

3 • De l'autre côté du Big Bang

Appliquée à l'Univers dans son ensemble, la gravité quantique à boucles transforme notre représentation du cosmos et de son histoire. Cette nouvelle cosmologie ouvre la porte sur l'autre côté du Big Bang.



PAR Aurélien Barrau et Francesca Vidotto, physiciens au laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de l'université Joseph-Fourier de Grenoble et du CNRS.

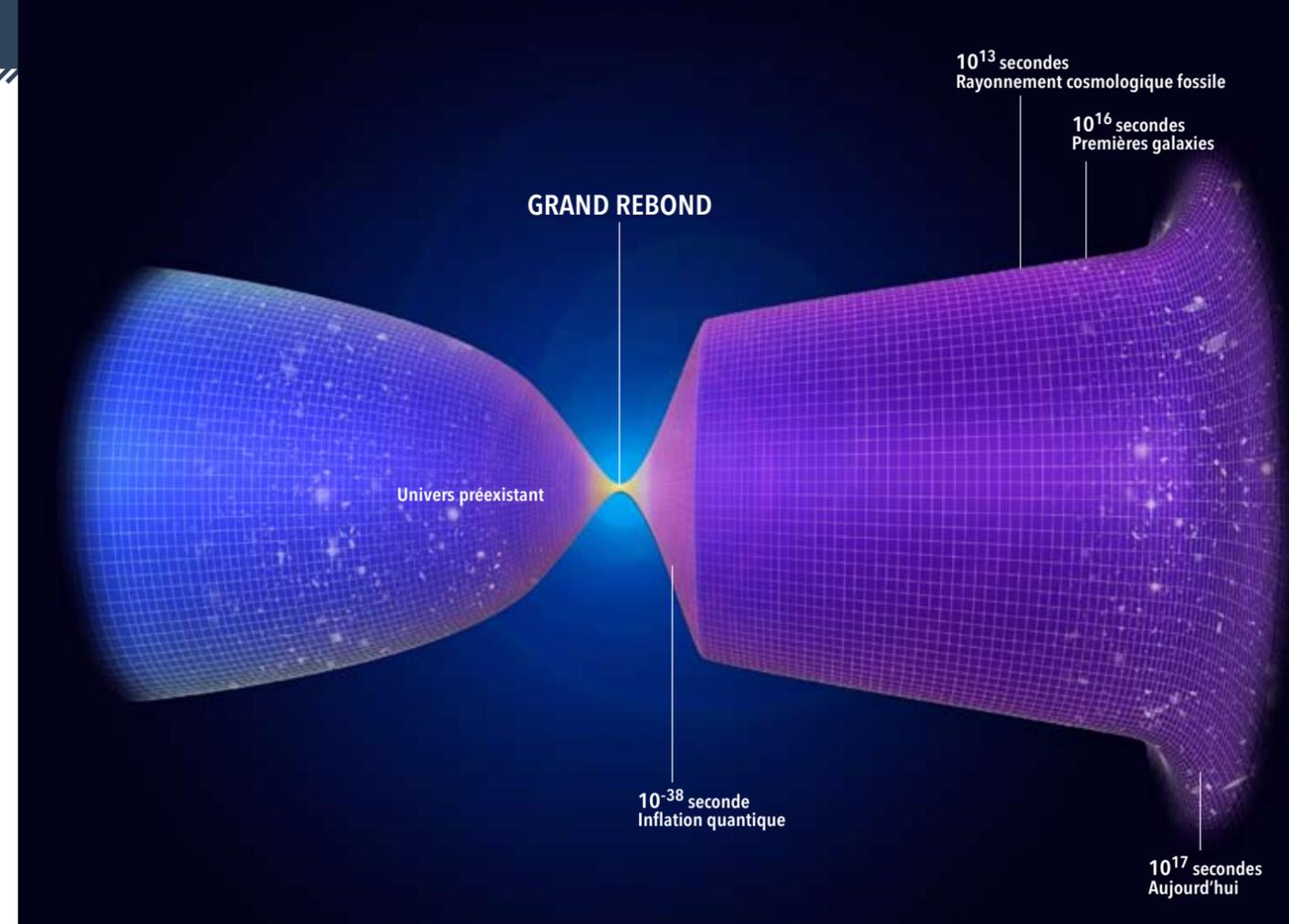
Résoudre le problème le plus crucial du modèle standard de la cosmologie, à savoir le Big Bang lui-même ! C'est sur cette promesse que la cosmologie quantique à boucles a pris son envol, il y a une dizaine d'années. Ses fondateurs, Martin Bojowald d'abord, puis Abhay Ashtekar, tous deux aujourd'hui à l'université PennState, aux États-Unis, s'intéressaient alors aux conséquences d'une théorie quantique de la gravitation, la gravité quantique à boucles, quand on l'appliquait à l'Univers dans son ensemble. Ils venaient de démontrer que cette théorie, qui révolutionnait notre conception de l'espace-temps, offrait également une tout autre vision de l'histoire de l'Univers [1].

Bien souvent aujourd'hui, « matière noire » et « énergie noire » – qui constituent l'essentiel du contenu de l'Univers mais dont la nature est inconnue – sont évoquées, à juste titre, comme les deux grandes énigmes de l'astrophysique contemporaine. Ces deux mystères ont eu tendance à occulter le troisième, peut-être le plus fondamental et le plus difficile à résoudre : celui

de la singularité primordiale, plus connue sous le nom de Big Bang. Cette singularité où, par définition, les grandeurs physiques tendent vers l'infini est une prédiction inévitable de la relativité générale. Mais quel crédit lui apporter dans la mesure où la singularité montre justement que la relativité ne s'applique plus ! Elle témoigne de l'effondrement de la théorie qui cesse d'être prédictive et doit être revue ou raffinée. Aussi délicat à appréhender au niveau métaphysique qu'au niveau mathématique, le Big Bang, en tant qu'instant originel, constitue la pierre d'achoppement la plus aiguë de notre description de l'histoire cosmique. Notre grand récit des origines se fonde en effet sur l'évocation d'une circonstance incohérente et finalement incompatible avec la théorie qui la génère.

Aux très hautes densités. Lorsque, en 1999, Martin Bojowald commence à analyser les implications cosmologiques de la gravitation quantique à boucles, cette situation change drastiquement puisqu'il montre que cette singularité primordiale du Big Bang disparaît. Pour comprendre comment la cosmologie quantique à boucles se débarrasse ainsi du Big Bang, il faut revenir au modèle standard et remonter le fil du temps de quelque 13,7 milliards d'années jusqu'aux premiers instants de l'Univers dans la vision usuelle. Celui-ci est alors extrêmement dense. Quand cette densité atteint la valeur dite de Planck, 10^{90} kilogrammes par centimètre cube, la gravitation devient tellement attractive que l'Univers s'effondre en un point : le Big Bang est inexorable. Mais cela, dans le cadre de la relativité générale...

Or, Martin Bojowald montre que la structure granulaire de l'espace-temps à petite échelle, qu'implique la gravitation quantique à boucles, modifie le comportement cosmologique à



Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, le Big Bang cède la place à un Grand Rebond (Big Bounce) : il n'y a plus d'instant originel mais un simple goulet d'étranglement. La densité y est gigantesque, mais finie. En amont de ce goulet, l'Univers aurait subi une phase de contraction et, en aval, l'expansion actuelle.

ces densités très élevées : les effets quantiques engendrent une telle répulsion qu'ils contrebalancent l'attraction classique et permettent d'éviter le Big Bang. Ils jouent ici un rôle comparable à celui qu'ils tiennent dans l'atome d'hydrogène où ils empêchent l'électron de s'effondrer sur le proton. Ces effets diminuent ensuite très rapidement, tant et si bien que la théorie d'Einstein décrit parfaitement l'Univers actuel.

Or, si le Big Bang s'évanouit, cela signifie qu'il n'est donc plus l'instant primitif et originel mais qu'il devient un simple goulet d'étranglement. Ce qu'on nommait Big Bang ne désignerait donc plus qu'un instant de densité maximale – gigantesque mais finie – en amont et en aval duquel l'espace serait classique et décrit par la relativité. L'Univers serait ainsi éternel, ayant subi une phase de contraction avant l'actuelle expansion. Ce rebond peut avoir été unique ou s'être produit plusieurs fois, peut-être une infinité de fois, suivant un scénario d'Univers cyclique qui n'est pas sans faire écho à certaines cosmogonies anciennes. La gravité quantique à boucles, appliquée à l'Univers, prédit donc un « Big Bounce » – grand rebond –

en lieu et place du Big Bang. Cela transfigure notre écriture de l'histoire cosmologique mais résout également le problème mathématique central du modèle usuel : la théorie est devenue régulière et prédictive, elle évite la singularité initiale.

En 2010, le groupe d'Ashtekar et le nôtre ont montré que la cosmologie quantique à boucles allait plus loin encore : elle prédit de façon assez générique une phase inflationnaire [2]. L'inflation est une augmentation considérable de la taille de l'Univers dans ses premiers instants. C'est elle qui permet d'expliquer l'origine des fluctuations qui ont généré les structures cosmiques. Étant presque nécessaire pour rendre compte de l'Univers tel qu'il est observé aujourd'hui, elle est devenue un paradigme dont il est difficile de s'extraire. Mais dans le modèle standard du Big Bang, elle doit être introduite « à la main », de manière assez artificielle.

Phase d'inflation. Au contraire, en cosmologie quantique à boucles, l'inflation est presque automatique, elle est une prédiction du modèle ! Pour qu'il y ait inflation, il >>>

L'essentiel

> LE BIG BANG, prédit par la relativité générale, pose problème. Il correspond en effet à une situation incompatible avec la théorie qui le génère.

> EN COSMOLOGIE QUANTIQUE À BOUCLES, la structure granulaire de l'espace-temps à petite échelle fait disparaître le Big Bang.

> LE MODÈLE PRÉDIT AUSSI une phase d'inflation, augmentation considérable de la taille de l'Univers dans ses premiers instants, nécessaire pour expliquer les structures cosmiques actuelles.

De l'autre côté du Big Bang

» faut qu'un « champ » physique se trouve porté dans des conditions particulières et y demeure pendant un temps important. Or, dans ce modèle, la phase de contraction qui précède le *Big Bounce* place naturellement le champ dans le domaine requis. Puis la phase d'expansion suivant le rebond va « figer » le champ dans cette position conduisant par là même à l'inflation !

Ainsi, la quantification des équations d'Einstein suivant les méthodes des boucles conduit presque inexorablement à l'un des phénomènes cosmologiques les plus importants et les plus difficiles à expliquer hors de ce cadre. De plus, le groupe d'Ashtekar vient d'établir que la probabilité que cette phase inflationnaire dure assez longtemps pour rendre compte des observations est extrêmement élevée [3].

Empreintes observables ? La cosmologie quantique à boucles offre donc une image cohérente et convaincante. Mais elle demeure évidemment spéculative. Peut-elle être confortée par des observations ? Cette question est au centre des recherches actuelles. L'échelle de Planck étant très éloignée des échelles directement accessibles, l'énergie de Planck est 10^{15} fois

plus grande que celle du LHC, associée donc à des distances 10^{15} fois plus petites, il est extrêmement difficile de sonder les théories de gravitation ou cosmologie quantiques.

Heureusement, en partie grâce à l'inflation qui « étire » considérablement les longueurs et permet donc de porter à l'échelle de l'Univers des phénomènes qui se déroulaient à des échelles infimes, il n'est pas exclu que le scénario soit testable. La voie la plus prometteuse consiste à chercher de fines empreintes dans le fond diffus cosmologique, ce rayonnement fossile constituant la première lumière émise par l'Univers. Des empreintes que le satellite européen Planck, lancé il y a deux ans et demi, pourrait peut-être détecter (lire « Des traces des boucles dans le ciel de Planck ? », ci-dessous). Il n'est pas évident que ces traces soient aujourd'hui encore décelables mais, au moins pour certaines valeurs des paramètres physiques, c'est une éventualité tout à fait envisageable. Les calculs montrent que, si l'inflation n'a pas duré beaucoup plus longtemps que la valeur minimale requise, des effets spécifiques devraient pouvoir être observés. Il s'agirait non seulement de conforter – ou d'invalider – le modèle mais aussi de le comparer aux

prédictions de la théorie concurrente la plus importante : la théorie des cordes. La cosmologie des cordes peut aussi ouvrir, pour de tout autres raisons, la porte du pré-Big Bang. Mais elle conduit à des prédictions souvent discernables de celles de la gravité à boucles concernant le fond diffus cosmologique. Il existe donc ici une éventuelle possibilité de trancher entre les deux modèles de gravitation quantique.

La cosmologie quantique à boucles, si elle se révélait correcte, révolutionnerait notre modèle cosmologique. Elle présente un Univers éternel ayant « rebondi », une ou plusieurs fois, sans réel Big Bang. Elle prédit, de façon presque certaine, l'inflation – jusqu'alors introduite assez artificiellement – et pourrait conduire à des empreintes observables. Mais le modèle est loin d'être parfait. D'intenses efforts sont actuellement consentis pour l'améliorer à l'aide du formalisme rigoureux des « mousses de spin » (lire « La gravité quantique à boucles en 5 questions », p. 38). Les débuts sont plus que prometteurs mais nous n'en sommes encore qu'aux débuts. ■

[1] M. Bojowald, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5227, 2001.

[2] J. Mielczarek et al., *Phys. Rev. D*, 81, 104049, 2010.

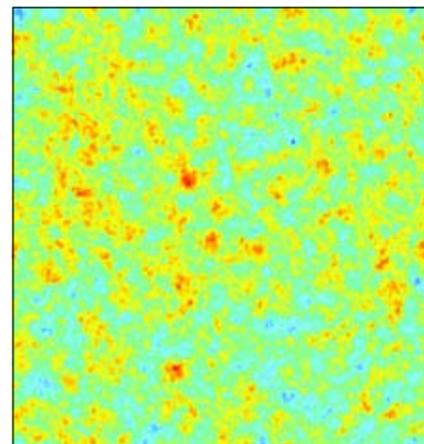
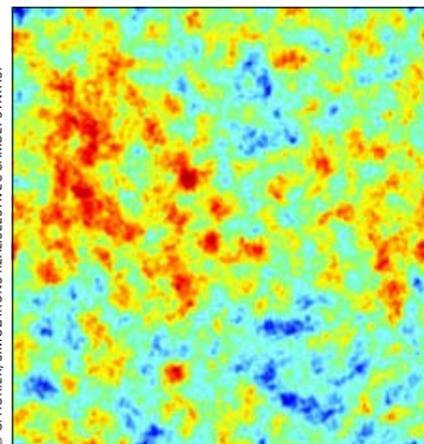
[3] A. Ashtekar et D. Sloan, arXiv:1103.2475v1 [gr-qc], 2011.

Des traces des boucles dans le ciel de Planck ?

Le rayonnement cosmologique fossile, première lumière émise par l'Univers, est aujourd'hui scruté avec une précision inégalée par le satellite Planck de l'ESA, lancé en 2009. Les cartes qu'il dresse actuellement contiendront des informations cruciales sur les premiers instants de l'Univers,

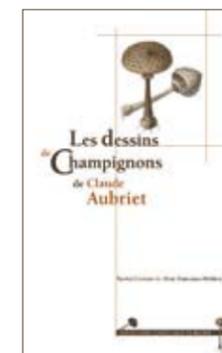
en particulier sur les fluctuations primordiales ayant conduit aux structures cosmiques actuelles. On peut définir trois paramètres importants qui reflètent l'amplitude des différentes fluctuations, l'un d'entre eux est appelé « mode de polarisation B ». En le calculant, suivant le modèle standard ou par la cosmologie quantique à boucles, on obtient des cartes du fond de rayonnement fossile sensiblement différentes : la deuxième théorie prédit que le « rebond » subi par l'Univers, le Big Bounce qui remplacerait le Big Bang, atténuerait les grosses « taches » de la carte du modèle standard mais en conserverait les petites. En gravité quantique à boucles, on s'attend donc à ce que les plus grandes structures vues dans le fond de rayonnement fossile soient moins intenses que celles prévues

par le modèle standard tandis que les petites seraient bien contrastées, comme le montrent ces deux simulations numériques. À gauche, la carte du fond de rayonnement fossile prédite par le modèle standard cosmologique. À droite, la carte calculée par la gravité quantique à boucles.



Muséum national d'Histoire naturelle

Les dessins de Champignons de Claude Aubriet



Xavier Carteret & Aline Hamonou-Mahieu

Les documents manuscrits de la famille des Jussieu, professeurs de botanique au Jardin du Roy puis au Muséum d'histoire naturelle ont été acquis en 1858 par le Muséum après la mort d'Adrien de Jussieu. Conservés à la Bibliothèque centrale du Muséum ils forment un fonds riche d'informations pour l'histoire des sciences, parti-

culièrement celle du Jardin et celle de la Botanique. Parmi les plus anciens, se trouve un portefeuille contenant 98 dessins de champignons, réalisés vers 1730, par Claude Aubriet sous la direction d'Antoine de Jussieu.

Claude Aubriet, peintre miniaturiste au Jardin du Roy, est connu pour la réalisation des illustrations des *Eléments de botanique* que publie Joseph Pitton de Tournefort en 1694. Ces dessins sont loués pour leur précision par Carl von Linné lui-même.

Les dessins de champignons par Aubriet furent exécutés à une période « clé » de l'histoire de la mycologie, puisqu'en 1729, Pier Antonio Micheli publie un ouvrage fondamental (*Nova plantarum genera*) sur la physiologie des champignons, accompagné d'excellentes gravures en noir et blanc. Les réalisations d'Aubriet, souvent soignées et fidèles aux modèles sont précieuses, car les représentations en couleurs de champignons sont rarissimes avant la fin du XVIII^e siècle. Elles témoignent en outre du regard que l'on portait alors sur ces cryptogames, qui apparaissaient bien mystérieux du point de vue de leur organisation, de leur reproduction et, pour tout dire, de leur « existence » même.

Cette publication intéressera vivement les mycologues et contribuera à faire connaître Claude Aubriet. En outre, elle souligne le rôle décisif que les illustrateurs scientifiques ont toujours joué au cours de l'histoire.

ISBN : 978-2-85653-654-4 • 220 x 340 mm • 97 planches coul. 330 p. • texte bilingue français / anglais • novembre 2010 • 94 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques

Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • http://www.mnhn.fr/pubsci

Pour en savoir plus

Livres en français

► Martin Bojowald, *L'Univers en rebond*, Albin Michel, 2011.

► Aurélien Barrau et Daniel Parrochia, *Forme et Origine de l'Univers*, Dunod, 2010.

► Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique !*, Dunod, 2007.

► Carlo Rovelli, *Qu'est-ce que le temps, qu'est-ce que l'espace ?* Bernard Gilson Éditeur, 2006.

Livres en anglais

► Daniele Ority, *Approaches to quantum gravity*, Cambridge University Press, 2009.

► Carlo Rovelli, *Quantum Gravity*, Cambridge University Press, 2004.

► Lee Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity*, Perseus Books Group, 2002.

La Recherche a publié

► Dossier « Faut-il en finir avec la théorie des cordes ? », *La Recherche*, septembre 2007, p. 30.

CD-Audio

► Carlo Rovelli, *Temps et espace*, De Vive Voix, 79 min, 2007.

Web

► <http://tinyurl.com/gravite-boucles>

Un portail qui tient à jour les séminaires, colloques de la communauté des « bouclistes ».

► <http://gravity.psu.edu/people/Ashtekar/>

La page de Abahay Ashtekar, auteur de l'article fondateur de la théorie de la gravité quantique à boucles.

► www.cpt.univ-mrs.fr/~rovelli/rovelli.html
La page de Carlo Rovelli.

► www.iem.csic.es/loops11/
Le site du colloque international de célébration des 25 ans de la théorie de la gravité quantique à boucles.

Conférences

► <http://tinyurl.com/conference-rovelli>

« La gravité quantique », conférence grand public, de Carlo Rovelli à la Cité des sciences, 2005.

► <http://tinyurl.com/rovelli-loops>

Pour plus initiés, la conférence de Carlo Rovelli lors de la célébration des 25 ans de la théorie de la gravité quantique à boucles.