

Épilogue : la cosmologie comme science moderne

Autor(en): **Durrer, Ruth**

Objekttyp: **Postface**

Zeitschrift: **Entretiens sur l'Antiquité classique**

Band (Jahr): **61 (2015)**

PDF erstellt am: **21.05.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ÉPILOGUE

RUTH DURRER

LA COSMOLOGIE COMME SCIENCE MODERNE

1. Introduction

La question de l'origine du monde et celle de notre rôle au sein de l'univers sont probablement aussi anciennes que l'humanité elle-même. Au cours des *Entretiens*, nous avons abordé les principales philosophies et réflexions consacrées à cette thématique dans l'Antiquité. En dépit d'une grande diversité dans les visions du monde, une constante prévaut : toutes les théories sur les origines de l'univers comprennent une dimension éthique et morale. L'étude par les Anciens du monde qui nous entoure inclut une réponse à la question : "Quel est notre rôle dans ce vaste ensemble ?". La réponse s'accompagne de règles sur la manière de nous y comporter.

C'est pour moi la leçon principale que j'ai retirée de ces *Entretiens*. J'ai été initiée à la manière d'utiliser les langues anciennes et j'ai admiré la précision des analyses proposées, qui m'a rappelé dans une certaine mesure les équations en physique. J'ai été fascinée par la découverte des diverses manières par lesquelles les hommes ont tenté de répondre à la même question. Je suis très reconnaissante aux organisateurs de m'avoir associée à la réflexion sur ce thème. Je suis heureuse de l'occasion qui m'est offerte de donner ici un aperçu de la manière dont la question est abordée par la physique moderne.

Je commencerai par rappeler un mythe de la création du monde qui me semble plus proche des sciences modernes dans son approche que la plupart de ceux qui ont été discutés dans

les *Entretiens*. Il s'agit du mythe chinois de Phan Ku, que je cite ici dans une version abrégée :

“Au début était un immense œuf qui contenait le chaos et un mélange de ying-yang (femelle-mâle, froid-chaud, obscur-clair, humide-sec, etc.). Dans le ying-yang, il y avait aussi Phan Ku, qui grandit au point qu'il sortit de l'œuf sous la forme d'un géant qui partagea le ying-yang en un grand nombre de contraires, dont la terre et le ciel. Avec un grand ciseau et un immense marteau, Phan Ku sculpta les montagnes, les rivières, les vallées et les océans. Il créa aussi le soleil, la lune et les étoiles. Lorsqu'il mourut, au bout de 18'000 années, on dit que les puces de ses cheveux devinrent la race humaine.”¹

Ce mythe exprime l'un des fondements de la science moderne. L'un de ses intérêts à mes yeux est qu'il ne s'appuie sur aucune composante morale ou éthique. En outre, il est très bref. La part de l'humanité dans le cosmos n'est pas très importante. Elle se résume aux puces, déplorables, de la chevelure de Phan Ku.

2. Idée de base de la science moderne

Il en va ainsi de la science moderne. Elle est dépourvue de contenu moral ou éthique. C'est ce qu'exprime Rémi Brague lorsqu'il dit que la physique moderne n'est pas “intéressante”.² Il admet qu'elle est “fascinante” et “utile” pour la vie pratique, mais elle n'est pas “intéressante” dans la mesure où elle ne nous donne pas d'indications ni de prescriptions sur la manière de mener une vie qui ait un sens, qui soit accomplie et satisfaisante.

¹ BODDE (1961) 383: “In the beginning was a huge egg containing chaos and a mixture of yin-yang (female-male, cold-heat, dark-light, wet-dry, etc). Also within this yin-yang was Phan Ku who grew larger and larger until he broke forth from the egg as a giant who separated the yin-yang into many opposites, including earth and sky. With a great chisel and a huge hammer, Phan Ku carved out the mountains, rivers, valleys, and oceans. He also made the sun, moon, and stars. When he died, after 18,000 years, it is said that the fleas in his hair became the human being.”

² BRAGUE (2008) 135.

Une telle démarche est étrangère à la science contemporaine. Celle-ci ne cherche pas une réponse à la question : “Quel est notre rôle dans l’univers ?”. Elle pose la question : “Qu’est-ce que le monde ?”. Selon moi — et je pense partager mon opinion avec la plupart des scientifiques d’aujourd’hui — seule la seconde question est susceptible de nous permettre des progrès en nous appuyant sur les méthodes de la science contemporaine. La première question me paraît trop personnelle, trop individuelle pour pouvoir être abordée avec les méthodes mathématiques et empiriques de la physique.

La science cherche à découvrir et à élaborer les lois de la nature à l’aide d’expériences et plus encore les principes de base qui déterminent ces lois. Tous les énoncés d’une théorie physique devraient, du moins en principe, être ‘falsifiables’ par des expériences.³ (Il n’est par contre jamais possible de ‘vérifier’ une théorie par des expériences.) L’énoncé d’une théorie qui n’admet pas d’être testée expérimentalement est considéré comme un mythe. C’est un sujet d’étonnement, pour moi-même comme pour de nombreux autres physiciens, que la nature suive des lois très précises. Et en effet, pour autant que nous puissions le savoir, la nature ne viole jamais ces lois. Si une théorie physique énonce ne serait-ce qu’une seule prédiction qui ne se vérifie pas par l’expérience, elle est considérée comme erronée ou au moins approximative. Comme le disait Einstein, “le fait le plus incompréhensible de l’univers est qu’il soit compréhensible”.⁴ À quoi Steven Weinberg ajoute : “Notre erreur n’est pas de prendre nos théories trop au sérieux, mais de ne pas les prendre assez au sérieux. Il est toujours difficile de réaliser que les nombres et équations avec lesquels nous nous amusons à notre table de travail ont quelque chose à faire avec le monde réel”.⁵

³ JASPERS (1994).

⁴ VALLENTIN (1954) 24: “The most incomprehensible fact about the world is that it is comprehensible”.

⁵ WEINBERG (1977) 128: “Our mistake is not that we take our theories too seriously, but that we do not take them seriously enough. It is always hard to

Nous admettons que toutes nos théories actuelles sont approximatives. Les raisons en sont multiples. La première découle de notre expérience avec les théories du passé. À cela s'ajoute le fait que la plupart des théories actuelles ne sont pas entièrement satisfaisantes. Elles contiennent des éléments arbitraires qui ne sont pas expliqués. Finalement, nous sommes aussi animés par une certaine modestie : pouvons-nous vraiment comprendre la nature dans son intégralité ? Cela semble tout de même bien improbable. Et finalement, pour les audacieux, il y a le rappel du théorème mathématique de Gödel selon lequel dans toute théorie mathématique on peut formuler des énoncés dont on ne peut démontrer ni la validité ni la non validité.⁶ Nous essayons toujours de pousser nos théories à leur limite pour trouver le point où la réalité s'en écarte. Cela nous aide à découvrir des théories qui soient en accord avec les données. Mais cela ne suffit pas. Une nouvelle théorie ne peut pas être déduite des données. Il faut aussi des hypothèses de base, des principes pour lesquels il faut de l'intuition. Celle-ci n'est pas tout-à-fait logique, elle ressemble à l'acte de création d'un artiste. Par exemple, à propos de la théorie de la relativité générale, l'éminent physicien Max Born écrit que "la théorie de la relativité générale nous parut, elle me paraît aujourd'hui encore comme la plus grande percée de l'esprit humain sur la nature, la plus étonnante réunion de profondeur philosophique, d'intuition physique et d'élégance mathématique. Je l'admire comme une œuvre d'art".⁷

Je donne ici un exemple. Après avoir développé la théorie de la relativité restreinte, qui est basée sur la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre, Einstein réalisa que la théorie de la gravitation de Newton ne satisfait pas ce "principe de relativité".

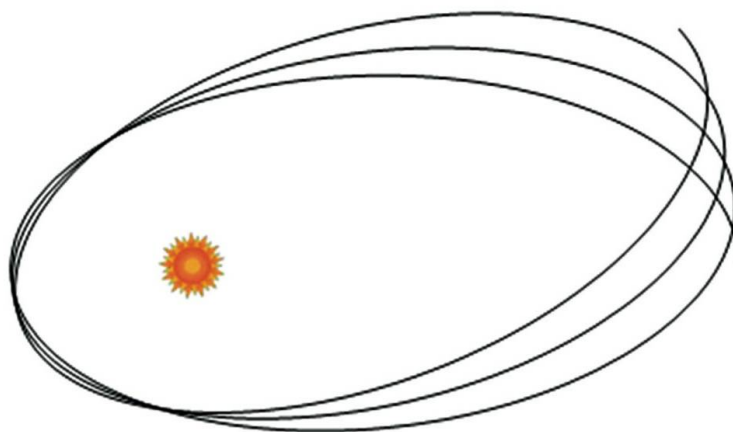
realize that these numbers and equations we play with at our desk have something to do with the real world".

⁶ HOFSTADTER (1979) 265.

⁷ STRAUMANN (2013) 3: „(Die allgemeine Relativitätstheorie) erschien uns, erscheint mir auch heute als die grösste Leistung menschlichen Denkens über die Natur, die erstaunlichste Vereinigung von philosophischer Tiefe, physikalischer Intuition und mathematischer Kunst. Ich bewundere sie wie ein Kunstwerk“.

Il travailla durant dix ans pour développer la ‘relativité générale’, une nouvelle théorie de la gravitation. Même si, dans sa formulation, cette théorie est très différente de la gravitation newtonienne, les prédictions pour notre système solaire n’en diffèrent que légèrement. Dans le cadre de la théorie de la gravitation newtonienne, le mouvement des planètes sous l’attraction gravitationnelle du soleil et des autres planètes a été calculé de façon perturbative en grand détail au XIX^e siècle. Selon les lois de Kepler, les planètes suivent des orbites elliptiques. Mais d’après la gravitation de Newton, c’est seulement une approximation négligeant les effets des autres planètes. Ces effets pris en considération, les orbites ont la forme de ‘rosettes’. Le périhélie (le moment où la planète se trouve le plus près du soleil) de l’ellipse varie légèrement à chaque orbite (voir le graphique).

Au XIX^e siècle déjà, il est apparu que la progression du périhélie de Mercure ne concordait pas avec le calcul de la perturbation établie par la gravitation newtonienne. Ce n’est qu’en introduisant les corrections découlant de la loi sur la relativité générale que l’accord est rétabli. Pour Mercure, la planète la plus proche du soleil, la correction est la plus importante. Pour les autres planètes, elle est inférieure à la précision du calcul perturbatif dont on pouvait disposer à l’époque. Compte tenu de la taille des corrections, seul un calcul suffisamment précis permet de les mesurer.



(très exagéré !)

Avance du périhélie de Mercure

résultat expérimental : $\Delta_{\phi} = 574$ arc sec/siècle
 résultat théorique newtonien : $\Delta_{\phi N} = 531$ arc sec/siècle
 résultat théorique d'Einstein : $\Delta_{\phi E} = \Delta_{\phi N} + 43$ arc sec/siècle

Extrait d'une lettre d'Albert Einstein à Paul Ehrenfest : "Que les équations donnent les différences du périhélie de Mercure de manière correcte, j'en suis resté bouche bée quelques jours de joyeuse excitation".⁸

3. Cosmologie

En cosmologie moderne, nous décrivons l'univers de façon approximative en admettant une densité de matière moyenne constante, nommée ρ , et en calculant l'évolution des fluctuations dans une telle configuration. Dans la gravitation newtonienne, il n'existe pas de solution à densité constante. En plus, si on pense avoir trouvé une solution, on s'aperçoit qu'elle est instable : de faibles fluctuations sont amplifiées de manière exponentielle.

Dans le cadre de la gravitation einsteinienne, des solutions cosmologiques existent. Mais les solutions statiques sont instables elles aussi. Les solutions presque stables se trouvent dans des univers en expansion. Ceux-ci ont été découverts en premier par le mathématicien russe Alexandre Friedmann (1922).⁹ Le premier qui a remarqué que ces solutions sont réalisées dans notre univers est l'abbé Georges Lemaître, le père de la cosmologie physique. Il a interprété les mesures d'Edwin Hubble comme observation de l'univers en expansion et, le premier, il a estimé le taux d'expansion, H_0 (1927).¹⁰

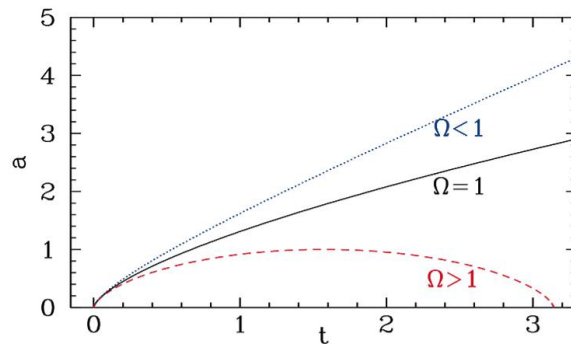
Dépendant de la densité de matière moyenne, ρ , et du taux d'expansion, H , soit l'univers est en expansion éternelle, soit l'attraction gravitationnelle suffit pour retourner l'expansion en

⁸ EINSTEIN (1998) text 182: „Dass die Gleichungen die Perihel-Bewegung Merkurs richtig liefern. Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung“.

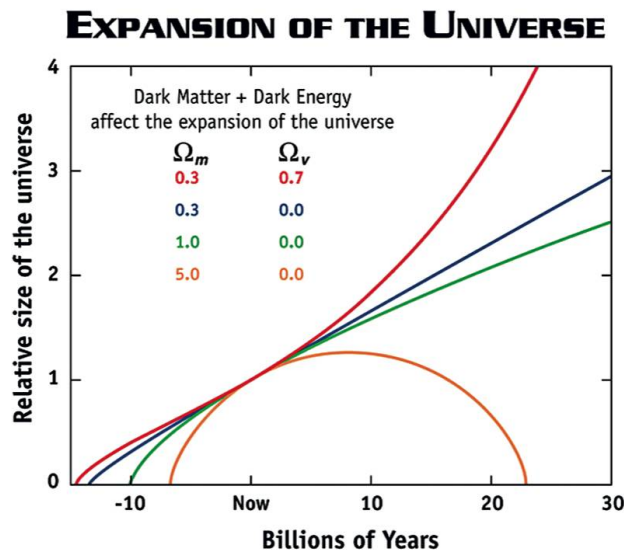
⁹ FRIEDMANN (1922) 377.

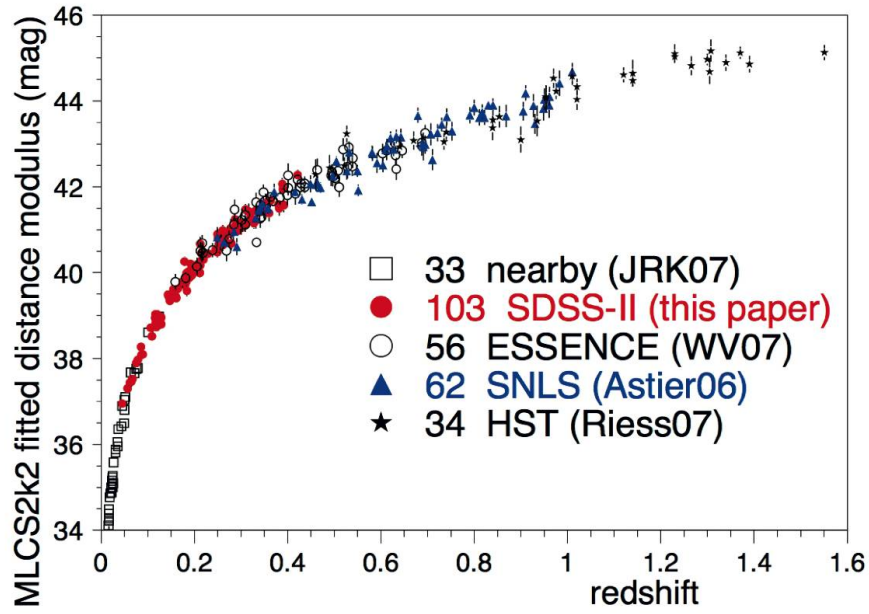
¹⁰ LEMAITRE (1927) 41.

effondrement. Si $\Omega = 8\pi G\rho/2H^2 \leq 1$, l'expansion continue pour tous les temps. Si $\Omega > 1$, après un certain temps, l'expansion se retourne en contraction. Ici G indique la constante de gravitation de Newton et le rapport Ω est appelé 'paramètre de densité'. Voir le graphique où a indique la taille de l'univers.

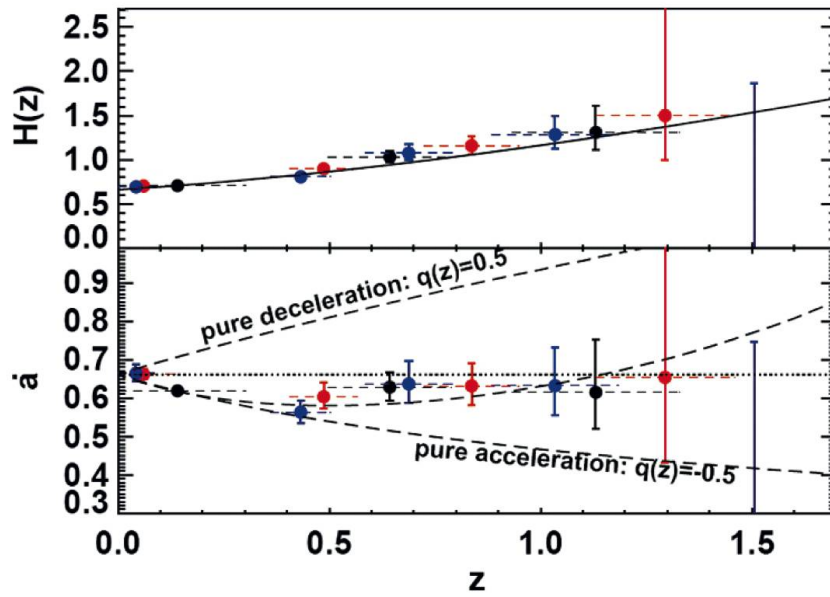


Aujourd'hui, cette expansion de l'univers a été observée de manière très détaillée. À la plus grande surprise des physiciens, l'expansion n'est pas ralentie, comme on s'y attendait à cause de l'attraction gravitationnelle universelle, mais elle s'est accélérée (courbe rouge dans le graphique suivant). Cette découverte inattendue a été couronnée par le Prix Nobel 2011 remis à S. Perlmutter, A. Riess et B. Schmidt.





Kessler *et al.* 2009¹¹



Riess *et al.* 2007¹²

¹¹ KESSLER *et al.* (2009) 32.

¹² RIESS *et al.* (2007) 98.

Pour expliquer cette observation dans le cadre de la théorie d'Einstein, la densité d'énergie dans l'univers doit être dominée par une composante 'anti-gravitante'. Une constante cosmologique appelée Λ avec un paramètre de densité $\Omega_\Lambda = 0.7$ et une contribution de la matière de $\Omega_m = 0.3$ est une bonne réponse aux données indiquées dans le diagramme en bas du graphique précédent. Dans ce cas, $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$.

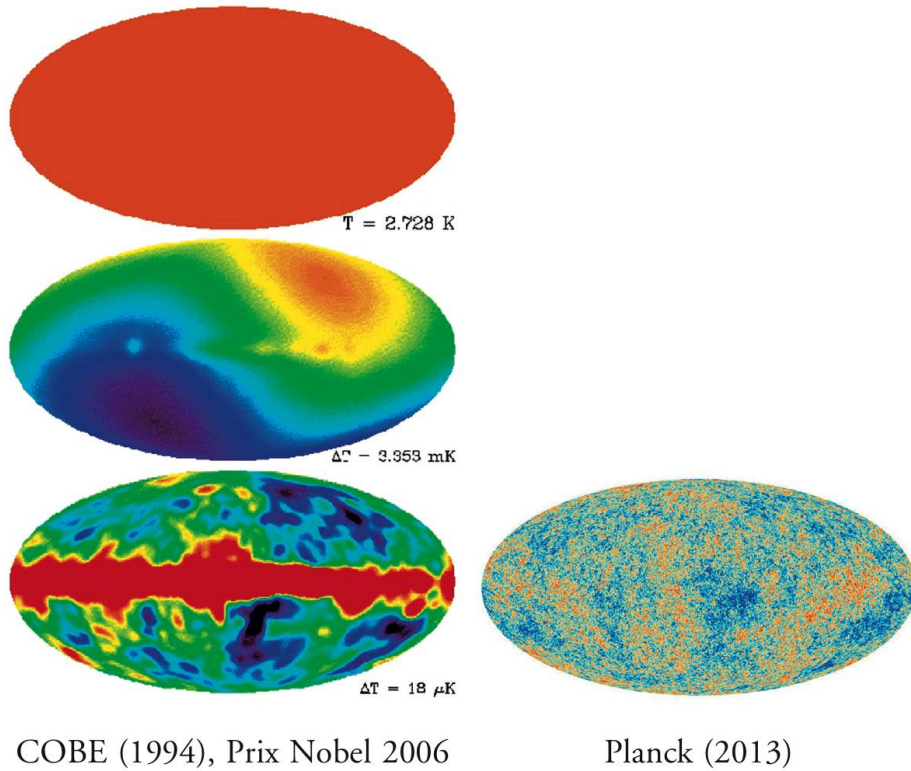
Dans le passé, l'univers n'était pas seulement beaucoup plus dense mais aussi beaucoup plus chaud. Quand sa température était supérieure à $T \simeq 3000\text{ K}$, il était rempli d'atomes (presque tous d'hydrogène et d'hélium) ionisés. À $T \simeq 3000\text{ K}$, ceux-ci se sont combinés avec des électrons en atomes neutres et l'univers est devenu transparent pour les photons.

3.1. *Le fond cosmique micro-onde*

Ces photons, reliques du 'Big Bang' chaud, ont une distribution thermique (dite distribution de Planck) qui est aujourd'hui à une température de 2.7 K , ce qui correspond à environ $-270^\circ\text{ Celsius}$. Les longueurs d'onde de ces photons sont de quelques millimètres à centimètres, donc des micro-ondes. Le rayonnement du fonds cosmique micro-onde qui a été découvert en 1965 par hasard par Penzias et Wilson (Prix Nobel 1978), est très isotrope (voir le graphique suivant). La plus grande anisotropie est due à notre mouvement par rapport à ce rayonnement, ce qui produit un dipôle d'amplitude env. 10^{-3} , correspondant à une vitesse de 300 km/sec par rapport à la sphère de dernière diffusion (voir image du milieu à gauche dans le graphique suivant). Si on soustrait ce dipôle, il reste de petites fluctuations d'amplitude env. 10^{-5} . Ces fluctuations sont illustrées dans le graphique ci-dessus en bas, dans l'image de gauche avec la résolution de quelques degrés de l'ancien satellite COBE de la NASA et à droite avec la résolution de quelques minutes d'arc du nouveau satellite de l'ESA "Planck".

Le carré de l'amplitude moyenne des fluctuations sur une échelle angulaire donnée est indiqué dans le graphique suivant.

Les points en rouge sont les données et la ligne verte est la prédiction pour des fluctuations générées par une phase dite ‘inflationnaire’.

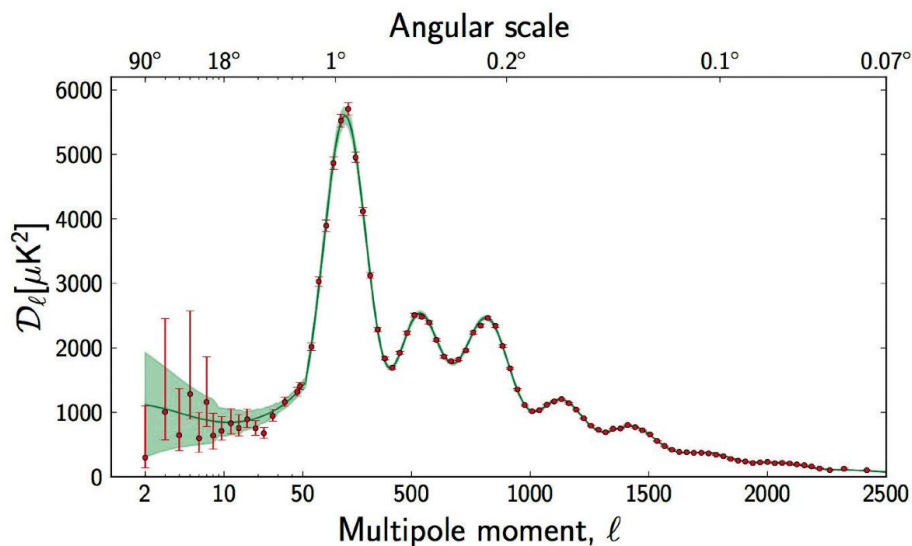


COBE (1994), Prix Nobel 2006

Planck (2013)

3.2. *Inflation*

Dans les années 80, plusieurs chercheurs ont proposé qu’avant la phase très chaude, l’univers aurait subi une phase ‘inflationnaire’, une phase durant laquelle l’univers serait en expansion très rapide. Il y a de nombreuses façons de réaliser une telle phase d’expansion rapide. Dans les exemples les plus simples, l’univers est dominé pendant cette période par un champ scalaire inconnu (un peu analogue au Higgs récemment découvert au CERN). Même si les détails de la phase inflationnaire ne sont pas compris, elle explique de façon naturelle l’homogénéité



et l'isotropie ainsi que la platitude et l'entropie énorme de l'univers observé.

Pendant une phase inflationnaire, les fluctuations quantiques qui sont toujours présentes sont amplifiées et transformées en fluctuations classiques dans la géométrie de l'espace-temps et dans la densité de la matière. Ce processus peut être calculé en détail. Les fluctuations produisent exactement le spectre de fluctuations dans le fond cosmique micro-onde qui est observé (voir graphique ci-dessus ; le calcul correspond à la ligne verte).

Il semble donc que les structures les plus grandes observées dans l'univers sont issues de petites fluctuations quantiques. L'univers est une loupe gigantesque...

4. Conclusion

Cet exposé avait pour but de présenter un aperçu de ce qu'est la science moderne, en particulier la cosmologie, et aussi ce qu'elle n'est pas. En analysant les observations cosmologiques par les méthodes de la physique moderne, nous avons établi que

- l'univers est actuellement en expansion accélérée, ce qui implique une 'constante cosmologique' ou une autre forme d'énergie sombre ;
- la densité de matière dans l'univers n'est pas dominée par son contenu en atomes, particules que nous connaissons, mais en 'matière noire', une forme de matière que nous ne connaissons que par son interaction gravitationnelle ;
- prenant en considération ces deux composantes qui ne sont connues que par leurs effets gravitationnels, nous pouvons expliquer les données des observations cosmologiques avec quelques paramètres : la densité de matière (noire et lumineuse), la densité d'énergie sombre, l'amplitude et l'index spectral des fluctuations initiales.

Malgré ce succès, des questions importantes demeurent sans réponse : que sont

- l'énergie sombre ?
- la matière noire ?
- la phase inflationnaire ?

Bibliographie

- BODDE, D. (1961), "Myths of Ancient China", in S.N. KRAMER (éd.), *Mythologies of the Ancient World* (New York), 369-408, < <http://www.crystalinks.com/chinacreation.html> >.
- BRAGUE, R. (2008), *Au moyen du Moyen Âge* (Paris).
- EINSTEIN, A. (1998), *The Collected Papers of Albert Einstein*, éd. par R. SCHULMANN *et al.* Vol. 8, *The Berlin Years* (Princeton).
- FRIEDMANN, A. (1922), "Über die Krümmung des Raumes", *Z. Phys.* 10, 377-386.
- HOFSTADTER, D. (1979), *Gödel, Escher, Bach. An Eternal Golden Braid* (New York).
- JASPERS, K. (1994), *Initiation à la méthode philosophique*, traduit de l'allemand par L. JOSPIN (Paris).
- KESSLER, R. *et al.* (2009), "First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters", *Astrophys. J. Suppl.* 185, 32-84.

- LEMAITRE, G. (1927), "Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques", *Annales Soc. Sci. Brux. Ser. I Sci. Math. Astron. Phys.* A47, 49-59.
- RIESS, A.G. *et al.* (2007), "New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z \geq 1$: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy", *Astrophys. J.* 659, 98-121.
- STRAUMANN, N. (2013), *General Relativity. With Applications to Astrophysics* (Berlin).
- VALLENTIN, A. (1954), *The Drama of Albert Einstein* (Garden City, NY).
- WEINBERG, S. (1977), *The First Three Minutes. A Modern View of the Origin of the Universe* (New York).

