

Séance du 8 juin 2015

Le fond de rayonnement cosmologique ou la première lueur de l'Univers

par Denis PUY

Professeur à l'Université de Montpellier
Conférencier invité

*“Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la Terre ? ...
Il préparait des supplices
à ceux qui scrutent ces profonds mystères.”*

Saint Augustin, Confessions, XI-XII, 14

MOTS-CLÉS

Cosmologie - Fond de rayonnement - Univers primordial.

RÉSUMÉ

Il y a tout juste cent ans, Albert Einstein proposa une théorie nouvelle de l'espace physique, incluant la gravitation, dont les conséquences allaient considérablement ébranler notre vision globale de l'Univers. Cette théorie, dite de la relativité générale, engendra un incroyable paradigme celui de l'expansion de l'Univers. Il y a vingt-cinq années, la découverte d'un fond de rayonnement à l'Univers confirma définitivement, par l'observation, cette propension de croissance de l'espace au cours du temps. Dans cet article, outre de présenter les grandes lignes de la théorie de la relativité générale d'Einstein, nous décrirons comment le paradigme d'expansion émerge de la théorie puis nous soulignerons une de ses principales propriétés, à savoir la constitution d'un rayonnement de fond à l'Univers. A la lueur des plus récentes observations effectuées par le satellite Planck de l'Agence Spatiale Européenne, nous verrons que ce rayonnement peut nous fournir désormais de précieuses informations sur la formation des premières structures gravitationnelles de l'Univers.

La découverte du fond de rayonnement cosmologique de l'Univers est la preuve observationnelle retentissante que l'Univers est en expansion. Un Univers statique (comme il fut longtemps considéré) ne peut, en effet, “produire” un tel fond de corps noir aussi homogène aux grandes échelles de l'Univers. Seul un Univers en expansion peut le générer. Dans cet article, après un rappel historique du cadre théorique qui a vu émerger cette “idée” d'expansion (bien avant son observation), je

montrera comment un fond de rayonnement de corps noir peut être déduit. Je décrirai ensuite les nombreux efforts qui ont permis d'aboutir à sa découverte, au point d'en faire aujourd'hui un outil de grande utilité pour tester les théories cosmologiques les plus modernes.

Cet article s'inscrit dans le cadre de "2016 Année Internationale de la Lumière" décrétée par l'UNESCO (organisation des Nations-Unies), mais également dans celui du centenaire de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein⁽¹⁾ et du cinquantième de la découverte du rayonnement de fond cosmologique par Penzias et Wilson⁽²⁾.

I – Un peu d'histoire

Isaac Newton, fin du XVII^e siècle, dans son gigantesque ouvrage "*Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*"⁽³⁾, met en place une théorie de la gravitation avec un considérable retentissement ; selon lui "*Les masses s'attirent entre elles, deux à deux, à raison inverse du carré de leur distance*".

La formulation mathématique nous introduit l'idée d'une force F proportionnelle au produit des deux masses m et M divisée par le carré de la distance r les séparant ; soit plus explicitement :

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

G étant un facteur de proportionnalité, la constante dite de la gravitation. Cette synthèse théorique, issue des monumentaux travaux de l'époque sur les calculs différentiels développés par Isaac Newton et Gottfried Wilhelm Leibniz^(a), engendra de considérables avancées. Cette force nouvelle offrait enfin un cadre explicatif cohérent à de nombreux phénomènes physiques et astrophysiques jusqu'ici peu compris.

Modèle de Copernic et loi de Képler

Cette nouvelle force appliquée entre le Soleil et les planètes environnantes offre le cadre théorique du modèle cosmogonique de Copernic. Les trajectoires orbitales des planètes, tirées de la théorie différentielle, étaient de parfaites ellipses, dont le Soleil occupait l'un des foyers, en parfait accord avec les lois du mouvement tirées des observations de Johannes Kepler⁽⁴⁾. Enfin les énigmatiques trajectoires cométaires devinrent parfaitement compréhensibles dans le cadre d'une force centrale entre le Soleil et les comètes.

Chute libre d'un corps

Le mouvement de chute libre d'un corps massif s'explique parfaitement par une force de gravitation entre la Terre et le corps considéré. L'accélération du corps en chute libre répond au principe dynamique de la théorie newtonienne sous-tendue par cette nouvelle force.

Découverte de la planète Neptune

L'étude des anomalies de la trajectoire de la planète Uranus permit à Le Verrier, en 1846, de postuler l'existence d'une nouvelle planète dont la force entre

ces deux masses produisait l'écart à l'orbite "classique" entre Uranus et le Soleil. L'Astronome allemand Johan Gottfried Galle confirma par l'observation, la même année, l'existence de ce nouvel astre du système solaire, la planète Neptune.

Théorie des marées

Dans le cadre de la théorie newtonienne, le phénomène des marées s'explique par la déformation de la surface des océans par suite des attractions combinées de l'eau par la Terre et par la Lune, et en raison de l'effet de la force centripète due à la rotation de la Terre autour du barycentre Terre-Lune.

Cette nouvelle force donnait donc un cadre théorique à l'étude de nombreux mouvements de corps. Autant dire que cette nouvelle théorie se situait dans le bestiaire, de l'époque, des lois universelles de la nature.

Cet édifice de grande élégance théorique comportait cependant quelques imperfections, qui allaient durablement ébranler ses fondations. La première d'entre elles se situait au niveau de sa cause première : *Pourquoi les masses s'attirent entre elles ?*

Newton lui même dans ses "*Principia*" avoua que cette *Loi* était quelque peu "*ad-hoc*". Son objectif était de donner un cadre théorique aux observations de Kepler, tout en évitant une divergence du potentiel gravitationnel. L'hypothèse en $1/r^2$ répondait parfaitement à ce cahier des charges, malgré l'absence de justification... Newton fut donc bien conscient du caractère déconcertant de sa proposition de loi de la gravitation universelle:

"J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de la gravitation. (...) Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité, et je n'imagine point d'hypothèse"

L'attraction newtonienne entre masses implique une action à distance à travers le vide, ce point va être le fruit de nombreuses controverses. Christiaan Huygens fut un des premiers à aborder cette question essentielle. Huygens ne remet pas en question la loi en $1/r^2$ pour la gravité des planètes vers le Soleil ou des satellites vers leurs planètes, telle que la postule Newton ; toutefois il ne se convertit pas totalement à la conception Newtonienne. Huygens est farouchement convaincu de l'explication mécaniste ; pour lui il est difficilement concevable que les corps aient une "propension" naturelle à s'attirer mutuellement, ainsi écrit-il dans son discours sur la pesanteur⁽⁵⁾ : *"Ce que je ne saurais admettre, parce que je crois voir clairement, que la cause d'une telle attraction n'est point explicable par aucun principe de Mécanique, ni des règles du mouvement. Comme je ne suis pas persuadé non plus de la nécessité de l'attraction mutuelle des corps entiers ; ayant fait voir que, quand il n'y aurait point de Terre, les corps ne laisseraient pas, par ce qu'on appelle pesanteur, de tendre vers un centre. (...) Ce serait autre chose si on supposait que la pesanteur fut une qualité inhérente de la matière corporelle. Mais c'est à quoi je ne crois pas que M. Newton consente, parce qu'une telle hypothèse nous éloignerait fort des principes Mathématiques ou Mécaniques"*.

Pour Huygens, la gravité peut être expliquée en termes de mouvement par l'effet d'une action extérieure.

L'autre point bien "étrange" est le caractère en $1/r^2$ de la force gravitationnelle. Ainsi deux masses ne s'attirent plus entre elles, si et seulement si on les repousse à l'infini. Newton nous introduit donc un "monstre", une force partout présente dans l'Univers et dont l'origine de sa formulation mathématique reste obscure.

II – Le questionnement de l'Espace

Dès 1905 Albert Einstein, fort du considérable succès de sa théorie de la relativité restreinte (6), se posa la question de la place de la gravitation dans ce nouvel édifice théorique. Il fit alors quelques "*Gedanken Experiment*" (b). La première d'entre elles fut de constater que l'action de la force gravitationnelle, selon Newton, était instantanée violant ainsi le caractère de vitesse limite attribuée à la lumière. La deuxième "*experiment*" fut de remarquer que le mouvement d'accélération de chute libre d'un objet sur Terre, était rigoureusement identique à celui d'un corps "immobile" dans un espace sans champ gravitationnel vu par un observateur en accélération de même valeur que l'accélération terrestre. Pour cet observateur le corps tombe de la même façon, au point de ne pouvoir discerner le mouvement causé par le champ gravitationnel terrestre à celui provoqué par un effet de changement de référentiel en accélération. Le questionnement de l'espace se pose alors, comme celui du champ de gravitation ou plus exactement celui de la masse d'un corps.

A l'image de sa révolutionnaire théorie de la relativité restreinte, Einstein va reconsidérer la notion de masse au point de la "géométriser". La masse, pour lui, est prise comme une courbure de l'espace-temps physique. Les trajectoires des corps en mouvement s'effectuent suivant une géodésique dans un espace courbé par les masses environnantes. Il n'y a plus d'interaction entre les masses au sens Newtonien. A partir des travaux sur les espaces courbes développés par les mathématiciens Gauss, Lobatchevski, Riemann et Cartan. Albert Einstein, en 1915, va produire une équation de champ reliant le contenant géométrique avec le contenu énergétique (ou de masse). Il établit une théorie à partir du principe d'inertie érigé au sens d'Ernst Mach (7), où l'inertie d'un corps est induite par l'ensemble des autres masses présentes dans l'univers (sans en spécifier l'interaction). Les fameuses équations de champs qu'il obtient, dites par la suite équations d'Einstein, offrent un descriptif géométrique de l'espace tout en prenant en compte le contenu énergétique de ce dernier.

Ces équations, tirées de la géométrie différentielle, s'écrivent sous la forme "condensée" :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Les coordonnées μ et ν sont plongées dans un espace à quatre dimensions, constitué de trois dimensions purement spatiales et une dimension temporelle. Outre c la vitesse de la lumière, R la courbure globale de l'espace et Λ une constante.

Suivant les coordonnées d'espace ($\mu\nu$), nous avons :

Le terme $R_{\mu\nu}$ relatif à une courbure locale,

T à un contenu énergétique local,

$g_{\mu\nu}$ à une métrique d'espace.

Ces équations, d'une grande rigueur mathématique, permettent d'établir le mouvement de n'importe quel corps en présence d'un champ énergétique (ou de masse). Einstein montre alors que ces équations, sous l'hypothèse d'un champ faible (c'est-à-dire en considérant de "faibles" densité de masse^(c)), conduisent à un pseudo-potentiel "d'interaction" ϕ régi par une équation de Poisson, base newtonienne, entre deux masses et se révèlent donc complètement fausses.

Cette théorie aura un retentissement mondial et immédiat, car elle explique à elle seule de nombreuses observations telles que l'avance du périhélie de Mercure, et prédit la déviation des rayons lumineux, par le champ de gravitation du Soleil, qui sera observée en 1919 par l'équipe d'Arthur Eddington⁽⁸⁾.

III – Une histoire à l'Univers

La cosmologie est redevable à Albert Einstein, plus qu'aucun autre domaine de la physique fondamentale. L'acte de naissance de la cosmologie moderne coïncide précisément avec la publication de l'article fondateur⁽⁹⁾ : *Die Grundlâge der Allgemeinen Relativitätstheorie* du physicien allemand il y a un siècle. Dans cet article Einstein exprime sa conviction d'inscrire la théorie de la gravitation dans le cadre mathématique des espaces courbes de Riemann (plus généraux que les espaces classiques d'Euclide). Il établit alors le lien intrinsèque entre l'espace géométrique et son contenu énergétique, comme le montrent ces célèbres équations, en y introduisant un nouveau concept, celui d'espace-temps. Le temps et l'espace ne sont plus postulés *a priori* : c'est la distribution de matière contenue dans l'Univers qui détermine la structure de l'espace. Ce nouveau concept d'espace va permettre de décrire l'Univers dans son ensemble en offrant un cadre mathématique cohérent. Partant des équations Einstein (i.e. équations d'évolution d'un espace riemannien courbe), le physicien mathématicien russe Alexandre Friedmann⁽¹⁰⁾ et l'abbé astrophysicien d'origine belge Georges Lemaitre⁽¹¹⁾ vont, indépendamment l'un de l'autre, proposer une solution non statique soulignant la possibilité théorique que l'Univers soit en expansion. L'expansion de l'Univers est une des rares théories astrophysiques qui a précédé l'observation^(d). Malgré les réticences de quelques rares théoriciens, l'expansion de l'Univers allait devenir la pierre d'achoppement de toute théorie cosmologique et offrir le cadre conceptuel à l'étude de son évolution.

L'Univers en dilution au cours du temps sous-tend qu'il était plus dense et donc plus chaud qu'il ne l'est actuellement. Cette remarque va constituer le paradigme de pensée de l'astrophysicien Georges Gamow. Cet astrophysicien naturalisé américain, venu de l'école russe de physique nucléaire, comprit très vite les possibilités d'un Univers très chaud et très dense et fit une rapide analogie avec les études de formation de noyaux (dont il était le grand spécialiste de l'époque). L'Univers a dû "connaître" une époque où les densités étaient telles qu'aucun objet gravitationnel n'a pu survivre. Gamow et ses élèves Alpher et Hermann proposèrent que l'Univers fût constitué à ces débuts de particules élémentaires couplées entre elles du fait de l'extrême densité de cet Univers primordial. Partant de ce type de conditions initiales un scénario de l'évolution de l'Univers primitif va se dessiner. Au cours du temps l'expansion de l'Univers va engendrer une décroissance progressive de la densité et de la température moyenne de l'Univers. A l'image des transitions de phases thermodynamiques, de nombreux changements de phases vont se mettre en action, dégageant quatre grandes étapes de l'Univers primordial :

L'inflation considérée comme une première phase extrêmement brutale ayant eu lieu lorsque l'Univers a un âge compris entre le temps de Planck $t_P = 10^{-43}$ s et $t = 10^{-36}$ s (pour mémoire l'âge actuel de l'Univers est estimé autour de 13,5 milliards d'années). Durant cette époque l'Univers va connaître une gigantesque dilution permettant, entre autres, de fournir une explication à la platitude actuelle de l'Univers.

La transition de grande unification lorsque l'Univers avait un âge de 10^{-33} s et une température d'environ 10^{28} K. C'est durant cette époque que deux interactions fondamentales de la physique se découplent: la force électrofaible et l'interaction forte.

La transition électrofaible libérant la force électromagnétique et l'interaction faible. A cette époque l'âge de l'Univers est d'environ 10^{-10} s à une température proche de 10^{15} K.

La transition quarks-hadrons provoquant le confinement des quarks en hadrons (en particulier protons et neutrons). Cette transition eut lieu lorsque l'Univers a un âge d'environ 10^{-6} s et une température de 10^{13} K.

Après cette dernière transition l'Univers est constitué essentiellement de neutrinos, d'anti-neutrinos, de positrons, d'électrons, de photons, de protons et de neutrons en équilibre thermodynamique. A ces températures, les neutrinos jouent un rôle stabilisateur dans cette agitation thermique. En effet absorbés et réémis sans cesse par les nucléons, ces neutrinos transforment continuellement les protons en neutrons et inversement. Ces réactions, gouvernées par l'interaction faible, maintiennent en équilibre une population de neutrons comparable à celle des protons. Ce couplage de la matière baryonique (i.e. neutrons et protons) avec les neutrinos implique qu'à cette époque l'Univers est opaque aux neutrinos; à mesure que l'Univers se dilate ce couplage devient de plus en plus difficile à maintenir. Les réactions de couplage proton neutron deviennent peu à peu négligeables : en dessous de 10^{10} K, l'Univers devient totalement transparent aux neutrinos ν . Ce passage à la transparence va avoir des incidences particulièrement importantes sur la population des neutrons et des protons. En effet après cette brisure de couplage les protons et les neutrons vont pouvoir interagir et fusionner entre eux.

Georges Gamow et ses deux assistants de l'époque, Ralf Alpher et Hans Bethe, étudièrent avec grande attention le processus de formation des premiers atomes, ou phase de nucléosynthèse primordiale. Leur célèbre article $\alpha \beta \gamma$, en hommage aux auteurs Alpher, Bethe, Gamow ⁽¹³⁾, établirent les réactions séquentielles de fusion pouvant se produire. La première réaction de fusion à entrer en action est celle du noyau D (ou ^2H) de deutérium :

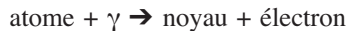


Rapidement un grand nombre de réactions de fusion vont conduire à la formation d'autres noyaux tels que l'hélium ^3He et ^4He , le lithium ^6Li et ^7Li , le béryllium ^7Be et ^9Be et le bore ^{10}B , ^{11}B et ^{12}B . L'expansion de l'Univers, engendrant une baisse de la température et de la densité moyenne au cours du temps, ne va pas permettre de synthétiser l'ensemble des noyaux de la classification périodique de Mendeleïev. A mesure que l'Univers se dilate les réactions de fusion vont être de plus en plus difficiles à maintenir. Les noyaux étant des particules chargées, la "barrière" coulombienne agissant comme force de répulsion entre les noyaux devient

dominante, la nucléosynthèse primordiale va stopper lorsque l'âge de l'Univers est de l'ordre de cinq minutes, l'Univers étant trop dilué pour engendrer les réactions atomiques.

Les premiers noyaux seront essentiellement ceux d'hydrogène à 89% en abondance relative, d'hélium à 11%, de deutérium 0.025% et des traces de lithium et de béryllium.

A la "fin" de cette période de nucléosynthèse primordiale, la matière baryonique est principalement constituée de noyaux (chargés) couplée avec les électrons libres et le rayonnement de fond. Le champ de radiation est en effet à cette époque totalement couplé avec cette matière environnante par processus diffusif sur les électrons (processus dit de diffusion Thomson). Les photons emplissant l'Univers auront ainsi un très faible libre parcours moyen, et n'auront pas le temps de se propager. A cette époque l'Univers est donc opaque au rayonnement. Cette omniprésence des photons γ du fond de rayonnement conduit à un fort pouvoir photo ionisant et empêche toute formation de matière neutre et notamment d'atomes⁽¹⁴⁾. En effet la réaction de photo-ionisation :



est à cette époque prépondérante devant la réaction inverse dite de recombinaison :



IV – Le rayonnement de fond cosmologique

L'omniprésence de l'expansion de l'Univers va contribuer à diminuer l'efficacité des photons. Peu à peu la réaction de recombinaison va entrer en action au détriment du processus inverse de photo-ionisation. Les conséquences de ce changement de mécanisme vont être très importantes et progressives. L'apparition des atomes neutres va, en effet, engendrer une perte des électrons libres (ces derniers vont se combiner avec les noyaux) et provoquer une perte dans le couplage avec le rayonnement. Le processus diffusif de Thomson va être de moins en moins efficace par manque de candidats électrons libres. Le libre parcours moyen des photons va "s'allonger", les photons vont pouvoir peu à peu se propager dans l'Univers (voir figure 1) ; un découplage thermique entre ces photons et la matière environnante s'opère alors.

Suite aux travaux de Georges Gamow, et de son équipe, sur la nucléosynthèse primordiale, Ralf Alpher et Robert Herman⁽¹⁵⁾ furent les premiers à prédire un rayonnement de fond à l'Univers avec une répartition statistique spectrale du type corps noir.

La température du corps noir (ou sa longueur d'onde) permet de situer le maximum de luminance. Le rayonnement actuel est très bas en température $T = 2.735 \text{ °K}$, est toutefois le fond dominant en terme de luminance si on le compare aux fonds de rayonnement d'autres longueurs d'ondes du spectre électromagnétique⁽¹⁶⁾.

Cette prédiction s'appuie sur le paradigme de l'expansion de l'Univers. Sa mise en évidence observationnelle allait être un réel challenge, dans le sens que son observation est la preuve définitive au caractère d'expansion de l'Univers pris dans son ensemble, et ainsi la preuve des théories de Friedmann-Lemaitre tirées de la Relativité Générale d'Einstein.

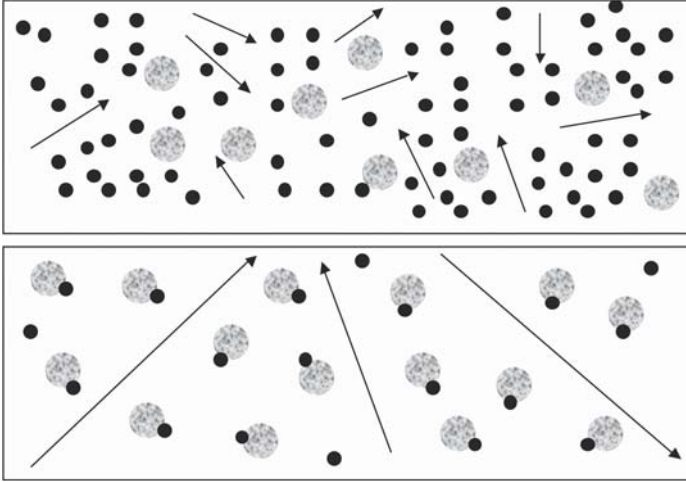


Fig. 1 : Illustrations du mécanisme de couplage entre les électrons et le rayonnement (schéma supérieur) et des conséquences du processus de recombinaison (schéma inférieur). Initialement, schéma du haut, les photons (flèches) diffusent très efficacement sur les électrons libres chargés négativement, l'Univers est totalement opaque à la radiation. Peu à peu la dilution de l'Univers va provoquer une perte d'efficacité de la photo ionisation, les électrons se recombinent avec les noyaux chargés positivement et deviennent de moins en moins efficace à diffuser les photons du rayonnement ambiant. Les photons vont pouvoir se propager librement (longues flèches, schéma du bas). L'Univers devient alors lumineux.

V – Les preuves observationnelles

La quête observationnelle de ce rayonnement de fond cosmologique fut intense, dès lors que l'on prit conscience de l'importance de sa mise en évidence observationnelle au regard du paradigme de l'expansion de l'Univers. En effet l'observation d'un fond de rayonnement millimétrique ayant une statistique de corps noir ne peut pas s'expliquer dans le cadre d'un Univers statique. En effet réaliser une distribution statistique, quelle qu'elle soit, demande un échange d'informations entre les constituants de cette distribution. Dans le cadre d'un Univers statique, on comprend que cet échange nécessaire d'informations prendra un temps gigantesque, "infini", la causalité entre tous les constituants devient difficile à établir sur l'ensemble de cet espace. En revanche dans le cadre d'un Univers en expansion, la causalité nécessaire entre les constituants afin d'établir une distribution statistique peut s'établir à une époque où l'Univers était dense et chaud, où le libre parcours moyen de l'échange d'information était bien inférieur à la taille caractéristique de la sphère causale de l'Univers. Ainsi lors de la phase de couplage, les photons ont pu réaliser une distribution statistique, puis lors de la phase de découplage entre la matière et les photons, ces derniers (désormais sans interactions) conservèrent alors (figèrent, gelèrent pourrait-on dire) la loi de distribution prédite par Gamow : un corps noir thermique se refroidissant adiabatiquement, en suivant l'expansion de l'Univers au cours du temps.

La cosmologie, pendant longtemps, eut un grand mal à s'imposer dans la communauté des astrophysiciens, étant en fait assez marginale et l'apanage des physiciens théoriciens. Les théories de Friedmann-Lemaître ou de Gamow prirent du temps à se diffuser dans la communauté, par ailleurs la théorie de la relativité générale ne fit son entrée dans l'enseignement universitaire que très tardivement. En France, malgré les efforts de Paul Langevin en 1922 pour inviter Albert Einstein au Collège de France et "populariser" la théorie au sein des physiciens et astrophysiciens français, son introduction mit du temps à se fondre dans le paysage universitaire français. Henri Andrillat (e) fut un des premiers à proposer un cours universitaire de cosmologie et de relativité générale, cours qui eut lieu à l'Université des Sciences de Montpellier dès 1965. Il n'est donc pas surprenant que de nombreux observateurs eurent "*sous les yeux*" l'évidence d'un fond de rayonnement millimétrique sans pour cela le rattacher au fond cosmologique prédit par Gamow. Ainsi dès les années 1940 Andrew Mc Kellar (17) observa les raies de rotation de la molécule de cyanogène CN (dans le milieu interstellaire de notre Galaxie) ; et souligna ce dernières étaient excitées correspondant à un fond de rayonnement autour de 2.3°K ! En 1946 Dicke et son équipe (18) mesurèrent un fond de ciel isotropique inférieur à 20°K. Le plus "*malchanceux*" est sans nul doute Émile Le Roux durant sa thèse de Doctorat, sous la houlette de Jean-François Denisse et James Lequeux. Il publia, en collaboration avec ces deux derniers, un article (19) dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, relatif à une mesure très soignée du fond de ciel. Ils mirent un fond de Ciel à 3°K inférieure à des variations de 0.5°K. La raison de ce rayonnement ne fut pas soulignée, bien que la théorie de Gamow ait été publiée près de dix ans auparavant, la cosmologie n'était pas assez connue à l'époque pour être mentionnée. Il fallut attendre les années soixante pour avoir une détection annoncée. En 1960 deux ingénieurs de la Bell Téléphone, Arno Penzias et Robert Wilson tentèrent, à l'aide d'un guide d'ondes radiomètre, d'établir une communication entre la côte Est et la côte Ouest des Etats-Unis via les couches ionosphériques de la Terre. Ils constatèrent un signal en excès et isotropique autour de 2.3°K avec une incertitude de 0.3°K. Ils firent plusieurs hypothèses afin de corriger cet excès (vérification de l'électronique, de la stabilité du dispositif jusqu'à nettoyer le cône de réception des fientes de pigeons...). Rien n'y fit, le signal était bien présent et semblait venir de l'espace. La "chance" qu'eurent Penzias et Wilson fut de déjeuner régulièrement à la cantine de l'Université de Princeton avec les théoriciens de l'Institut de Physique, et notamment avec Robert Wilkinson et son équipe dont un jeune (qui allait être prometteur en Cosmologie) Jim Peebles. Ces derniers, théoriciens et cosmologistes, convainquirent Penzias et Wilson que cet excès isotrope était sans nul doute le fameux rayonnement de fond cosmologique de la théorie de Gamow. Penzias et Wilson réorientèrent le dessein de leur instrument afin de mettre précisément en évidence ce rayonnement de fond, tant recherché par les cosmologistes. Ils publièrent en 1965 leurs résultats dans la prestigieuse revue américaine "*Astrophysical Journal*" (21). L'équipe de Wilkinson fit un article théorique (20) relatant l'histoire thermique de l'Univers et la constitution d'un fond de rayonnement intrinsèquement lié au paradigme d'expansion de l'Univers. Le second (à la suite du premier) fut l'article de la paire d'ingénieurs Penzias-Wilson décrivant la mesure d'un excès de rayonnement d'antennes correspondant probablement au rayonnement de fond cosmologique. L'histoire ne retiendra sans nul doute que le second article, celui qui engendra le prix Nobel de Physique 1978 à leurs auteurs (f).

Cette mesure eut des répercussions considérables : elle était la première évidence (concrète) d'un Univers en expansion, car rappelons-le, seul un Univers en expansion peut générer un tel fond statistique de rayonnement. Toutefois la statistique n'était pas complète, le domaine de fréquence des mesures de Penzias et Wilson ne couvrait pas l'ensemble du spectre de fréquence de la statistique de Gamow. D'autres mesures étaient nécessaires, dans des domaines de fréquences inaccessibles depuis le sol. Il était alors nécessaire de mesurer l'ensemble du spectre depuis l'espace, à l'aide d'un satellite d'observation s'affranchissant de l'absorption de l'atmosphère. Le projet d'un satellite prit alors forme, la NASA se lança à corps perdu dans ce projet, en novembre 1989 le satellite COBE (en anglais pour : *Cosmic Background Explorer*) fut lancé. La réussite des mesures de COBE fut totale. Elles mirent en évidence (après de pénibles corrections dues à l'absorption des poussières galactiques) un spectre de corps noir des plus complets⁽²²⁾, parfaitement en accord avec la théorie de Gamow, dans le cadre du paradigme de Friedmann-Lemaître d'un Univers en expansion, comme le montre la figure 2.

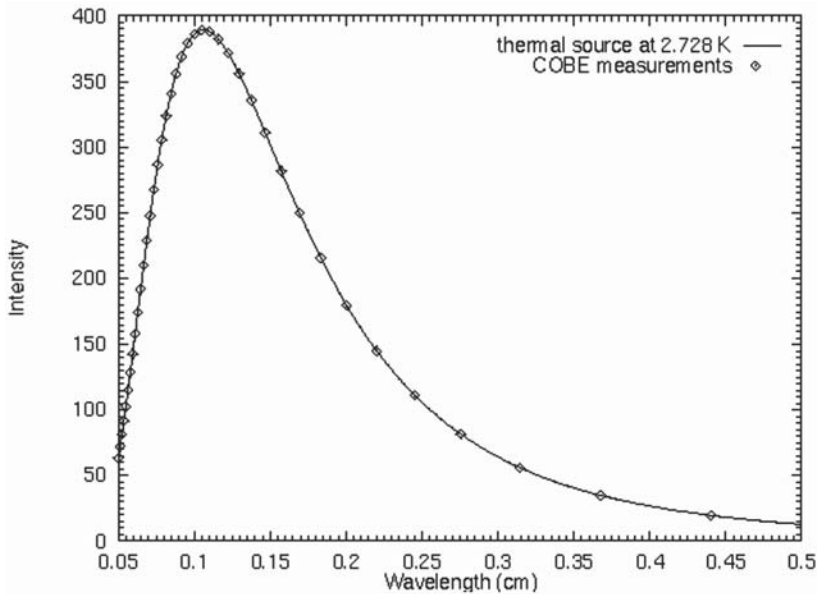


Fig. 2 : Courbe de Corps Noir obtenue par l'équipe de John Mather, à partir du détecteur infrarouge FIRAS embarqué sur le satellite COBE⁽²²⁾.

VI – Anisotropies du fond cosmologique

Cette découverte fondamentale, prouvant définitivement le paradigme d'expansion de l'Univers, montrait l'existence d'un fond de rayonnement de corps noir à $\langle T \rangle = 2.728^\circ\text{K}$ avec une précision de 0.00335°K . Ces anisotropies de rayonnement allaient être un nouveau challenge. En effet le spectre de ces harmoniques, caractérisant ces anisotropies, pouvait nous renseigner sur la courbure globale de

l'Univers mais également sur le contenu baryonique dans l'Univers. A partir de la carte en température $T(\mathbf{n})$, dans une direction angulaire \mathbf{n} , on définit la fluctuation de température Θ avec la température moyenne $\langle T \rangle$:

$$\Theta(\hat{\mathbf{n}}) = \frac{T(\hat{\mathbf{n}}) - \langle T \rangle}{\langle T \rangle}$$

On décompose alors en harmoniques sphériques :

$$\Theta(\hat{\mathbf{n}}) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\hat{\mathbf{n}})$$

telle que l'harmonique sphérique est donnée par :

$$Y_{\ell m} = \sqrt{\frac{2\ell + 1}{4\pi} \frac{(\ell - m)!}{(\ell + m)!}} P_{\ell}^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

P_{ℓ}^m sont les polynômes de Legendre. l est appelée le multipole et représente une échelle angulaire α donnée dans le ciel telle que (en degrés) : $\alpha = \pi/\ell$ avec

$$a_{\ell m} = \int_{\theta=-\pi}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \Theta(\hat{\mathbf{n}}) Y_{\ell m}^*(\hat{\mathbf{n}}) d\Omega$$

Il n'y a pas de direction préférée dans l'Univers, par conséquent l'indice m n'est pas informatif ; toute l'information pertinente se trouve alors dans les coefficients :

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle$$

La contribution $l = 0$ est la température moyenne du fond de ciel cosmologique, la contribution $l = 1$ est la faible anisotropie dipolaire (interprétée comme un effet Doppler local), et toutes les contributions $l > 1$ (quadrupole et au-delà) sont beaucoup plus faibles encore. Ces dernières contributions sont des fluctuations intrinsèques, préexistant au découplage et sans doute beaucoup plus anciennes, voire primordiales. La théorie montre un positionnement particulier dans le diagramme C_l en fonction de l . La position du premier pic (dit pic acoustique) donne une indication sur la courbure globale de l'Univers alors que son amplitude est directement dépendante de la densité des baryons dans l'Univers. Le challenge, de mesurer ces anisotropies, fut donc énorme, on comprendra que suite aux premières mesures du satellite COBE, ballons stratosphériques, autres satellites furent projetés afin d'affiner les valeurs numériques de ces anisotropies de fond de cosmologique. Le *spectre de puissance* est simplement la distribution des valeurs de ces coefficients C_l en fonction de l . Il est habituel de porter non pas C_l mais en fonction de l :

$$\mathcal{D}_l = l(l+1)C_l/2\pi$$

car le spectre primordial de fluctuations proposé par Harrison⁽²³⁾ et par Zel'dovich⁽²⁴⁾, est le mieux à même de reproduire la distribution de taille des grandes structures dans l'univers, conduit à $C_l \sim 1/l$ ($l+1$). La position du premier pic D_l est directement lié à la courbure globale de l'Univers ; Un pic proche d'un multipole $l=200$ est caractéristique d'un Univers à courbure nulle, un Univers Euclidien. Par ailleurs l'amplitude de ce pic est directement liée à la fraction du contenu baryonique dans l'Univers.

L'expérimentation du ballon Boomerang, lancé en Antarctique et piloté par l'équipe de Paolo de Bernardis de l'Université de Rome⁽²⁵⁾, mesura sur une petite portion de ciel ces anisotropies et les coefficients D_l pour différents nombres de Legendre (ou multipole) l . La conclusion fut sans appel, la position du premier pic située autour d'un nombre de Legendre (i.e. $l = 200$) est bien caractéristique d'un Univers Euclidien, un Univers plat. Ce résultat mondial obtenu sur une portion de ciel demandait une conformation sur l'ensemble du ciel, d'où l'envoi des satellites WMAP⁽²⁶⁾ de la NASA puis PLANCK⁽²⁷⁾ de l'Agence Spatiale Européenne. L'équipe de Planck dirigée par Georges Smoot fut la première à faire la cartographie complète tant attendue⁽²⁸⁾. Leurs résultats confirmèrent avec brio, les résultats partiels de la mesure de ballon "BOOMERANG", sur l'ensemble du fond du ciel. L'Univers est bien à courbure nulle, l'Univers est Euclidien, voir figure 3. Quelques années plus tard le satellite Planck confirmera avec une précision inégalée, cette platitude à l'ensemble de l'Univers observable, voir figure 2. Le second résultat fut inédit à propos de la fraction baryonique de l'Univers. Les mesures de ces deux satellites^(28, 29), nous révélaient que la densité d'énergie de fraction baryonique $\Omega_b h^2$ est de l'ordre :

$$\Omega_b h^2 = 0.02205 \pm 0.00028 \text{ avec } h = 0.673 \pm 0.012.$$

montre clairement que l'énergie de la matière n'est pas dominante dans l'Univers.

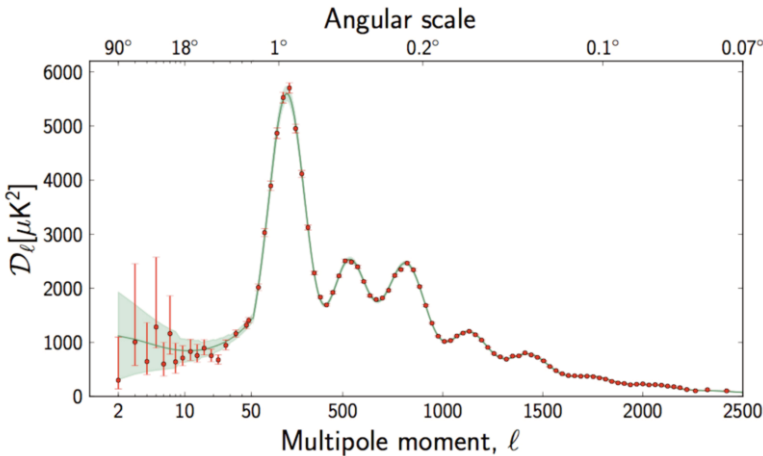


Fig. 2 : Courbe de répartition des coefficients D_l fonction des nombres de Legendre (ou moment multipole) l . On voit clairement que la position du premier pic (dit "pic acoustique") se situe pour un nombre de Legendre (ou "multipole moment l ") proche de $l = 200$, relatif à un Univers plat, euclidien.

VII – Perspectives

La valeur très basse de la densité d'énergie fraction baryonique de l'Univers nous indique que la densité d'énergie de l'Univers, pris dans son ensemble, est d'une autre nature que la densité d'énergie baryonique, ainsi une énergie "noire" ajoutée à une matière "noire" semblent prépondérantes dans l'Univers. Aujourd'hui plusieurs challenges se présentent, l'un concerne bien évidemment la nature de cette matière et de cette énergie inconnue, le second concerne la problématique de la formation des premiers objets de l'Univers. L'analyse des anisotropies du fond de rayonnement, de cette première lumière libérée de l'Univers n'a pas encore révélé l'ensemble de ses possibilités. De l'analyse des avant-plans profonds à l'analyse de la distribution spatiale des premières formations gravitationnelles, de nombreux champs de recherche se développent grâce à ces cartes de rayonnement de fond cosmologique. Beaucoup de questions restent en suspens, relatives aux processus physiques en action durant l'évolution de l'Univers primitif à la physique de l'Univers primordial. Les recherches tant théoriques qu'observationnelles, en cosmologie, continuent d'être très actives, les cartes de l'anisotropie du rayonnement de fond cosmologique ne nous ont pas révélé tout leur secret.

NOTES

- (a) Ces travaux donnent le matériel mathématique permettant de construire une courbe quelconque à partir de la somme de segments rectilignes infinitésimaux.
- (b) Littéralement "*Expérience de Pensées*".
- (c) Des densités de masse que l'on trouve pour les planètes ou les étoiles comme Soleil. En revanche la théorie de la Relativité Générale devient une obligation dès lors que l'on a des densités de masse comme les étoiles à neutrons, les trous noirs ou l'Univers pris dans son ensemble.
- (d) Dominique Peccoud ⁽¹²⁾ pose la question de la réalité des théories de Friedmann et Lemaître en son temps: "*Qu'est-ce que le réel? Ce sont les théories mettant en évidence l'expansion qui précédaient de très loin les expériences qui en seront faites? Est-ce l'observation d'un phénomène, faite bien après que la théorie eut annoncé le phénomène?*". Pour Peccoud, cette nouvelle théorie annonce une rupture épistémologique, en ce sens que la science va d'un système explicatif à un autre système explicatif par des passages qui procèdent nécessairement par rupture de continuité.
- (e) Henri Andriolat fut membre titulaire de l'Académie des Sciences et des Lettres de Montpellier de 1974 à 2009, siècle n° XIX.
- (f) Prix Nobel qui n'aurait probablement pas été décerné, sans ces "collaborations" de déjeuner avec l'équipe de théoriciens de Princeton. Jim Peebles eut cette célèbre phrase à l'issue de l'annonce du prix Nobel de physique 1978: "*Well Boys, we have been scooped.*" (Nul besoin de traduction). Jim Peebles fut, par la suite, reconnu comme un des plus grands cosmologistes contemporains. Il obtint en 2000 le prestigieux Prix Gruber, en cosmologie, de l'Union Astronomique Internationale pour l'ensemble de sa carrière, et ses apports théoriques dans de multiples champs de la cosmologie moderne.

RÉFÉRENCES

- (1) EINSTEIN A., *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*. Annalen der Physik vol. 354, n°7, 769-822, 1916
- (2) PENZIAS A., WILSON B. Astrophysical Journal
- (3) NEWTON I., *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*. Traduction de la Marquise du CHÂTELET, 1756.
- (4) KEPLER J., *Astronomia Nova*
- (5) HUYGENS Ch., *Discours de la cause de la pesanteur*, 1690. Réédition dans *Traité de la lumière*. Éditions Dunod, 1992.
- (6) EINSTEIN A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Annalen der Physik vol. 322, n°10, 26 septembre 1905
- (7) MACH E.,
- (8) DYSON F., EDDINGTON A., DAVIDSON C., *A determination of deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 291, 1920
- (9) EINSTEIN A., *Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*. Annalen der Physik vol. 7, 16, 1916
- (10) FRIEDMANN A., *Über die Krümmung der Raumes*. Zeitschrift für Physik 10, 377, 1922
- (11) LEMAITRE G., *Note on De Sitter's Universe*. Physical Review 25, 903, 1925
- (12) PECCOUD D., *Trois ruptures épistémologiques de la science moderne*. Sciences 95, 1, 1995
- (13) ALPHER R., BETHE H., GAMOW G., *The origin of chemical elements*. Physical Review 73, 803, 1948
- (14) BURLES S., NOLLETT K., TURNER M., *Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and Outer Space*. Meeting Centennial de la Société Américaine de Physique, astro-ph/9903300, 1999
- (15) ALPHER R., HERMAN R., *The Evolution of the Universe*. Nature Vol 162, Issue 4124,774, 1948
- (16) MELCHIORRI F., OLIVO-MELCHIORRI B., SIGNORE M., *Precision Cosmology*. Rivista del Nuovo Cimento 26, 1, 2003
- (17) MAC KELLAR A., *Molecular lines from the lowest states of diatomic molecules composed of atoms probably present in interstellar space*. Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Vol. 7, n°15, 1941
- (18) DICKE R., BERINGER R., KYHL R., VANE A., *Atmospheric Absorption Measurements with a Microwave Radiometer*. Physical Review Vol. 70, 340, 1946
- (19) DENISSE J.-F., LEQUEUX J., LE ROUX E., *Nouvelles observations du rayonnement du Ciel sur la longueur d'onde de 33 cm*. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Séance du 17 juin 1957
- (20) DICKE R., PEEBLES J., ROLL, WILKINSON R., *Cosmic Black-Body Radiation*. Astrophysical Journal 142, 414, 1965
- (21) PENZIAS A., WILSON R., *A Measurement Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*. Astrophysical Journal 142, 420, 1965
- (22) MATHER F., et al., *Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument*. Astrophysical Journal 420, 439, 1994

- (23) HARRISON E., *Fluctuations at the threshold of classical cosmology*. Physical Review D1, 2726, 1970
- (24) ZEL'DOVICH Y., *A hypothesis, unifying the structure and the entropy of the Universe*. Monthly Notices of Royal Astronomical Society 160, 1, 1972
- (25) DE BERNARDIS P. et al., *A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation*. Nature 404, 955, 2000
- (26) WMAP COLLABORATION Bennett C. et al., *The microwave anisotropy probe (MAP) mission*. Astrophysical Journal 583, 1, 2003
- (27) PLANCK COLLABORATION, Lamarre J.-M. et al., *The Planck high frequency Instrument, a third generation CMB experiment, and a full sky submillimeter survey*
- (28) SMOOT G., *Nobel Lecture : Cosmic microwave background radiation anisotropies : Their discovery and utilization*. Reviews of Modern Physics vol. 79, 1349, 2007
- (29) PLANCK COLLABORATION, *Planck early results*. Astronomy and Astrophysics volume 536, 2011
- (30) PLANCK COLLABORATION, *Planck results 2013. XVI. Cosmological parameters*. Astronomy and Astrophysics vol. 571, A16, 2014