

Le rayonnement du fond de ciel cosmologique. La lumière fossile de l'Univers.

Fabrice Lamareille
Osservatorio Astronomico di Bologna

22 juin 2007

Résumé

Le rayonnement du fond de ciel cosmologique est l'un des trois piliers de la théorie du Big Bang avec l'abondance primordiale des éléments chimiques et l'expansion de l'Univers. Cette lumière des origines qui baigne tout l'Univers est une source d'information très importante pour comprendre à la fois l'histoire et la destinée de l'Univers.

1 La théorie du Big Bang

Au début du XXème siècle, Albert Einstein découvre la relativité générale qui décrit avec une grande précision les phénomènes liés à la gravitation à proximité d'un objet très massif (par exemple le Soleil). Einstein n'assimile plus la gravité à une force (comme Newton auparavant) mais à une simple manifestation de la courbure de l'espace-temps, sous l'effet de la masse qu'il contient (figure 1). Ainsi il relie la géométrie de l'Univers à son contenu en matière et énergie, c'est l'équation d'Einstein.

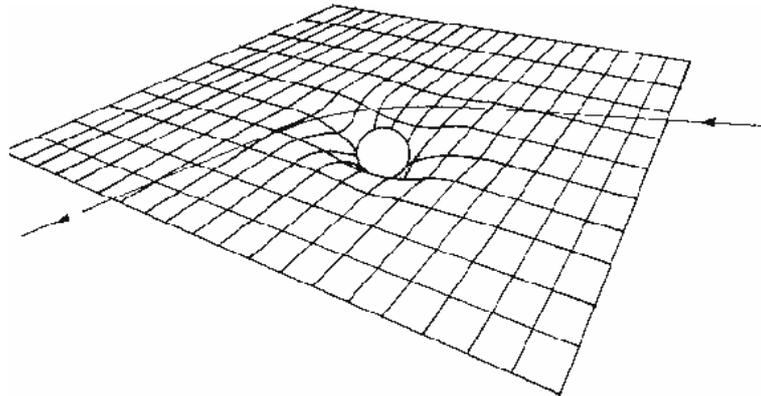


FIG. 1 – Représentation schématique (à deux dimensions) de la courbure de l'espace sous l'effet d'une masse.

En appliquant cette équation à l'Univers dans son ensemble, ses successeurs trouvent tous des solutions pour lesquelles toutes les dimensions de l'Univers (espace et temps) sont en expansion naturelle. Mais à l'époque on ne connaît pas ou peu les galaxies et l'image que l'on a de l'Univers (qui se réduit alors à notre propre galaxie, la Voie Lactée) est celle d'un Univers statique, sans mouvement d'ensemble ni expansion. Einstein lui-même est obligé de modifier ses équations pour qu'elles donnent la solution statique attendue, ce qu'il qualifiera plus tard, selon la légende, de "plus grande erreur de sa vie".

Lorsque Edwin Hubble découvre quelques années plus tard que l'Univers est bel et bien en expansion, un autre problème se pose : si l'on repasse le film de l'histoire de l'Univers en sens inverse, l'expansion se transforme en contraction et l'on aboutit indéniablement à un état ultradense où la matière telle que nous la connaissons ne peut subsister. C'est cet état ultradense du "commencement" qu'on appellera plus tard le "Big Bang" par analogie avec l'explosion d'une bombe, analogie malheureuse d'ailleurs car elle fait penser à tort que cette "explosion" a eu lieu à un instant et un endroit particulier dans un espace vide.

En réalité l'Univers n'a pas plus de point particulier qu'il n'a de début : tout ce qu'il faut retenir c'est que l'Univers est en expansion et que par conséquent il y a eu dans son passé une phase, qu'on appelle le Big Bang, où la matière qu'il contient était comprimée sous une forme ultradense. Ce qui s'est passé avant cet état sort du domaine des théories actuelles, car la matière y est tellement comprimée qu'elle existe sous une forme que la physique actuelle est incapable de décrire.

2 La nucléosynthèse primordiale

La matière telle que nous la connaissons est en réalité formée de constituants élémentaires que l'on appelle les atomes. Ces atomes appartiennent en fonction de leur masse à différentes familles qu'on appelle des éléments : l'hydrogène et l'oxygène sont par exemple les deux éléments qui composent l'eau. Le carbone est l'élément de base de tous les êtres vivants. L'azote et l'oxygène sont les constituants de l'air que nous respirons. Le fer, l'or, l'argent et la plupart des métaux sont eux-même des éléments.

De leur côté, les atomes sont aussi constitués de deux "briques" élémentaires : un noyau chargé d'électricité positive et un nuage d'électrons chargés négativement qui tournent autour, attirés par la force électromagnétique. Les noyaux eux-mêmes sont constitués de protons, qui sont tous chargés positivement mais qui tiennent ensemble grâce à la force nucléaire forte, et de neutrons (figure 2).

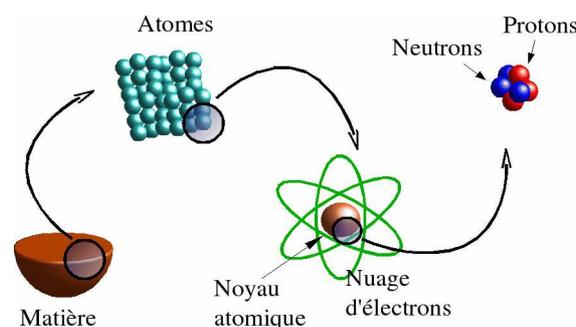


FIG. 2 – Les constituants de la matière.

Durant les quelques secondes qui suivent le Big Bang, la matière est encore suffisamment dense et chaude pour que les collisions entre les éléments qui la compose soient très fréquentes, tellement fréquentes que certains de ces éléments fusionnent pour former un nouvel élément plus lourd. Ainsi les protons et les électrons forment des neutrons, les protons et les neutrons forment des noyaux de deutérium (cet atome remplace l'hydrogène dans la constitution de l'eau lourde), deux noyaux de deutérium forment un noyau d'hélium, etc... Cette phase imaginée par George Gamow en 1935 est appelée la nucléosynthèse primordiale.

Malheureusement, les calculs prévoient que la nucléosynthèse primordiale aurait dû créer beaucoup plus d'hélium qu'on en observe actuellement dans l'Univers (ce

dernier est constitué d'environ 75% d'hydrogène, 25% d'hélium et de quantités très faibles des autres éléments). Pour expliquer ce paradoxe apparent, Ralph Alpher et Robert Herman proposent une explication en 1948 : pour ralentir la fusion des noyaux de deutérium en hélium, il faut que l'Univers ait été constitué dès le moment du Big Bang d'une grande quantité de photons (les constituants élémentaires de la lumière) qui firent effet tampon.

3 La découverte de Penzias et Wilson

Il n'y a aucune raison que les photons, qui, du temps de la nucléosynthèse primordiale, ralentissaient la production d'hélium, aient aujourd'hui disparu. Bien au contraire, ils doivent encore aujourd'hui emplir tout l'Univers de leur lumière. Alpher et Herman avaient calculé que, depuis le Big Bang, ces photons devaient avoir perdu une bonne partie de leur énergie (sous l'effet de l'expansion de l'Univers, voir ci-après) et n'étaient donc plus visibles à l'œil nu. En effet quelques années auparavant, en 1941, Andrew McKelland découvrait en observant les molécules de cyanogène du milieu interstellaire que ces dernières étaient perturbées par un rayonnement inconnu, de type micro-onde, qui remplissait tout le ciel. Cette découverte passa malheureusement inaperçue.

Quelques années plus tard, en 1965, plusieurs équipes internationales (Robert Dicke, Fred Hoyle et Iakov Zeldovich) calculèrent précisément les propriétés que devraient avoir ces photons des origines. Ils entreprirent alors de monter une expérience capable de les détecter. Pendant ce temps deux ingénieurs de la société Bell Telephone Company, qui avaient construit une antenne de télécommunication, décidèrent de pointer cette dernière vers le ciel afin de capter le rayonnement des étoiles et des galaxies dans le domaine des ondes radio. Ces ingénieurs, qui se nommaient Arno Penzias et Robert Wilson (figure 3), découvrirent rapidement qu'un bruit de fond parasitait leurs observations quelle que soit la direction dans laquelle ils observaient.

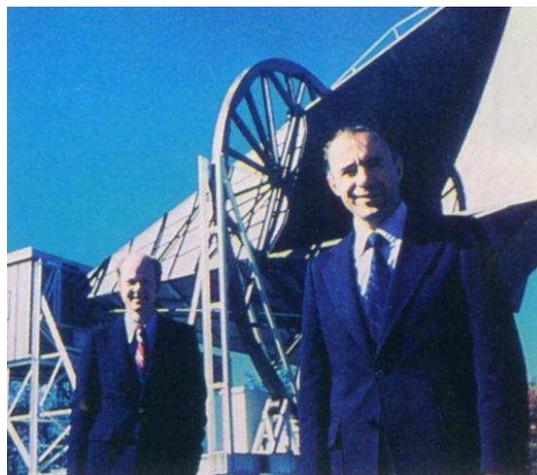


FIG. 3 – Penzias et Wilson devant leur antenne de télécommunication.

Après avoir vérifié plusieurs fois leurs appareils, et après avoir chassé des pigeons qui avaient fait leur nid dans l'antenne, Penzias et Wilson comprirent qu'ils avaient fait une grande découverte : ils étaient les premiers à capter directement les photons issus du Big Bang. Leurs travaux furent publiés en 1965 et ils leur valurent le prix Nobel en 1978, au grand regret de Dicke qui leur avait soufflé l'interprétation de cette découverte.

4 L'expansion de l'Univers

Afin de comprendre la nature du rayonnement de fond cosmologique, il est nécessaire de prendre en compte le phénomène d'expansion de l'Univers.

D'après les équations de la relativité générale, toutes les dimensions de l'Univers sont en expansion, c'est-à-dire que toutes les longueurs de l'Univers grandissent naturellement. Ainsi, chaque année, chaque kilomètre d'espace se dilate un peu pour gagner quelques petits 70 nanomètres¹ (70 milliardième de mètre) supplémentaires. Cette expansion n'est bien évidemment pas visible à notre échelle car les forces électromagnétiques qui maintiennent les atomes entre eux sont largement suffisantes pour la contrecarrer. De même à plus grande échelle, les forces de gravitation suffisent à maintenir en équilibre les planètes du système solaire et les étoiles de la Galaxie. En revanche, à l'échelle intergalactique, ces forces ne sont plus suffisantes pour maintenir les galaxies ensemble et celles-ci s'éloignent inexorablement.

S'il est nécessaire de prendre en compte cette expansion pour comprendre le rayonnement de fond cosmologique, c'est parce que la longueur d'onde des ondes lumineuses (leur couleur) n'échappe pas à l'expansion de l'Univers. Ainsi les photons primordiaux ont vu, depuis l'instant de la recombinaison, leur longueur d'onde augmenter progressivement et leur énergie diminuer d'autant (ce qui correspond à un décalage du bleu vers le rouge).

5 Le mur de brume

Au moment du Big Bang, l'Univers était très dense : la matière et la lumière qui le composaient étaient liées par un grand nombre d'interactions. Dans le cas d'une collision entre un noyau d'atome (ou un électron) et un photon, on parle de diffusion : la direction du photon est changée et son énergie (sa longueur d'onde) peut être modifiée.

Cette diffusion est l'équivalent à l'échelle microscopique du brouillard : tout faisceau de lumière y est réfléchi dans toutes les directions et se trouve rapidement transformé sous forme de lumière diffuse, si bien qu'il est impossible de voir à travers. Dans le cas de la diffusion microscopique, la possibilité que l'énergie des photons puisse être modifiée fait qu'un faisceau de photons ayant tous la même couleur se retrouve rapidement transformé en un faisceau multicolore (une lumière blanche).

Ainsi les photons créés au moment du Big Bang, quelles que soient leur énergie et leur direction d'origine, ont été transformés en une mer de photons de toutes les énergies possibles et allant dans toutes les directions (le mur de brume cosmologique) : l'Univers était donc à cette époque totalement opaque.

Heureusement, au fil de l'expansion de l'Univers, la densité de ce dernier diminue progressivement et les collisions entre les photons et la matière deviennent de moins en moins fréquentes. Lorsque la densité de l'Univers a suffisamment baissé, des atomes peuvent se former de façon durable, cette période est appelée la recombinaison.

Très rapidement l'ensemble des noyaux d'atomes et des électrons se recombinent. La diffusion des photons est donc devenue impossible et le mur de brume s'estompe peu à peu. C'est donc à partir de la recombinaison que les photons primordiaux ont commencé à se propager librement dans l'Univers pour former le rayonnement de fond cosmologique. Depuis ce moment, compte tenu de la très faible densité du vide intergalactique, ces photons n'ont pratiquement plus interagi avec la matière et ont donc conservé leurs propriétés d'origine.

¹D'après les dernières estimations.

6 Le ciel nocturne n'est pas noir !

Une des grandes interrogations de la cosmologie, connue sous le nom de paradoxe d'Olbers, fut de se demander pourquoi, la nuit, le ciel est noir. En effet si l'on considère que l'Univers est infini et contient une infinité de galaxies uniformément réparties, on devrait voir une galaxie quelle que soit la direction du ciel dans laquelle on observe, et la somme des lumières de toutes les galaxies de l'Univers devrait éclairer le ciel nocturne d'une lueur intense. Ce paradoxe fut résolu grâce à la découverte de la vitesse de la lumière d'une part et la théorie du Big Bang d'une autre part.

Le caractère fini de la vitesse de la lumière (elle ne se propage pas de manière instantanée) conduit à la constatation suivante : plus on observe loin dans l'espace, plus on observe dans le passé, car les photons qu'on reçoit ont mis plus de temps pour parvenir jusqu'à nous. De son côté, la théorie du Big Bang prévoit que, dans le passé, l'Univers est passé par une phase ultradense et opaque, où les galaxies n'existaient pas encore et où la lumière ne se propageait pas à cause des interactions entre les photons et la matière. Ainsi, lorsqu'on regarde suffisamment loin dans l'espace, et donc suffisamment loin dans le passé, on n'observe plus de galaxies mais uniquement le mur de brume prévu par le Big Bang. Le paradoxe d'Olbers est donc résolu : le nombre de galaxies contenues entre nous et le mur de brume cosmologique n'est ni infini ni suffisant pour que leur faible lumière puisse être perçue à l'oeil nu.

Le ciel n'est donc pas noir. Par ailleurs le mur de brume cosmologique demeure lui aussi invisible car sa lumière, autrefois visible, est aujourd'hui située dans le domaine des micro-ondes à cause de l'expansion de l'Univers.

7 Le satellite COBE

Notre atmosphère terrestre n'est pas aussi transparente qu'on pourrait le croire. En effet, seules la lumière visible et les ondes radio arrivent à passer à travers tandis que les autres domaines de longueur d'onde sont absorbés. Toute observation dans un autre domaine de longueur d'onde que le domaine visible ou radio nécessite l'envoi d'un satellite hors de l'atmosphère. Ainsi, même si Penzias et Wilson ont pu observer une partie des photons primordiaux dans le domaine des ondes radio, le maximum d'émission du fond de rayonnement cosmologique, situé dans le domaine des micro-ondes, est inaccessible depuis la surface du sol.

Lancé en 1988, le satellite COBE (COsmic Background Explorer : explorateur du fond diffus cosmique) conçu par la NASA avait pour rôle de résoudre ce problème. Les premiers résultats furent présentés en 1989 : l'expérience FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer : spectrophotomètre absolu fonctionnant dans l'infrarouge lointain) a démontré, avec une très grande précision, que le fond diffus cosmologique suit parfaitement la courbe théorique prévue (un corps noir à la température de 2.73 kelvins), et ce quelle que soit la direction d'observation dans le ciel.

Trois ans plus tard, en 1992, sont publiés les résultats de la deuxième expérience embarquée sur COBE : l'expérience DMR (Differential Microwave Radiometer : radiomètre différentiel à micro-ondes). Cette dernière, en comparant l'intensité du rayonnement de fond de ciel dans deux directions différentes, a détecté des petites variations de température de l'ordre du millième de kelvins. Ainsi, au moment de la recombinaison, certaines zones de l'Univers étaient légèrement plus froides et d'autres légèrement plus chaudes. Compte tenu de l'expansion de l'Univers, les variations de quelques millièmes de degré observées correspondent à l'époque à des variations de quelques degrés.

8 Le satellite WMAP et la courbure de l'Univers

Les variations de température détectées par COBE étaient si faibles qu'elles étaient du même ordre de grandeur que l'incertitude de mesure de ce satellite, ce qui rendait leur interprétation très hasardeuse. Lancé en 2001, le satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe : détecteur d'anisotropies micro-ondes Wilkinson) devait pallier à ce problème en utilisant une technologie beaucoup plus précise. Les premiers résultats, révélés en 2003, donnent une carte du fond de rayonnement cosmologique avec une précision de 3 dixièmes de degré en échelle angulaire et 20 millionnièmes de kelvin en température (figure 4).

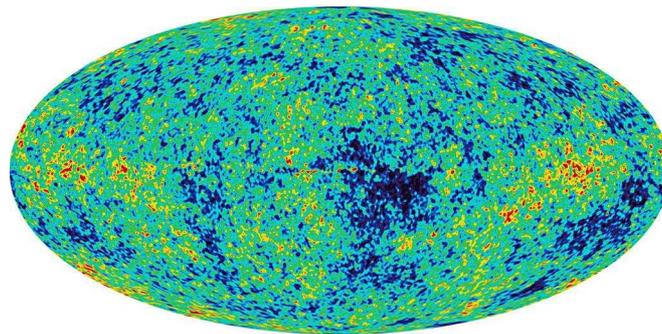


FIG. 4 – L'instantané du Big Bang vu par WMAP.

Si la relativité générale prédit que l'espace-temps peut se courber localement sous l'effet d'une masse, qu'en est-il de l'Univers dans son ensemble? Il est possible de définir une courbure globale de l'Univers qui peut être soit nulle (Univers plat), soit positive (Univers fermé, correspondant à la surface d'une hypersphère à 5 dimensions), soit négative (Univers ouvert), voir la figure 5. Selon l'équation d'Einstein, ce paramètre de courbure dépend directement de la quantité de matière contenue dans tout l'Univers (sa densité). Ce paramètre est aussi une donnée essentielle des équations de l'expansion de l'Univers qui influe sur sa destinée : alors qu'un Univers ouvert ou plat ne cessera jamais de grandir, un Univers fermé atteindra une taille limite au delà de laquelle l'expansion se transformera en contraction, jusqu'à revenir à un état ultradense semblable au Big Bang qu'on appellerait alors le "Big Crunch".

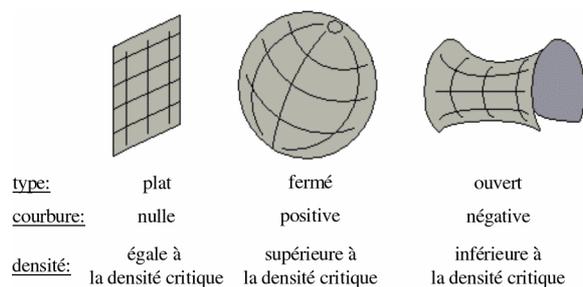


FIG. 5 – Les formes possibles de l'Univers.

L'étude du rayonnement de fond cosmologique permet de déterminer la courbure de l'Univers. En effet, dans un Univers courbe les rayons lumineux ne se propagent pas en ligne droite et les objets lointains sont déformés. L'Univers dans son ensemble fait donc office de lentille qui grossit ou amincit l'image du fond de rayonnement cosmologique. On peut calculer théoriquement l'échelle des perturbations de température les plus importantes. L'observation de ces perturbations permet donc de voir

si leur image a été grossie ou amincie, et d'en déduire la courbure de l'Univers. Les résultats du satellite WMAP semblent indiquer que nous vivons dans un Univers plat.

Notons que l'étude des autres perturbations de température moins importantes permet d'évaluer les éléments qui contribuent à la densité totale de l'Univers (matière lumineuse, matière noire, etc...). Ce travail sera réalisé à l'aide du futur satellite européen "Planck".

Bibliographie

- [1] SÉGUIN (M.) et VILLENEUVE (B.), *Astronomie & Astrophysique*. Masson, 1995.
- [2] NOTTALE (L.), *La relativité dans tous ses états*. Hachette Littérature, 2000.
- [3] LUMINET (J.-P.), *L'Univers chiffonné*. Fayard, 2001.
- [4] HASINGER (G.) et GILLI (R.), « Le grand inventaire cosmique », *Pour la Science*, vol. 297, juillet 2002, p. 40–46.
- [5] PRUNET (S.) et BOUCHET (F.), « Le rayonnement fossile », *Pour la Science*, vol. 308, juin 2003, p. 44–49.
- [6] LACHIÈZE-REY (M.), *Initiation à la cosmologie*. Dunod, 2000.
- [7] GOUGUENHEIM (L.), *Méthodes de l'astrophysique*. Hachette, 1981.
- [8] VILLEMIN (G.). « relativité générale - introduction », octobre 2003.
[http ://villemin.gerard.free.fr/Science/Relgene.htm](http://villemin.gerard.free.fr/Science/Relgene.htm).