée. Cette anisotropie correspond à une vitesse de 365 km s^{-1} , ce qui est très proche de la vitesse de rotation du Soleil dans la Voie Lactée ($\sim 300 \text{ km s}^{-1}$) mais la direction mise en évidence par le dipôle est opposée à celle du mouvement du Soleil dans la galaxie. Corrigée de la rotation galactique, il restait alors une vitesse de l'ordre de 600 km s^{-1} à expliquer. Le rayonnement de fond, à lui tout seul, ne dit pas à quelle échelle se produit le mouvement. Ainsi, si l'on veut localiser ce qui se déplace à la vitesse de 600 km s^{-1} , il faut faire appel à d'autres observations. Notre Galaxie, tout comme les galaxies qui lui sont proches, se déplacent au sein du Groupe Local. On peut supposer que des mesures des vitesses propres des galaxies proches nous renseignent sur la vitesse de notre Galaxie au sein du Groupe Local. Or, ces vitesses sont très faibles (de l'ordre de 200 à 250 km s^{-1}), ce qui signifie que la vitesse observée au travers du

³³à savoir D. Wilkinson et al. de Princeton, G. Smoot et al. de Berkeley et F. Melchiorri et al. de Florence.

moment dipolaire n'est pas due au déplacement de la Voie Lactée dans le Groupe Local. C'est donc le Groupe Local dans son ensemble qui se déplace par rapport au fond cosmologique. C'est dans ce cadre-là qu'a été introduite l'hypothèse du *Grand Attracteur*, une gigantesque concentration d'amas de galaxies dont la masse totale serait de l'ordre de $10^{16} M_{\odot}$ et vers laquelle semble se déplacer l'Amas Local³⁴. Cette hypothèse a été confirmée notamment par des études d'écarts au flot de Hubble qui semblent également favoriser l'existence du Grand Attracteur bien que son mystère ne soit pas encore résolu aujourd'hui.

La découverte du dipôle était très encourageante pour la détection des anisotropies mais un certain doute commençait à s'installer : la soustraction de l'effet dipolaire observé montrait une homogénéité de l'univers à au moins 10^{-4} près alors que la théorie prévoyait la présence d'anisotropies à cette échelle. Ainsi, les années 80 furent synonymes de prise de conscience de la possibilité et surtout de l'importance de la détection de ces anisotropies. Mais à la fin des années 80, il n'y avait toujours aucune observation d'anisotropies autres que celle du dipôle et celui-ci n'avait rien à voir avec les scénarios de formation des structures qui préoccupaient beaucoup les astronomes de l'époque. Cette non-observation frustrait énormément les théoriciens et ce, d'autant plus que les premiers surveys de galaxies réalisés grâce à de grands télescopes équipés de caméras CCD confirmèrent clairement la présence de très grandes structures : les galaxies et les amas de galaxies semblaient se trouver sur de longues chaînes qui entouraient des espaces de grand vide. De telles structures ne pourraient pas nous apparaître aujourd'hui si des anisotropies n'existaient pas déjà au moment du découplage et donc dans le rayonnement de fond cosmologique. Il était devenu clair pour tout le monde qu'il était nécessaire d'effectuer des mesures encore plus précises et, pour ce faire, il fallait inévitablement quitter l'atmosphère.

D'un autre côté, les théoriciens devaient également revoir leurs modèles de formation des grandes structures car l'amplitude des fluctuations qu'ils prévoyaient à l'aide du modèle standard avec uniquement de la matière baryonique était trop grande : il était clair que les anisotropies devaient être d'amplitude inférieure à 10^{-4} mais alors, pour permettre à ces dernières de croître suffisamment vite afin d'atteindre la taille des grandes structures observées aujourd'hui, il a été nécessaire que leur croissance commence avant la recombinaison. Les théoriciens ont alors proposé les premiers scénarios de formation de structures faisant appel à de la matière non-baryonique qui interagirait très peu avec la radiation et la matière baryonique de manière à permettre aux fluctuations de commencer à croître avant la recombinaison. Dans le cadre de ces scénarios, l'amplitude des fluctuations qui devaient être présentes dans le rayonnement de fond cosmologique était estimée à 10^{-5} . Il s'agissait là d'une dernière limite que les théoriciens proposaient : il leur était impossible de prédire une valeur plus petite.

Pour terminer cette section, signalons qu'en 1978, Penzias et Wilson reçurent le Prix Nobel de physique pour leur découverte du rayonnement de fond. En décernant le Prix à la découverte plutôt qu'à la prédiction théorique, le Comité pour le Prix Nobel évitait de

³⁴Le symbole M_{\odot} représente la masse du Soleil, soit 2.10^{30} kg .

créer de nouvelles tensions liées à la première prédiction théorique. En effet, pour le côté théorique, Gamow méritait ce Prix autant que Dicke mais, en 1978, Gamow était déjà décédé et ne pouvait donc pas recevoir le Prix car celui-ci ne peut être décerné à titre posthume. Fallait-il alors récompenser uniquement Dicke ? Après l'omission et toute l'injustice dont fut victime l'équipe de Gamow suite à la découverte du rayonnement de fond en 1965, le Comité pour le Prix Nobel a sans doute préféré ne pas remettre de l'huile sur le feu et seuls Penzias et Wilson furent récompensés pour leur découverte réalisée, faut-il le rappeler, par hasard.

"Convincing others is more important than being the first."
(William Osler)



Figure 10: En 1978, Penzias et Wilson reçoivent le Prix Nobel pour la détection du rayonnement de fond cosmologique.

8 COBE et la découverte des anisotropies

En juillet 1974, la NASA publia deux appels d'offre invitant les chercheurs à proposer des missions astronomiques pour deux satellites de type Explorer, un petit et un moyen. La NASA reçut plus d'une centaine de propositions dont la majorité était consacrée à l'astronomie infrarouge³⁵ et la minorité, à la cosmologie. Trois d'entre-elles proposaient de mesurer le rayonnement de fond cosmologique. C'est de la fusion de ces dernières que naquit le projet COBE ("*COsmic Microwave Explorer*") qui ne fut néanmoins accepté par la NASA qu'en 1982³⁶. Son lancement était prévu pour le début de l'année 1989. Le responsable principal du projet COBE était John Mather du "*NASA Goddard Space Flight Center*". Le satellite allait avoir à son bord les trois instruments suivants :

- Un interféromètre de Michelson - FIRAS ("*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*") - qui mesurerait de manière très précise le spectre du fond cosmologique afin de confirmer son caractère de corps noir parfait. (Directeur de ce projet : John Mather)
- Un radiomètre différentiel de Dicke "amélioré" - DMR ("*Differential Microwave Radiometer*") - constitué de trois paires de radiomètres différentiels qui compareraient la température du fond cosmologique dans différentes directions avec une résolution angulaire égale à 7°, de manière à mettre en évidence les éventuelles anisotropies. (Responsable de cet instrument : George Smoot)
- Un photomètre infrarouge - DIRBE ("*Diffuse Infrared Background Experiment*") - qui observerait le ciel dans l'infrarouge afin de confirmer ou d'infirmer l'existence d'un rayonnement de fond infrarouge (CIBR) issu de l'émission de galaxies lointaines et irrésolues. (Responsable de cet expérience : Mike Hauser)

En attendant le lancement de COBE, la recherche des anisotropies à partir de ballons ou d'avions U2 continuait. Après la découverte du dipôle à la fin des années septante, ce fut au tour du quadrupôle³⁷ de faire parler de lui : en 1981, une équipe de Florence, Francesco Melchiorri et al., ainsi qu'une autre de Princeton, David Wilkinson et al., pensaient avoir détecté un moment quadrupolaire à l'aide d'instruments suspendus à des ballons alors qu'une autre expérience menée par des chercheurs de Berkeley (George Smoot et al.), réalisée en ballon également, semblait en démontrer son absence. On voit

³⁵C'est dans le cadre de ce programme qu'est né le satellite infrarouge IRAS. Ce satellite avait été mis au point en 1973 par des hollandais qui ont ensuite cherché des aides financières et techniques extérieures. Ils se sont alors tournés vers la NASA.

³⁶Après avoir accepté de financer la construction du satellite IRAS, la NASA n'était plus très motivée pour s'engager dans un second satellite. Ceci justifie les huit ans qu'il a fallu pour que la NASA donne son feu vert pour la construction de COBE.

³⁷Différents phénomènes peuvent donner lieu à un quadrupôle comme, par exemple, le passage d'une onde gravitationnelle de très grande taille dans notre voisinage. La contribution au second ordre en la vitesse du mouvement de notre Galaxie par rapport au fond cosmologique possède également une forme quadrupolaire...

que la recherche concernant le rayonnement de fond cosmologique commençait à prendre de plus en plus d'ampleur et que la course vers la découverte des anisotropies était bel et bien entamée.

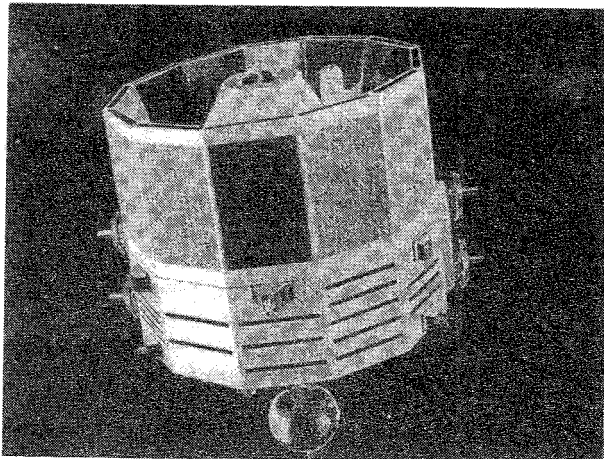


Figure 11: Le satellite COBE tel qu'il aurait été s'il avait pu être lancé à partir de la navette spatiale américaine.

Différents vols de ballons eurent également lieu dans les années 80 dans le but de tester les instruments qui allaient être à bord du satellite COBE. Initialement, COBE avait été conçu pour être amené sur une orbite polaire par une fusée Delta mais, par la suite, la NASA décida de lancer le satellite avec la navette spatiale. En fait, au début des années 80, la NASA voulait abandonner toutes les fusées classiques pour les remplacer par la navette spatiale qui était réutilisable et pilotée. Jusque là, la NASA lançait ses navettes du Cape Canaveral en Floride mais, COBE, devant être mis sur une orbite polaire, ne pouvait pas être lancé de cette base : la latitude du Cape Canaveral est trop faible pour permettre de lancer un satellite sur une orbite polaire. La NASA avait ainsi projeté de construire une seconde base de lancement de navette dans le désert de la Californie du Sud, sur la base de *Vandenberg Air Force*. C'était de cette seconde base que devait être lancé COBE.

En 1986, la construction de COBE était déjà largement entamée lorsque, le 28 janvier, la navette spatiale Challenger explosa avec, à son bord, sept astronautes. Suite à cet accident, la NASA suspendit tous ses vols de navettes. *“Déjà avant le désastre, la navette volait moins fréquemment que prévu, et les clients tant civils que militaires bouillaient d'impatience dans la file d'attente. Nous n'avions aucune idée de la date de reprise des lancements mais quand cela arriverait, il y aurait beaucoup de gens plus prioritaires que nous. Les satellites militaires, et les énormes projets scientifiques très coûteux comme la station orbitale Freedom, la sonde Galileo ou le télescope spatial Hubble, feraient des pieds et des mains pour embarquer sur une navette. Le lancement de COBE pourrait être*

repoussé jusque dans les années 90, et trouver une place risquait d'être alors encore plus difficile" (dixit George Smoot). De plus, l'abandon des lancements de navettes fut suivie par l'abandon du projet de construction d'une seconde base de lancement à Vandenberg, base de laquelle aurait dû être lancé COBE... Le projet COBE était donc en train de tomber à l'eau.

L'équipe de COBE devait trouver une méthode alternative de lancement mais l'industrie aérospatiale américaine était en plein chaos : en avril 1986, trois mois après l'accident de Challenger, une fusée Titan explosa au-dessus de la Californie avec du matériel militaire à son bord et, 15 jours plus tard, c'était une fusée Delta qui explosait emportant avec elle un satellite météo. L'équipe de COBE envisagea alors d'utiliser la navette européenne Ariane mais la NASA voyait d'un très mauvais oeil qu'un projet de l'importance de COBE puisse tomber dans des mains autres qu'américaines. Finalement, fin de l'année 1986, John Mather et son équipe modifièrent leur projet de manière à pouvoir lancer le satellite à partir d'une fusée Delta. Pour ce faire, il a fallu lui apporter des modifications très importantes comme, par exemple, diviser le poids du satellite par deux. Ils proposèrent un projet redessiné à la NASA qui l'accepta. Après d'importantes modifications, COBE fut finalement lancé le 18 novembre 1989 à partir d'une fusée Delta. Le satellite aura coûté la modique somme de 300 millions de dollars à la NASA et sa construction aura nécessité le travail de 1600 personnes.

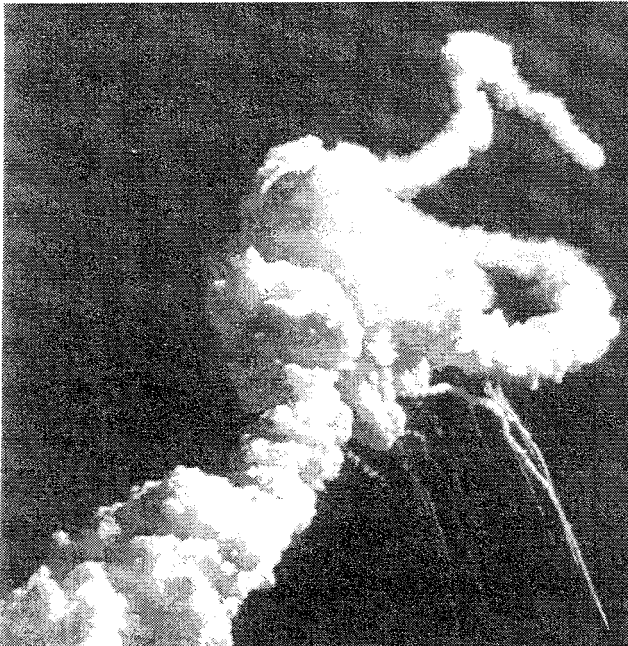


Figure 12: Le 28 janvier 1986, la navette Challenger explosait avec, à son bord, sept astronautes.

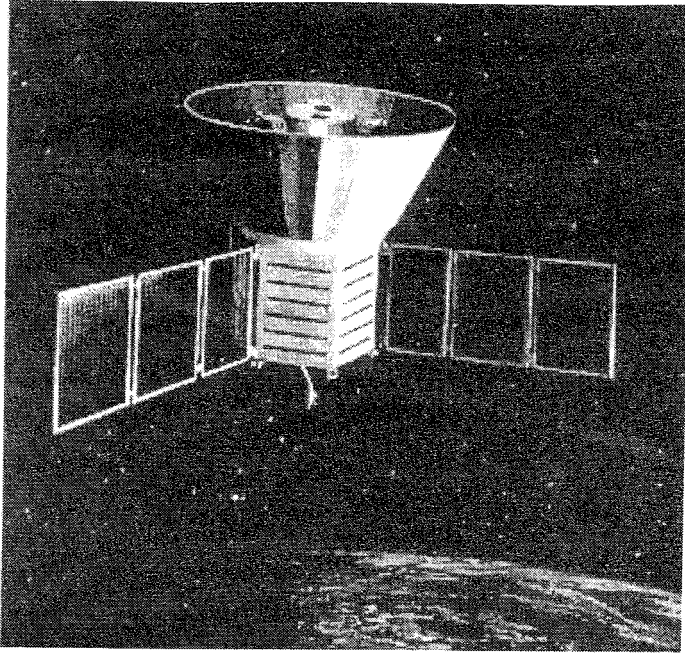


Figure 13: Le satellite COBE lancé du Cape Canaveral le 18 novembre 1989.

Les premiers résultats obtenus avec l'interféromètre FIRAS furent présentés par John Mather deux mois après le lancement de COBE, lors d'une assemblée de l'*American Astronomical Society* en Virginie. FIRAS avait mesuré l'intensité du rayonnement cosmologique de fond à des longueurs d'onde variant de 0.1 à 1 cm et ces premiers résultats étaient basés sur une observation visant le pôle nord galactique durant seulement neuf minutes. Les 67 points de mesure obtenus se plaçaient juste sur la courbe prédite par la théorie du Big Bang.

"It was a wonderful moment. The spectrum was absolutely spectacular."
(Bruce Partridge)

"I was afraid they were clapping for me. I wanted to tell them I wasn't the one that did this thing. COBE was a team effort." (John Mather)

Les mesures finales de FIRAS obtenues après ses 10 mois d'observation fournissent la valeur $T_0 = 2.728 \pm 0.004 K$ avec 95% de niveau de confiance pour la température du monopôle du rayonnement de fond cosmologique³⁸. Les barres d'erreur étaient tellement petites qu'elles n'étaient pas visibles sur la figure. Il s'agissait donc très précisément d'un spectre de corps noir, le doute n'était plus permis. Le DMR, instrument pourtant différentiel, a fourni une valeur pour la température du monopôle tout à fait en accord

³⁸D. J. Fixen et al., *Ap. J.* **473**, 576 (1996).

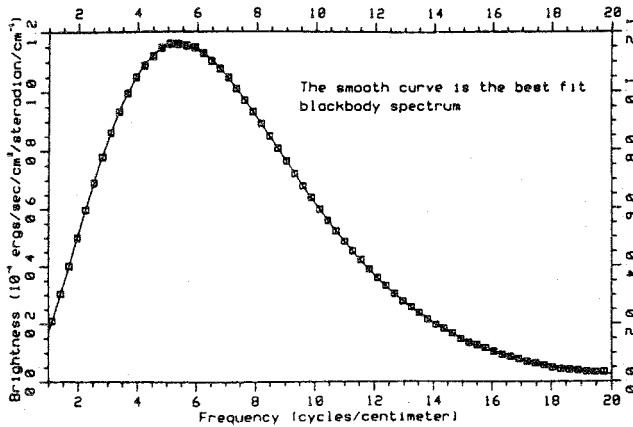


Figure 14: Le spectre du rayonnement de fond cosmologique tel qu'il fut mesuré par l'instrument FIRAS du satellite COBE après seulement neuf minutes d'observations [J. Mather et al., *Ap. J. Lett.* **354**, L37 (1990)] .

avec celle fournie par FIRAS, à savoir $T_0 = 2.725 \pm 0.020 K$ ³⁹. De plus, aucune trace de la distorsion observée auparavant dans les plus petites longueurs d'onde notamment par la fusée Nagoya-Berkeley n'apparaissait dans les données de COBE.

La confirmation du spectre de corps noir mesuré par COBE ne s'est pas faite attendre : en janvier 1990, un groupe canadien COBRA autour de Herb Gush, pionnier des mesures du fond cosmologique à l'aide d'instruments embarqués sur une fusée, lança une fusée d'une base du Nouveau Mexique et deux semaines plus tard, de nouveau un superbe spectre de corps noir fut présenté. La température de fond cosmologique trouvée par COBRA était de $T_0 = 2.736 \pm 0.017 K$ ⁴⁰. La confirmation du spectre de corps noir parfait permettait de rejeter l'hypothèse d'existence d'un gaz chaud qui peuplerait tout l'univers (milieu intergalactique) comme explication du fond diffus dans le domaine X. Aujourd'hui, les astronomes pensent que le fond diffus dans le domaine X est dû, au moins en partie, à des AGN⁴¹ jusqu'alors non résolues ou cachées par des nuages absorbant le rayonnement émis par les AGN (sauf dans le domaine X) et que l'on commence à résoudre avec XMM.

En avril 1990, COBE avait observé pour la première fois tout le ciel et confirmait qu'une moitié était bien plus chaude que l'autre : le DMR mesurait en effet un dipôle d'une amplitude de $\Delta T = 3.358 \pm 0.024 mK$ et dont la direction, en coordonnées

³⁹A. Kogut et al., *Ap. J.* **460**, 1 (1996).

⁴⁰H. P. Gush, M. Halpern and E. H. Wishnow, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 537 (1990).

⁴¹Les AGN, ou "Active Galactic Nuclei" (galaxies à noyau actif), sont une classe de galaxies qui comprend les quasars, les galaxies Seyfert et certaines radiogalaxies.

galactiques, était $(l; b) = (264.31^\circ \pm 0.16^\circ; 48.05^\circ \pm 0.10^\circ)^{42}$. Ces observations sont en accord avec celles obtenues par FIRAS qui mesurait un excès de température de $\Delta T = 3.372 \pm 0.007 \text{ mK}$ dans la direction $(l; b) = (264.14^\circ \pm 0.15^\circ; 48.26^\circ \pm 0.15^\circ)^{43}$. Celles-ci confirment également les toutes premières valeurs mesurées vers la fin des années 70 et donc l'hypothèse du Grand Attracteur.

En ce qui concerne le moment quadrupolaire, l'analyse des données du DMR fournit le résultat suivant⁴⁴ : $Q_{rms} = 10.0^{+7}_{-4} \mu K$. Ce chiffre est pourtant très contesté : il est considéré comme surestimé. Cependant, l'avis général est que, même si les valeurs annoncées doivent être revues à la baisse, une composante quadrupolaire a bel et bien été observée.

Les premières cartes démontrant la présence d'anisotropies dans le fond cosmologique observé par COBE furent obtenues, grâce au DMR, en décembre 1991. Celles-ci avaient bel et bien une amplitude égale à 10^{-5} , telle que la prédisait les scénarios de formation des structures dominés par de la matière sombre non-baryonique. Présentées par George Smoot le 24 avril 1992 lors d'une réunion de l'*American Physical Society*, elles ne furent que confirmées par la suite, au cours des quatre années d'observation à l'aide du DMR.

"It's the greatest discovery of the century - if not of all times."

(Stephen Hawking)

Hawking exagérait en parlant des résultats de COBE comme de la plus grande découverte du 20^{ème} siècle, si pas de tous les temps : la découverte la plus importante de ce siècle *en cosmologie* reste la découverte de l'expansion de l'univers par Hubble en 1929, suivie par la détection du rayonnement de fond cosmologique par Penzias et Wilson en 1964. Cette affirmation de Hawking faisait partie d'une excitation générale autour des résultats de COBE, excitation qui ne faisait que refléter l'impatience avec laquelle les cosmologistes attendaient la découverte des anisotropies.

Il est d'ailleurs assez étonnant de voir avec quel empressement tout le monde a cru aux résultats de COBE. En ce qui concernait les éventuelles anisotropies, la prudence s'imposait pourtant : beaucoup de choses, autres que des fluctuations primordiales réellement présentes dans le rayonnement de fond, pouvaient apparaître sous forme de points plus chauds sur les cartes de COBE. On comprend aisément que, dans ce type d'expériences, le plus difficile est le traitement des erreurs systématiques qui sont en fait principalement liées à l'émission galactique. Mais les causes des erreurs systématiques sont différentes suivant la fréquence à laquelle les observations sont faites. Ainsi, par exemple, différents mécanismes contribuent à l'émission galactique : aux fréquences utilisées par COBE, c'est le rayonnement synchrotron émis par des électrons qui spiralent le long des lignes des champs magnétiques de la Voie Lactée qui domine, tandis qu'à des fréquences plus petites, c'est l'émission par la poussière chaude présente dans le milieu interstellaire. Il est donc très intéressant, quand c'est possible, de comparer les résultats

⁴²C. H. Lineweaver et al., *Ap. J.* **470**, 38 (1996).

⁴³D. J. Fixen et al., *Ap. J.* **473**, 576 (1996).

⁴⁴C. L. Bennett, *Ap. J.* **464**, L1 (1996).

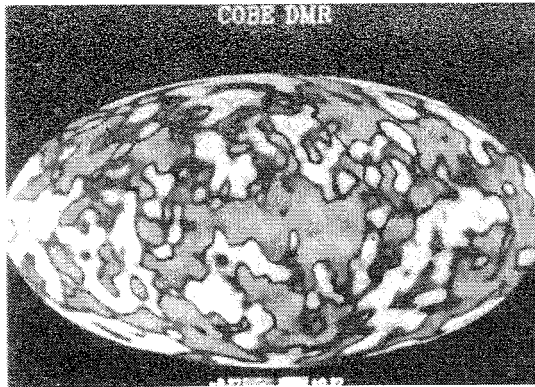


Figure 15: Les anisotropies du rayonnement cosmologique de fond telles qu'elles ont été mesurées par le radiomètre différentiel de COBE. [C. L. Bennett et al., *Ap. J.* **464**, L1 (1996)]

d'expériences menées à des fréquences différentes car les systématiques à traiter ont alors été différentes, voire indépendantes. Si une corrélation positive peut être trouvée entre les différents groupes de résultats, alors les résultats de chacune de ces expériences s'en trouveront fortement valorisés.

"If COBE had been launched a year or two later, it would have been scooped."
(James Peebles)

Les résultats de COBE démontrant la présence d'anisotropies dans le fond cosmologique purent assez rapidement être confirmés grâce à des corrélations entre ceux-ci et d'autres, obtenus dans le cadre d'expériences réalisées dans d'autres gammes de fréquences. Ce fut le cas d'une expérience réalisée au sol à l'Observatoire européen de Tenerife (Canaries). Celle-ci travaillait à des fréquences plus élevées que celles utilisées par COBE⁴⁵. De même, une expérience en ballon menée par Lyman Page (Princeton), Stephen Meyer (MIT) et Ed Cheng (Goddard) a été réalisée à des fréquences plus petites que celles de COBE⁴⁶. La comparaison des résultats de COBE à ceux issus de ces deux expériences a permis de mettre en évidence des corrélations positives entre les différents résultats. Il s'agit là d'un très bon argument en faveur de l'interprétation primordiale des anisotropies.

9 L'après-COBE

La mission COBE a été le début d'une nouvelle ère : l'ère d'une motivation intense de la part des scientifiques pour l'étude du rayonnement cosmologique de fond. Une grande

⁴⁵C. Lineweaver et al. *Ap. J.* **448**, 482 (1995).

⁴⁶K. Ganga et al., *Ap. J.* **410**, L57 (1993).

partie de l'effort expérimental de ces dernières années (et des années à venir) étaient (et sera) consacrées à la recherche des anisotropies à des échelles angulaires inférieures au degré. Ainsi, suite à COBE, un très grand nombre de missions ont été planifiées et ont, entre autres, confirmé la découverte des anisotropies. Les premières confirmations sont venues du satellite soviétique RELICT dont le programme a fonctionné de juillet 1983, date de lancement du satellite, jusqu'en février 1984⁴⁷.

À l'exception du satellite RELICT, les expériences qui suivirent COBE se déroulaient soit au sol, soit en ballon. Les instruments des toutes premières missions au sol étaient de simples radiomètres différentiels mais les techniques ont ensuite évolué. Ainsi, par la suite et encore aujourd'hui, les observations du rayonnement de fond au sol se font soit à l'aide de radiotélescopes (Observatoire européen de Tenerife, la mission Saskatoon, Python, White Dish, OVRO, COLD, CG, Viper, MAT, ...), soit à partir de réseaux d'interféromètres (CAT, ATCA, IAC, Ryle, DAS1, VSA, VLA, CBI, MINT, ...). De manière générale, l'utilisation de l'interférométrie permet d'obtenir une meilleure résolution angulaire, ce qui justifie que la plupart des expériences au sol les plus récentes, ou à venir, utilisent des réseaux d'interféromètres. Un projet d'interférométrie de plus grande envergure est également prévu pour les années à venir. Il s'agit de l'ALMA ("*Atacama Large Millimeter Array*") constitué de 64 antennes de 12 mètres. Ce projet devrait permettre, entre autres, d'étudier des anisotropies jusqu'à des amplitudes de moins de $50 \mu K$ et des échelles angulaires aussi petites que $2'$. Le début de sa construction est prévu dans les prochaines années.

Un grand nombre de missions en ballon ont également suivi COBE, telles que FIRS, ARGO, MAX, MSAM, QMAP, BAM, HACME, BOOMERanG, MAXIMA, Top Hat, ACE, ARCHEOPS, BEAST, ... Parmi ces missions, les ballons BOOMERanG ("*Balloon Observation of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*") et MAXIMA ("*Millimeter-wave Anisotropy eXperiment IMaging Array*") ont beaucoup fait parlé d'eux ces dernières années grâce à des résultats concernant les paramètres cosmologiques dont la précision dépassait celle obtenue jusqu'alors⁴⁸.

Les expériences à l'aide de satellites restent néanmoins la seule manière de parvenir simultanément à couvrir une surface étendue du ciel avec une grande résolution angulaire, une importante sensibilité et sur un large domaine de fréquences tout en évitant la contamination atmosphérique. Tous ces avantages ont, bien sûr, un prix : une expérience par satellite coûte 100 fois plus cher qu'un vol de ballon. Il nécessite aussi beaucoup plus de temps pour la mise sur pied : ce temps se compte en mois pour un ballon et en années pour un satellite. Les sérieux avantages qu'offrent un satellite sont cependant aujourd'hui largement reconnus aussi bien par les scientifiques américains qu'euro-péens. Ainsi, ces deux communautés proposent chacune la construction d'un satellite entièrement dédié à la détection des anisotropies du rayonnement de fond. Il s'agit de MAP, pour les

⁴⁷I. A. Strukov and D. P. Skulachev, *Pis'ma Astron. Zh* **10** (3), 3 (1984); *Sov. Astron. Lett.* **13** (3), 191 (1987); I. A. Strukov *et al.*, *Pis'ma Astron. Zh* **18** (5), 387 (1992); *M. N. R. A. S.* **258**, 37 (1992); *Adv. Space Res.* **13** (12), 425 (1992).

⁴⁸P. de Bernardis *et al.*, *Nature* **404**, 995 (2000) [BOOMERanG] et S. Hanany *et al.*, *Ap. J. Lett.*, **545**, L5 (2000) [MAXIMA].

américains, et de Planck, pour les européens.

MAP (“*Microwave Anisotropy Probe*”) fait partie du projet EXPLORER sélectionné par la NASA en 1996⁴⁹. Il devrait être lancé cet automne à l’aide d’une fusée Delta depuis le Cape Canaveral. Ce satellite devrait mesurer les anisotropies du fond cosmologique avec une sensibilité encore jamais atteinte aujourd’hui et, pour être plus précis, il devrait être capable de détecter des variations de température ΔT de 20 millièmes de Kelvin alors que, pour comparaison, COBE ne pouvait détecter que des variations de l’ordre de 50 millièmes de Kelvin. En ce qui concerne la résolution angulaire, celle de MAP sera de 0.23 degré, ce qui est largement supérieur à celle que possédait COBE (à savoir 7°).

Le projet de satellite européen a reçu initialement le nom de COBRAS/SAMBA. En fait, il s’agissait déjà de la fusion de deux projets : “*COsmic Background Radiation Anisotropy Satellite*” et “*SATellite for Measurement of Background Anisotropies*”. Lorsque celui-ci a été sélectionné et approuvé par l’ESA, à la fin de l’année 1996, il a été rebaptisé Planck en l’honneur du scientifique allemand Max Planck⁵⁰. Le lancement de ce satellite est prévu pour 2007 et son vol devrait durer 15 mois au cours desquels une cartographie (quasi) complète des anisotropies devrait être réalisée. Une résolution angulaire meilleure que 10 minutes d’arc devrait être atteinte ainsi qu’une sensibilité jamais égalée de $\sim 12 \mu K$. Une détermination des paramètres cosmologiques avec une très grande précision devrait être possible⁵¹. Planck devrait ainsi fournir des cartographies couvrant 95 % du ciel et dans un large domaine de longueurs d’onde. Ces “cartes” posséderont évidemment un très grand nombre d’applications dans différents domaines de l’astrophysique (milieu interstellaire, émission galactique, formation d’étoiles, ...). Notons que le satellite Planck possède un petit frère, le ballon ARCHEOPS, qui a effectué son premier vol le 29 janvier de cette année et qui avait à son bord des instruments semblables à ceux qui se trouveront à bord de Planck. Ainsi, ARCHEOPS a permis non seulement de faire des mesures dont l’analyse devrait fournir dans un futur proche des résultats plus précis encore que ceux obtenus récemment par BOOMERanG et MAXIMA, mais en plus, il a permis de tester les instruments de Planck avant leur lancement.

Notons qu’il est également prévu de rechercher dans les futures données de MAP et de Planck d’éventuelles corrélations dans les anisotropies du rayonnement de fond, liées à la topologie de l’univers au cas où les sections spatiales ne seraient pas simplement connexes⁵².

Pour terminer, signalons que des mesures récentes du rayonnement de fond à grand décalage spectral ont permis de mettre en évidence que l’univers était bel et bien en train de se refroidir. Nous avons vu dans l’introduction que, d’après la théorie du Big Bang, le rayonnement de fond avait une température thermodynamique de l’ordre de 3000 K au moment du découplage. A cause de l’expansion, l’univers se refroidit et ces photons

⁴⁹<http://map.gsfc.nasa.gov/>

⁵⁰<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Planck/>

⁵¹On estime que la précision que pourra atteindre Planck sur la valeur des paramètres cosmologiques devrait être de quelques pourcents.

⁵²Pour davantage d’informations sur la topologie de l’univers, consulter: J.-P. Luminet, “*L’Univers chiffonné*”, Librairie Arthème Fayard (2001).

primordiaux sont aujourd'hui observés à une température de l'ordre de 3 K . Ainsi, si l'on parvenait à détecter le rayonnement de fond non pas tel qu'il nous arrive aujourd'hui sur Terre mais bien tel qu'il était dans le passé de l'univers, on pourrait montrer que ce dernier était plus chaud dans le passé qu'aujourd'hui et donc que l'univers est effectivement en train de se refroidir. Cela fournirait une preuve supplémentaire, si besoin en est, en faveur de la théorie du Big Bang chaud. Comme nous l'avons vu, cette théorie prédit la loi de refroidissement suivante : $T(z) = T_0(1+z)$ où T_0 est la température du rayonnement de fond détecté sur Terre ($\sim 3\text{ K}$) et $T(z)$, la température à un décalage spectral z . Ce rayonnement passé ne peut cependant être détecté que de manière indirecte.

L'univers est rempli de nuages obscurs qui ne sont pas visibles directement mais qui peuvent être observés indirectement si, par hasard, une source très lumineuse, tel un quasar, se trouve en arrière-plan. Ainsi, l'étude de spectres de sources lointaines permet de déterminer les propriétés de nuages intergalactiques situés entre ces sources et nous. Les photons du fond diffus, capables d'exciter les atomes de ces nuages, peuvent donc laisser une empreinte dans les spectres de ces sources lointaines. L'étude de ceux-ci devrait donc permettre de mesurer la température que possédait le fond diffus lorsqu'il a excité le nuage intergalactique. La principale difficulté dans ce type d'expérience réside dans l'estimation des différentes contributions aux excitations observées car les photons du fond cosmologique ne sont pas les uniques perturbateurs possibles et, jusqu'il y a peu, les moyens techniques ne permettaient pas d'évaluer ces différentes contributions aux excitations observées dans le spectre de quasars. Ainsi en supposant qu'au maximum toutes les excitations observées étaient dues au rayonnement de fond, seules des bornes supérieures de la valeur de la température au décalage spectral considéré avaient pu être déterminées. Récemment, une équipe franco-indienne a observé le quasar PKS1232+0815 situé à un décalage spectral de $z = 2.33771$ avec le télescope KUYEN, un des quatre télescopes du VLT de l'ESO. Grâce à la supériorité du VLT ainsi qu'à certaines astuces utilisées pour estimer les différentes contributions aux raies observées dans le spectre du quasar, cette équipe est parvenue à estimer une valeur de la température du fond diffus à un tel redshift et non une borne supérieure, comme cela avait été fait jusqu'à présent. Ce résultat signifie que la température du fond cosmologique à un décalage spectral de 2.33771 devrait être située entre 6 K et 14 K , là où la théorie du Big Bang prévoit une température de $\sim 9\text{ K}$. Voilà une nouvelle et solide confirmation pour cette théorie⁵³.

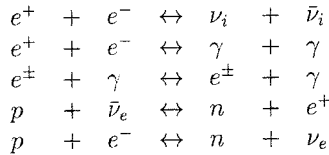
10 Appendice : la nucléosynthèse primordiale

Dans cet appendice, nous nous proposons de faire apparaître la relation qui existe entre la température actuelle du rayonnement de fond et la nucléosynthèse primordiale car c'est cette relation qui a permis les premières prédictions de la valeur de la température du rayonnement de fond. Nous n'entrerons pas ici dans tous les détails de la théorie de la nucléosynthèse primordiale : nous nous limiterons à en présenter une version simplifiée.

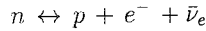
⁵³R. Srianand, P. Petitjean and C. Ledoux, *Nature* **408**, 931 (2000).

Celle-ci permettra de saisir les grandes idées qui sont à la base de cette théorie et de cerner comment il est possible de déduire la température actuelle du rayonnement de fond à partir de considérations liées à la nucléosynthèse primordiale, comme l'ont fait Alpher et Herman vers la fin des années quarante ainsi que Dicke et Peebles dans le courant des années soixante.

Lorsque la température de l'univers est descendue en-dessous de $10^{12} K$, ce dernier est constitué d'un gaz de photons, de neutrinos, de paires électrons-positrons ainsi que d'une petite quantité de nucléons, le tout en équilibre thermique. Les réactions nucléaires importantes à cette époque sont



où ν_i (resp. $\bar{\nu}_i$) représente les 3 types de neutrinos (resp. antineutrinos) qui existent. Il se produit aussi occasionnellement la désintégration β et sa réaction inverse données par



Toutes ces réactions sont, à ce moment-là, tellement rapides et nombreuses qu'elles instaurent l'équilibre thermique du gaz. La valeur du rapport entre les densités numériques des neutrons et des protons, noté n_n/n_p , est donc celle donnée par l'équilibre, à savoir

$$\frac{n_n}{n_p} = \left(\frac{m_n}{m_p}\right)^{3/2} e^{-\Delta m c^2/kT} \approx e^{-\Delta m c^2/kT} = e^{-1.5/T_{10}}$$

où T_{10} est la température exprimée en $10^{10} K$, m_n , la masse du neutron ($939.566 MeV$), m_p , la masse du proton ($938.272 MeV$) et où $\Delta m = m_n - m_p$. Notons qu'à la température de $10^{11} K$, le rapport n_n/n_p vaut ~ 0.86 .

Lorsque la température devient de l'ordre de $3.10^{10} K$ ($t \sim 0.1 sec$), la transformation par désintégration β des neutrons, plus lourds, en protons, plus légers, commence à se faire de manière plus aisée que l'inverse. On a alors $n_n/n_p \sim 0.6$. A la température de $10^{10} K$ ($t \sim 1 sec$), le libre parcours moyen des neutrinos et des antineutrinos devient tellement grand que ceux-ci commencent à se comporter comme des particules libres. On parle alors du *découplage des neutrinos*⁵⁴. Le rapport des populations de neutrons et de protons a encore été déplacé : il y a maintenant 20 % de neutrons et 80 % de protons.

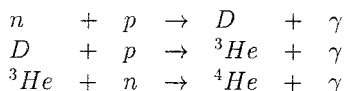
Lorsque la température de l'univers devient de l'ordre de la masse de l'électron ($kT_e \sim m_e c^2$), à savoir $T_e \sim 3.10^9 K$ ($t_e \sim 10 sec$), l'équilibre entre les électrons (et positrons) et la radiation est rompu. L'annihilation des paires $e^+ - e^-$ se poursuit alors que les photons

⁵⁴En fait, seuls les neutrinos muoniques et taoniques se découplent lorsque $T \approx 3.10^{10} K$: le découplage des neutrinos électroniques se produit un peu plus tard, ce qui permet à l'équilibre $e^\pm - p - n - \gamma$ d'exister encore un petit moment.

ne sont plus suffisamment énergétiques pour recréer de nouvelles paires et compenser ainsi l'annihilation des anciennes. Une fois les paires électrons-positrons disparues, la seule réaction nucléaire qui continue à se produire est la désintégration des neutrons en protons. La fraction en masse des neutrons présents dans l'univers commence alors à décroître exponentiellement, selon la loi suivante :

$$X_n(t) = X_n(t_e) e^{-(t-t_e)/\tau_n} \approx X_n(t_e) e^{-t/\tau_n}$$

où $X_n \equiv n_n/n_{mat}$ est la fraction en masse des neutrons, n_{mat} étant le nombre total de nucléons, et où τ_n est le demi-temps de vie du neutron par rapport à la désintégration β , à savoir $10.6 \pm 0.2 \text{ min}$. La densité en masse des neutrons chute ainsi de 0.17 en $T_e \equiv 3.10^9 \text{ K}$ à 0.12 en $T_* \equiv 10^9 \text{ K}$. Cette période voit une faible production de noyaux de deutérium via la réaction $n + p \rightarrow D + \gamma$ mais les photons présents dans l'univers sont encore très énergétiques à cette température et dissolvent le deutérium à peine formé. Dès lors, on comprend aisément que la nucléosynthèse primordiale commencera d'autant plus tôt dans le temps que la proportion de neutrons par rapport aux photons sera grande. En fait, de manière générale, ce n'est que lorsque la température de l'univers devient inférieure à 10^9 K ($t \sim 200 \text{ sec}$) que la photodissociation des noyaux de deutérium commence à être de moins en moins efficace. La nucléosynthèse primordiale peut alors commencer : il y a production principalement du deutérium (D), du tritium (3H), de l'hélium-3 (3He) et de l'hélium-4 (4He) primordiaux. Par souci de simplicité, nous considérerons ici que l'hélium-4 primordial ne s'est formé que par l'intermédiaire de la série de réactions nucléaires suivante :



A l'équilibre, la fraction en masse X_A d'un constituant de masse atomique A et dont le noyau contient Z protons est donnée par

$$(X_A)_{eq} = 1.2^{A-1} g_A \pi^{(1-A)/2} 2^{(3A-5)/2} A^{5/2} \eta^{A-1} \left(\frac{T}{m_{mat}} \right)^{3(A-1)/2} X_p^Z X_n^{A-Z} e^{B_A/T}$$

où $\eta = n_{mat}/n_\gamma$, où m_{mat} est la masse moyenne d'un nucléon, où g_A vaut 3, 2 et 1 pour respectivement le deutérium, l'hélium-3 et l'hélium-4 et où $B_A \equiv Z m_p + (A-Z) m_n - m_A$ est l'énergie de liaison du constituant.

Au vu de la série de réactions données ci-dessus, il vient

$$(X_n)_{eq} \equiv \frac{n_n}{n_{mat}} = X_p e^{-1.3/T_{MeV}}$$

$$(X_2)_{eq} \equiv \frac{2n_2}{n_{mat}} = 16.3 \eta \left(\frac{T}{m_{mat}} \right)^{3/2} X_n X_p e^{2.22/T_{MeV}}$$

$$(X_3)_{eq} \equiv \frac{3n_3}{n_{mat}} = 57.4 \eta^2 \left(\frac{T}{m_{mat}} \right)^3 X_n X_p^2 e^{7.72/T_{MeV}}$$

$$(X_4)_{eq} \equiv \frac{4n_4}{n_{mat}} = 113 \eta^3 \left(\frac{T}{m_{mat}} \right)^{9/2} X_n^2 X_p^2 e^{28.3/T_{MeV}}$$

où T_{MeV} est la température de l'univers exprimée en MeV .

Lorsque la température de l'univers chute en-dessous de $4.10^8 K$ ($t > 10^3 sec$), les barrières de potentiels deviennent trop importantes et ne permettent pas la production d'éléments plus lourds que l'hélium⁵⁵. La nucléosynthèse primordiale s'arrête à ce moment-là. Si, en première approximation, on considère que tous les neutrons présents dans l'univers avant le début de la synthèse des éléments chimiques légers se retrouvent dans les noyaux d'hélium-4 une fois celle-ci terminée, on trouve alors que la fraction en masse de l'hélium-4 primordial une fois la nucléosynthèse primordiale terminée ($T < 4.10^8 K$) vaut deux fois la fraction en masse des neutrons avant qu'elle ne commence ($T \sim 10^9 K$) :

$$Y_P \equiv X_4 \approx 2 X_n(T_*) \approx 0.24$$

En réalité, la nucléosynthèse cesse avant que tous les sous-produits, tels que D et 3He , n'aient eu le temps de se transformer en 4He . De petites quantités de deutérium et d'hélium-3 sont donc également présentes au sortir de la nucléosynthèse. Ainsi, des développements plus complexes montrent que les abondances relatives des différents éléments chimiques produits au cours de la nucléosynthèse primordiale dépendent des paramètres η , τ_n ainsi que du nombre N_ν de types de neutrinos. Les dépendances en η de ces abondances sont présentées sur la figure ci-dessous. On voit que la quantité d'hélium-4 produit augmente lorsque η augmente, ce qui peut aisément se comprendre : comme nous l'avons déjà signalé, plus η est important, plus la nucléosynthèse primordiale commence tôt et donc plus la période durant laquelle le deutérium et l'hélium-3 vont se transformer en hélium-4 sera longue. D'ailleurs, on observe bien une diminution des abondances de deutérium et d'hélium-3 lorsque η augmente.

Lorsque η est compris entre $1.5 \cdot 10^{-10}$ et 10^{-9} , la proportion en masse d'hélium-4, notée Y_P , peut être approximée de la manière suivante :

$$Y_P = 0.23 + 0.011 \ln [\eta 10^{10}] + 0.013 (N_\nu - 3) + 0.014 (\tau_n - 10.6 \text{ min})$$

Ainsi, si l'on suppose $N_\nu = 3$ et $\tau_n = 10.6 \text{ min}$, une détermination observationnelle de la fraction en masse de l'hélium-4 présent aujourd'hui dans l'univers fournit une estimation de la valeur du paramètre η et inversement : une connaissance de η permet de contraindre

⁵⁵Le fait qu'il n'existe pas de noyaux de masse atomique 5 (et 8) stables est également une des causes pour lesquelles la nucléosynthèse primordiale s'arrête à l'hélium-4. Il faut toutefois signaler que durant la nucléosynthèse, un petit nombre de noyaux de 7Li et 7Be ont également été produits.

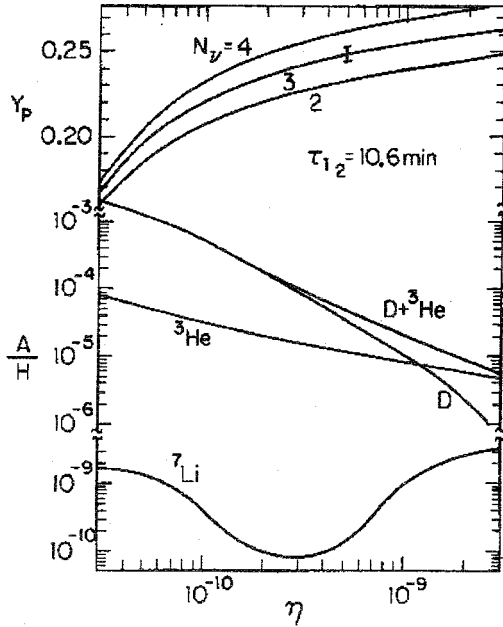


Figure 16: Les abondances des éléments chimiques produits lors de la nucléosynthèse primordiale en fonction du paramètre η . [Figure scannée de E. W. Kolb and M. S. Turner, "The early Universe", Addison-Wesley Publishing Company (1990)]

Y_P . On voit que l'abondance en masse de l'hélium-4 telle qu'elle existe dans l'univers actuelle, à savoir $Y_P \approx 0.23$, est associée à un paramètre η de l'ordre de 10^{-10} .

Nous allons à présent établir la relation qui existe entre le paramètre η (et donc Y_P) et la température actuelle T_0 du rayonnement de fond. La quantité η est définie comme le rapport de la densité numérique n_{mat} de matière (baryonique) présente dans l'univers à un instant donné caractérisé par la température T et de la densité de photons n_γ présents dans le rayonnement supposé de type corps noir à cette même température T . On a alors

$$\eta = \frac{n_{mat}}{n_\gamma} = \frac{n_{mat}}{20.3 T^3}$$

où n_{mat} et n_γ doivent être exprimés en cm^{-3} si T est donné en Kelvin.

Dans le modèle cosmologique standard, la densité n_{mat} est proportionnelle à T^3 . Dès lors, le rapport η peut être supposé constant entre le moment où la production

d'hélium-4 primordial se termine et aujourd'hui. On peut ainsi écrire

$$\eta = \eta_0 = \frac{n_{mat,0}}{20.3 T_0^3} \approx \frac{10^{-6}}{20.3 T_0^3}$$

où les indices "0" signifient "les valeurs actuelles des quantités indicées" et où l'estimation pour $n_{mat,0}$ a été obtenue en prenant le rapport de la densité $\rho_{mat,0}$ de matière présente aujourd'hui dans l'univers et de la masse m_H de l'atome d'hydrogène, principal constituant de l'univers actuel. Il vient alors

$$n_{mat,0} = \frac{\rho_{mat,0}}{m_H} \approx \frac{10^{-30} \text{ g cm}^{-3}}{10^{-24} \text{ g}} \approx 10^{-6} \text{ cm}^{-3} \approx 20.3 \eta T_0^3$$

Les premiers travaux concernant la physique de l'univers primordial réalisés par Gamow et ses collègues ont permis de fournir une valeur au paramètre η à partir de l'estimation de l'époque des abondances des éléments légers et d'en déduire une prédiction pour la température actuelle du rayonnement cosmologique de fond par l'intermédiaire de la relation ci-dessus. Bien sûr, dans les années quarante, la théorie de la nucléosynthèse primordiale n'en était encore qu'à ses débuts et tout restait à faire⁵⁶. C'est donc à tâtons que progressait à l'époque la mise sur pied de la théorie de la nucléosynthèse primordiale telle que nous la connaissons aujourd'hui. Ceci explique pourquoi Alpher et Herman, dans un premier temps, puis Peebles, ensuite, ont donné des estimations différentes de T_0 , à savoir respectivement $5 K$ pour les premiers et $10 K$ pour le second. Aujourd'hui, notre connaissance de l'univers primordial s'est largement améliorée et ce, principalement grâce à l'étude du rayonnement de fond. La température actuelle de celui-ci étant désormais connue très précisément, c'est la démarche inverse qui se produit : la connaissance actuelle de T_0 est utilisée pour estimer la valeur du paramètre η et ainsi de contraindre les théories de la nucléosynthèse primordiale.

11 Remerciements

Je tiens à remercier Jean-Pierre Swings pour l'aide qu'il m'a procurée au cours de la réalisation de ce projet ainsi que pour sa lecture critique du manuscrit. Mes remerciements vont également à Jean Surdej et à Alain Smette pour les informations et les suggestions de lecture qu'ils m'ont fournies.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat pour laquelle l'intervention du FRIA est particulièrement appréciée.

12 Bibliographie

1. G. Smoot, "*Les rides du temps*", Editions Flammarion (1994).

⁵⁶Pour rappel, Gamow était un pionnier dans ce domaine.

2. M. Chown, "*Afterglow of Creation*", University Science Books, Sausalito, California (1996).
3. S. Weinberg, "*Les trois premières minutes de l'univers*", Editions du Seuil, Paris (1988).
4. G. Gamow, "*The Creation of the Universe*", Viking Press (1952).
5. M. Rowan-Robinson, "*Ripples in the Cosmos*", W. H. Freeman Spektrum, Oxford (1993).
6. F. Hoyle, G. Burbidge & J. V. Narlikar, "*The cosmic microwave background - an historical account*", chapitre 8 dans "*A different approach to cosmology*", Cambridge University Press (1999).
7. A. A. Penzias, "*Cosmology and Microwave Astronomy*", chapitre 3 dans "*Cosmology, Fusion & Other Matters. George Gamow Memorial Volume*", Editions F. Reines, Adam Hilger Ltd, London (1972).
8. J. C. Mather and J. Boslough, "*The Very First Light*", BasicBooks, New York (1996).
9. "*Examining The Big Bang And The Diffuse Background Radiations*", proc. of the 168th symposium of the International Astronomical Union, Kluwer Academic Publishers, London (1996).
10. R. B. Partridge, "*3K : The Cosmic Microwave Background Radiation*", Cambridge University Press (1995).
11. J. Demaret, "*Cosmologie physique*", notes de cours, Université de Liège (1997); "*Univers. Les théories de la cosmologie contemporaine*", Editions Le Mail (1991).
12. M. Lachièze-Ray et E. Gunzig, "*Le rayonnement cosmologique*", Editions Masson, Paris (1995).
13. A. Mazure, G. Mathez et Y. Mellier, "*Chronique de l'espace-temps*", Editions Masson, Paris (1994).
14. R. C. Kraan-Korteweg, "*Galaxies behind the Milky Way and the Great Attractor*", astro-ph/0006199; L. Staveley-Smith, "*A HI Survey of the Great Attractor Region*", astro-ph/0009223.
15. E. W. Kolb and M. S. Turner, "*The early Universe*", Addison-Wesley Publishing Company (1990).
16. E. W. Kolb and M. S. Turner, "*The early Universe : Reprints*", Addison-Wesley Publishing Company (1990).

17. P. Coles and F. Lucchin, "*Cosmology. The Origin and Evolution of Cosmic Structure*", John Wiley & sons, Chichester (1995).

Elisa Di Pietro
Université de Liège - Faculté des sciences
Institut d'Astrophysique et de Géophysique
5, Avenue de Cointe, 4000 Liège - Belgique
E-mail : dipietro@astro.ulg.ac.be