

Gilles Cohen-Tannoudji, Jean-Pierre Gazeau

Phénoménotechnique du temps et cosmogonie scientifique

1. Introduction

Le titre que nous avons choisi pour notre contribution signifie que nous pensons que les problèmes de la *phénoménotechnique bachelardienne* du temps se posent dans la convergence des deux grandes disciplines de la recherche fondamentale nées au début du vingtième siècle, la *physique des particules* qui est la théorie des composants élémentaires de la matière et des interactions fondamentales auxquelles ils participent et la *cosmologie* qui est la théorie du tout de l'univers, pour former ce que nous appelons une *cosmogonie scientifique*, qui serait la théorie de l'origine *temporelle* de l'univers et que nous proposons d'associer au *noumène bachelardien*. *Phénoménotechnique* et *noumène* sont les deux concepts qui apparaissent dans l'article daté de 1931 de Bachelard intitulé *Noumène et microphysique*¹.

Cet article de Gaston Bachelard, s'inscrit dans les vifs débats qui se déroulaient alors à propos de la signification de la physique quantique, (voir en particulier le célèbre article 'EPR'² datant de 1935), et ceux des débuts de la relativité générale (voir l'article d'Einstein et Rosen³, publié quelques semaines après). Il est intéressant de noter la clairvoyance de Gaston Bachelard, d'une part, à propos de la physique quantique quand on compare, comme nous allons le faire dans les deux premières parties, ses vues avec celles qui ont fait consensus dès les lendemains de la seconde guerre mondiale⁴, et d'autre part à propos des spectaculaires progrès de la cosmologie contemporaine comme nous le montrerons dans les quatrième et cinquième parties de notre contribution.

¹ Bachelard, G., *Noumène et Microphysique*, in A. Koyré, H.C.H. Puech, A. Spaier, *Recherches Philosophiques*, Paris, Boivin&Cie, 1931-1932, pp. 35-65.

² Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N., « Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Physical Review*, Vol. 47, 1935, pp. 777-780.

³ A. Einstein, N. Rosen, « The Particle Problem in the General Theory of Relativity », *Physical Review*, Vol. 48, 1935, pp. 73-77.

⁴ Lemaître, G., *L'Hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie*, préface de F. Gonseth, Neuchâtel, Editions du Griffon, 1946; Pauli, W. (ed.), *Dialectica*, Vol.II, n° 3-4, « L'idée de complémentarité », Neuchâtel, Editions du Griffon, 1948.

Le passage de *Noumène et microphysique* qui nous a paru le plus significatif du point de vue de la comparaison avec le consensus à propos de la physique quantique à la fin des années quarante est le suivant :

Ainsi le monde caché dont nous parle le physicien contemporain est d'essence mathématique. Le physicien fait ses expériences en se fondant sur le caractère rationnel du monde inconnu. On exprimerait peut-être assez bien la conviction du physicien, au sortir du doute relatif à son emprise sur la réalité, par la formule suivante : *cogitatur, ergo est*, étant entendu que le fait d'être pensé mathématiquement est la marque d'une existence à la fois organique et objective (...) Devant tant de succès de la recherche rationnelle, comment se défendre de poser *sous le phénomène, un noumène* (souligné par nous) où notre esprit se reconnaît et s'anime ! Ce noumène n'est pas un simple postulat métaphysique ni un conventionnel signe de ralliement. Nous lui trouvons en effet, par la réflexion, une structure complexe ; c'est même à cette complexité harmonique qu'il doit son objectivité discursive, cette objectivité qui seule peut s'exposer, s'éprouver, confirmer son universalité. Nous pourrions donc dire que la physique mathématique correspond alors à une nouménologie bien différente de la phénoménographie où prétend se cantonner l'empirisme scientifique. *Cette nouménologie éclaire une phénoménotechnique par laquelle des phénomènes nouveaux sont, non pas seulement trouvés, mais inventés, mais construits de toutes pièces.*⁵

Gilles Cohen-Tannoudji, Jean-Pierre Gazeau

2. Nouménologie bachelardienne et complémentarité en mécanique quantique

Comment ne pas mettre en regard ce passage de l'article de Bachelard avec l'ensemble du numéro 7/8 de la revue *Dialectica*, fondée par Ferdinand Gonseth, Gaston Bachelard, et Paul Bernays, consacré à l'idée de complémentarité, et qui comportait, outre l'éditorial de Wolfgang Pauli qui en avait coordonné la réalisation, les contributions de Bohr, Einstein, de Broglie et Heisenberg ainsi qu'un texte très important de Gonseth ? Dans son éditorial, Wolfgang Pauli résume la teneur du débat qui a opposé Einstein et Bohr, et il attire l'attention du lecteur sur

Les tentatives intéressantes de Ferdinand Gonseth de formuler l'idée de complémentarité de façon si générale qu'aucune référence explicite ne soit plus faite à la physique au sens propre. Ceci, bien sûr, n'est possible que par l'usage d'un langage auquel les physiciens ne sont pas habitués, qui utilise des expressions comme '*horizon de réalité*', '*horizon profond*' et '*horizon apparent*', '*événements d'un certain horizon*'. Le mot '*phénomène*' cependant est utilisé dans cet article strictement dans le sens, mentionné ci-dessus, que lui donne Bohr. A l'*'horizon profond*' de Gonseth appartiennent les objets symboliques auxquels des attributs conventionnels ne peuvent être assignés de façon non-ambiguë, tandis que les '*traces*' de Gonseth sont identiques aux '*phénomènes*' au sens que nous donnons à ce terme.⁶

⁵ Bachelard, G., *Noumène et métaphysique*, cit., Souligné par nous.

⁶ Pauli, W. (ed.), *Dialectica*, cit., p. 310.

La correspondance entre les concepts de la complémentarité quantique et ceux de la nouménologie de Bachelard fonctionne terme à terme : les noumènes bachelardiens sont à relier, dans l'interprétation des *phénomènes*, aux « 'objets' atomiques qui ne peuvent plus être décrits 'd'une façon

uniquement en termes d'attributs physiques conventionnels'. Ces objets '*ambigus*' utilisés dans la description de la nature ont un caractère évidemment symbolique⁷. Quant au *phénomène* au sens que lui donne Bohr, il ne peut se comprendre, au sens bachelardien, que comme un élément d'une *phénoménotechnique*, puisque sa définition même implique la prise en compte des conditions de l'observation expérimentale.

3. Nouménologie et phénoménotechnique du temps en physique des particules

Dans sa contribution intitulée *Mécanique quantique et réalité*⁸ au numéro de *Dialectica* consacré à la complémentarité, Einstein a repris l'argumentation basée sur l'article EPR, qu'il exprime sous la forme du principe relativiste *des actions par contiguïté*, un principe qui permet de caractériser ce qu'il appelle '*l'indépendance relative des choses distantes spatialement*', dont il affirme que '*seule la théorie du champ en a fait une application conséquente*'. Auparavant il avait en effet rappelé le grand principe de la physique relativiste :

« Ce qui caractérise les choses de la physique, c'est qu'elles sont pensées comme étant rangées dans un continuum d'espace-temps. Et, ce qui paraît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des 'parties différentes de l'espace'. Sans cette hypothèse d'existence autonome (un 'être ainsi') des choses spatialement distantes – hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours – la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible. On ne voit pas non plus comment, sans cette disjonction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. La théorie du *champ* (souligné par nous) a développé à l'extrême ce principe, dans la mesure même où les choses élémentaires, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits.

Mais l'argument développé par Einstein dans son article ne s'applique pas à un champ, mais à un « système » de deux particules ou atomes, et, comme il le dit dans sa lettre adressée à Pauli en tant que coordonnateur du débat à paraître dans *Dialectica* :

⁷ *Ibidem*, p. 308.

⁸ Einstein, A., *Mécanique quantique et réalité*, cit., pp.320-324. Dans le volume cité, l'article d'Einstein est en allemand. Nous nous référons à sa traduction en français parue dans Id., *Œuvres choisies d'Einstein*, Tome I Quanta, Paris, Seuil CNRS, pp. 244-249.

Cher Pauli,

A votre lettre, je vois avec plaisir que vous avez lu attentivement mon petit article. Vous ne croyez pas plus que moi à une action à distance immédiate. Pour échapper à cette hypothèse, vous concevez la fonction Ψ non pas comme la description d'un système individuel mais comme la description d'un ensemble de systèmes. Mais cela signifie seulement une chose : vous pensez que la situation réelle n'est pas décrite de façon complète par la fonction Ψ .

Et c'est à cette accusation d'incomplétude que répond Bohr : d'après lui, c'est Einstein qui, dans son argumentation ne prend pas en compte de façon complète les conditions de l'observation :

Dans ce contexte, il est essentiel de noter que, dans toute application bien définie de la mécanique quantique, il est nécessaire de spécifier *la totalité de l'arrangement expérimental* (souligné par nous) et que, en particulier, la possibilité de disposer des paramètres définissant le problème de mécanique quantique ne correspond qu'à notre liberté de construire et de manipuler les appareils de mesure, ce qui, alors, signifie la liberté de choisir parmi les différents types complémentaires de phénomènes ceux que nous voulons étudier. De façon à éviter des inconsistances logiques dans la prise en compte de cette situation non-familière, on doit être évidemment très attentif aux questions de terminologie et de dialectique. Ainsi des phrases fréquentes dans la littérature physicienne, telles que '*perturbation des phénomènes par l'observation*' ou '*création d'attributs physiques par la mesure*' représentent un usage de termes tels que '*phénomène*' et '*observation*' aussi bien que '*attributs*' et '*mesure*' qui est difficilement compatible avec un usage commun et une définition pratique et, donc prêtent à confusion. Comme un moyen plus approprié de s'exprimer, on pourrait fortement recommander de limiter l'usage du mot *phénomène* pour se référer exclusivement à des observations obtenues sous des circonstances spécifiées, incluant la prise en compte de la totalité de l'expérience.⁹

Mais, si les phénomènes corpusculaires ou ondulatoires ne sont compris que comme relevant de phénoménotechniques contradictoires, peut-on qualifier de noumène l'objet de l'expérience EPR ? S'agit-il d'un champ pour répondre aux exigences de la relativité telles que les exprime Einstein, ou d'un système de deux atomes ou corpuscules inextricablement liées¹⁰, pour répondre aux exigences de la mécanique quantique telles que les exprime Bohr ? Il nous semble que la réponse à cette interrogation ne pouvait être apportée que par la mise en œuvre de la *théorie quantique des champs* dans laquelle le concept de *champ quantique*, dont les caractéristiques internes sont dissociées de sa description spatiotemporelle, peut, comme nous allons maintenant l'expliquer, être considéré comme relevant de la nouménologie bachelardienne.

⁹ Bohr, N., *op. cit.*, pp. 316-317.

¹⁰ On pourrait dire aujourd'hui "intriqués", comme peuvent l'être des caractéristiques internes, e.g. spin, sans localisation spatiale. L'outil mathématique nécessaire à leur prise en compte est le produit tensoriel d'espaces vectoriels, une notion loin d'être évidente et trop souvent occultée dans les présentations (grand public ou même public averti) des subtilités du formalisme quantique. La maîtrise de cet outil est pourtant fondamentale pour comprendre l'intrication quantique.

3.1. Système de champs quantiques en interaction, le noumène de la physique des particules

Le concept de champ quantique, prolongeant celui de champ relativiste¹¹, a en effet été élaboré pour répondre aux besoins de la physique des particules, une physique de haute énergie, éminemment quantique et relativiste : un champ quantique est une structure relativiste, s'étendant à l'ensemble de l'espace-temps, qui consiste en opérateurs d'émission ou d'absorption d'un quantum de champ, pouvant être une particule ou une antiparticule. Un système de tels champs quantiques en interaction peut tout à fait relever de la nouménologie bachelardienne ; c'est ce qu'affirme le regretté Stephen Weinberg, en disant que les champs quantiques sont les 'ingrédients de base de l'univers :

Dans sa forme mature, l'idée de la théorie quantique des champs est que les champs quantiques sont les ingrédients de base de l'univers, et les particules ne sont que des paquets d'énergie et d'impulsion des champs. Dans une théorie relativiste la fonction d'onde est une fonctionnelle de ces champs, pas une fonction des coordonnées des particules. La théorie quantique des champs a donc conduit à une vision plus unifiée de la nature que l'ancienne interprétation dualiste en termes à la fois de champs et de particules.¹²

3.2. L'intégrale de chemins de Feynman, la phénoménotechnique en physique des particules

La méthodologie de l'intégrale de chemins développée par Feynman à propos de l'électrodynamique quantique (QED, Quantum ElectroDynamics) consiste en une intégrale fonctionnelle (une intégrale à une infinité continue de variables d'intégrations !) portant sur toutes les histoires possibles de l'univers en quoi consiste le système de champs quantiques en interaction. Malgré son caractère inimaginablement complexe, il se trouve, comme on pourra s'en convaincre à la lecture de Diagrammes et amplitudes de Feynman, la partition du modèle standard¹³, qu'il a été possible, en quelque sorte, de mettre en musique ce programme, avec un succès impressionnant en électrodynamique quantique, et qu'il a été possible de le généraliser à toutes les interactions fondamentales (gravitation non comprise) en physique des particules, sans préjuger de certaines de ses difficultés mathématiques insurpassables.

Mais, alors que le concept de champ relativiste suppose un cadre spatio-temporel, les particules qui ne sont que des paquets d'énergie et d'impulsion, manifestations, observées en laboratoire, ne dépendent pas de l'espace-temps du laboratoire,

¹¹ L'adjectif « relativiste » est pris ici au sens relativité Einsteinienne, sachant qu'il existe d'autres relativités, galiléenne, deSitterienne, etc, comme il l'a été bien démontré dans la classification de Bacry et Lévy-Leblond, « Possible Kinematics », *J. Math. Phys.*, Vol. 9, 1968, pp. 1605-1614.

¹² Steven Weinberg, *What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is*,

¹³ Cohen-Tannoudji, G., *Diagrammes et amplitudes de Feynman, la partition du modèle standard*, in F. Nicolas (ed.), *Les mutations de l'écriture*, Paris, Éditions de la Sorbonne 2013.

et qu'elles s'observent plutôt dans l'espace des énergies-impulsions, conjugué ou réciproque, par transformation de Fourier de cet espace-temps, qui est, en quelque sorte éliminé par intégration. D'autre part, d'après la théorie quantique, ces observations d'événements individuels ne peuvent être décrites que de façon statistique. La phénoménotechnique expérimentale de la théorie quantique des champs, n'est donc pas, à proprement parler une phénoménotechnique du temps, mais les théories de jauge sur réseau où on remplace l'espace-temps par un espace-temps fictif discrétisé à quatre dimensions, appelé réseau, permettent de faire des prédictions de nature statistique ou de produire des simulations informatiques des effets de la théorie quantique des champs, utiles, comme nous le montrons plus bas [§ 5-3 ci-dessous], en cosmogonie scientifique supposée être une théorie des débuts temporels de l'univers.

4. Nouménologie et phénoménotechnique du temps en cosmologie quantique

Comme le concept de champ, qu'il soit quantique ou non, suppose une structure s'étendant à l'ensemble de l'espace-temps, c'est-à-dire à l'univers entier, se pose inévitablement la question de l'existence d'une nouménologie en *cosmologie*. Il se trouve que c'est en cosmologie qu'a surgi un problème du temps, à propos duquel Einstein a eu des débats avec de Sitter, Friedman et Lemaître. Partant de l'égalité de la masse inertielle et de la masse gravitationnelle, qu'il érige en *principe universel d'équivalence*, Einstein a tenté un modèle cosmologique, dans lequel ce principe serait satisfait. Dans ce modèle, l'univers serait *statique* grâce à la réintroduction du terme cosmologique faisant intervenir la fameuse constante cosmologique, qu'il avait écarté dans ses premières tentatives d'établir les équations de la relativité générale, mais qui serait capable d'empêcher l'effondrement de son univers sous l'effet de sa propre gravitation¹⁴.

4.1 de Sitter et la "matière-monde"

Un vif débat l'oppose alors à de Sitter, qui lui, avait opposé au modèle d'Einstein, qu'il appelle 'le système A' un autre modèle cosmologique, qu'il appelle 'le système B' comportant un univers sans matière mais obéissant aux équations d'Einstein avec seulement le terme cosmologique et sa constante :

permettant de satisfaire le "*principe matériel de relativité de l'inertie*" en jouant le rôle d'une matière hypothétique, dont la masse totale est tellement énorme qu'en

¹⁴ Une des contributions les plus remarquables de la physique mathématique fut de montrer, en fait, qu'une des caractéristiques internes de systèmes composites, noyaux, atomes, molécules, la statistique dite de Fermi, empêche leur effondrement. Voir Lieb, E.H., Thirring, E., «Bound for the Kinetic Energy of Fermions Which Proves the Stability of Matter », *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 35, 1975, pp. 687 – 689.

comparaison, toute la matière qui nous est connue est complètement négligeable' (*utterly negligible*). Cette matière hypothétique, je l'appellerai la *matière-monde* (*world – matter*).¹⁵

Puisque, dit de Sitter, si on néglige la matière qui nous est connue, la constante cosmologique Λ permet de satisfaire le principe matériel de relativité de l'inertie, et que, si on ne néglige pas la matière qui nous est connue, ce principe ne peut être satisfait que grâce à cette constante, c'est que « *l'introduction de cette constante ne peut être évitée que par l'abandon concomitant du postulat de relativité de l'inertie* » (souligné par nous). Et à propos de la matière-monde, il ajoute l'importante remarque qui suit :

En fait, il n'y a pas de différence essentielle entre la nature de la matière ordinaire gravitante et celle de la matière-monde. La matière ordinaire, le soleil, les étoiles, etc., ne sont que de la *matière-monde condensée*, et il est possible, sans que ce soit une nécessité, de supposer que toute la matière-monde soit ainsi condensée

4.2 de Sitter et le 'temps extra-mondain'

En ce qui concerne le problème du temps, de Sitter introduit un autre concept, particulièrement important pour notre propos :

Le monde à trois dimensions doit, pour pouvoir accomplir des "mouvements" c'est-à-dire pour que sa position puisse être une fonction variable du temps, être pensé mobile dans un espace "absolu" à trois dimensions ou plus (pas l'espace-temps x, y, z, ct). Le monde à quatre dimensions requiert pour son mouvement *un espace absolu à quatre (ou plus) dimensions, et de plus un temps extra-mondain qui sert de variable indépendante à ce mouvement*.¹⁶

4.3 L'éther de la relativité générale selon Einstein

Einstein, qui avait rejeté l'idée d'un éther en théorie restreinte de la relativité, a reconnu en 1920, l'existence d'un éther en théorie générale la relativité, qui pourrait bien n'être autre, comme nous allons le montrer ci-dessous, que la matière-monde de de Sitter :

En récapitulant, on peut dire que selon la théorie de la relativité générale l'espace est doté de qualités physiques ; en ce sens, donc, il existe un éther. Selon la théorie générale de la relativité, l'espace sans éther est impensable ; car dans un tel espace non seulement il n'y aurait pas de propagation de la lumière, mais aussi pas de possibilité d'existence pour les moyens de mesurer l'espace et le temps (les règles et les horloges), ni donc

¹⁵ de Sitter, W., *On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein's latest hypothesis*, in KNAW, Proceedings, 19 II, Amsterdam, 1917, pp. 1217-25 [en ligne: https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/Einstein_graduate/2590_Einstein_2015/pdfs/de%20Sitter%20Amst%20Acad%201917.pdf].

¹⁶ Souligné par nous.

d'intervalles d'espace-temps au sens physique. Mais cet éther ne peut être considéré comme doté de la qualité caractéristique des milieux pondérables, comme composé de parties qui peuvent être suivies dans le temps (irréductibilité). L'idée de mouvement peut ne pas s'appliquer à cela (énergie au repos).¹⁷

4.4 Les polémiques avec Friedmann et Eddington

De son côté, Friedman fait remarquer que la théorie d'Einstein est une théorie dynamique, et que, avec ou sans terme cosmologique, elle est compatible avec un univers en expansion, ou en contraction ou statique. Einstein reproche à Friedman une « erreur de calcul », un reproche qu'il admet, un peu plus tard être infondé.

Quand, un peu plus tard, Eddington montre que l'équilibre invoqué par Einstein entre la gravitation et l'effet du terme cosmologique ne peut qu'être instable, Einstein reconnaît la validité de cette remarque d'Eddington, et donc renonce à la réintroduction du terme cosmologique dont il dit qu'elle ne fait que traduire la plus grosse erreur qu'il ait commise. A partir de là, Einstein s'est de moins en moins intéressé à la cosmologie, et le consensus parmi les astrophysiciens a été de suivre Einstein et d'oublier la constante cosmologique.

4.5 Georges Lemaître et Ferdinand Gonseth, le défi d'une cosmogonie scientifique

Il nous faut reconnaître qu'Einstein a commis, dans cet épisode, plusieurs erreurs, dont la moindre n'est pas celle de ne pas avoir réalisé que la théorie qu'il était en train d'élaborer est en fait une théorie *dynamique de l'univers* ! Cette erreur l'a fait passer à côté de l'une des plus importantes découvertes du vingtième siècle, celle de *l'expansion de l'univers*, dont les véritables découvreurs sont Friedman et le chanoine Georges Lemaître¹⁸. C'est ce dernier qui, en 1927, a établi : « la loi liant la vitesse de fuite des nébuleuses extragalactiques à leur éloignement. Deux ans plus tard, cette loi devait être brillamment confirmée par les mesures de Hubble. Ce succès initial fondait solidement la cosmogonie du savant belge »¹⁹.

C'est lui aussi qui a tenu tête à Einstein dans le débat qu'ils ont eu à propos de la constante cosmologique : dans son ouvrage préfacé par Gonseth, il affirme en effet à propos de la *répulsion cosmique* induite par la constante cosmologique :

« La répulsion cosmique n'est pas une hypothèse spéciale introduite pour éviter des difficultés qui se présentent dans l'étude de l'univers. Si Einstein l'a introduite dans son mémoire cosmologique, c'est parce qu'il se souvenait l'avoir arbitrairement laissé

¹⁷ Einstein, A., *Sidelights on Relativity. Ether and the Theory of Relativity*, An Address delivered on May 5th, 1920, in the University of Leyden", London, Methuen & Co., 1922, pp. 23-24.

¹⁸ Friedmann, A. « Über die Krümmung des Raumes », *Zeitschrift für Physik*, Vol. 10, 1922, pp. 377-386; Id., « Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes », *Zeitschrift für Physik*, Vol. 21, 1924, pp. 326-332.

¹⁹ Gonseth, F., *Préface*, in *L'hypothèse de l'atome primitif*, cit.

tomber lorsqu'il avait établi les équations de la gravitation. La constante cosmologique s'impose logiquement dans le développement de la théorie. La supprimer revient à la fixer arbitrairement en lui donnant une valeur particulière, zéro²⁰.

5. Le défi d'une cosmogonie scientifique, le noumène bachelardien de la cosmologie

Une remarque d'ordre terminologique est ici nécessaire. Dans l'ouvrage cité ci-dessus, ni Lemaître, ni Gonthier n'utilisent le terme de cosmologie pour désigner la science de l'univers formant un tout, ils lui préfèrent le terme *cosmogonie*, ce que Lemaître définit à la fin de l'ouvrage comme : « l'objet d'une théorie cosmogonique est de rechercher des conditions initiales idéalement simples d'où a pu résulter, par le jeu des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité »²¹.

Lemaître, prêtre catholique, qui a eu à faire face à des critiques venant des milieux agnostiques ou matérialistes et à des tentatives de récupération par l'église catholique²², a pris grand soin de marquer une nette frontière entre ce qui relève de sa foi en une création divine du monde, et ce qu'il appelle la cosmogonie, qu'il considère comme une authentique discipline scientifique, étudiant le début naturel de l'univers. Soutenu efficacement par Gonthier, c'est donc un véritable défi qu'il lance, ce que nous appelons le *défi d'une cosmogonie scientifique*, un défi, que nous proposons de considérer comme le noumène bachelardien de la cosmologie quantique.

5.1. La singularité du big bang et les difficiles débuts de la cosmologie

La réédition au Seuil par Jean-Pierre Luminet de l'ouvrage de Lemaître, associé à des textes d'Alexandre Friedmann, a pour titre *Essais de cosmologie*, et comme sous-titre *L'invention du big bang*²³, au lieu de celui utilisé par Lemaître, *essai de cosmogonie*.

Les termes *big bang* (grand boum), maintenant entrés dans le langage commun, figurent dans le nom du premier modèle cosmologique, *négligeant la constante cosmologique*, qui intègre la donnée de l'expansion de l'univers, et qui rend compte de manière plus ou moins satisfaisante de la plupart des données de l'observation (loi de Hubble, abondance des éléments légers, observation du rayonnement cosmologique microonde CMB), le *Hot big bang model* (HBBM le modèle du big bang chaud). Ces termes désignent une singularité mathématique (densité de matière-énergie infinie) intervenue dans l'univers primordial qui, au travers des trois problèmes ci-dessous énoncés, empêche ce modèle d'être considéré comme celui d'une possible cosmogonie scientifique :

²⁰ Lemaître, G., *L'hypothèse de l'atome primitif*, cit., p. 116.

²¹ *Ibidem*.

²² Lambert, D., *Un atome d'univers. La vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Paris, Lessius, 2011.

²³ Friedmann, A., Lemaître, G., *Essais de cosmologie précédés de L'invention du big bang* par J.-P. Luminet, Paris, Seuil, 1997.

1. Le problème dit de l'*horizon* est dû au fait que la singularité du big bang implique une expansion de l'espace qui est si rapide que les régions de l'univers en équilibre thermique que l'on observe aujourd'hui ne peuvent pas avoir été en contact causal dans l'univers primordial.

2. Le problème dit de la *platitude* est ce que l'on appelle un problème d'*ajustement fin*, car dès les années soixante du 20^{ème} siècle, les observations suggéraient l'absence de courbure spatiale dans l'univers d'aujourd'hui, mais comme cette courbure spatiale est liée à un index k supposé indépendant du temps, il faudrait, pour maintenir son annulation pendant toute l'histoire de l'univers, un *ajustement* des paramètres tellement fin, qu'il rendrait le modèle totalement non crédible.

3. Le troisième problème est l'absence d'observation, dans l'univers d'aujourd'hui, des *monopoles magnétiques*, qui devraient, d'après les *théories de jauge* du modèle standard de la physique des particules, y être présents en grands nombres.

Ces difficultés ne font que traduire l'inconséquence de toute tentative de cosmologie ignorant les avertissements de de Sitter et Lemaître que nous avons évoqués plus haut : pas de cosmologie sans une matière-monde représentant la quasi-totalité du contenu de l'univers actuel et lui permettant de satisfaire le principe de relativité de l'inertie ; pas d'expansion de l'univers sans répulsion cosmique, donc sans constante cosmologique ! Il est intéressant de noter que l'acronyme de ce qui est maintenant considéré comme le modèle standard de la cosmologie, Λ CDM (pour Λ , la constante cosmologique, CDM, la Matière Sombre Froide) répond exactement aux exigences que nous venons d'énoncer.

5.2 Du scénario de l'inflation primordiale au nouveau modèle standard de la cosmologie

Pour éviter la singularité du big bang dans le modèle cosmologique, le scénario dit de l'*inflation primordiale* consiste en une phase d'expansion exponentielle de la taille de l'univers primordial durant un temps suffisant et faisant croître toutes les échelles spatiales de telle sorte que les trois problèmes énoncés puissent être résolus. D'après ce scénario, la singularité du big bang serait évitée si l'origine de la phase d'inflation était une *fluctuation du vide quantique* (apparition d'une paire particule-antiparticule presque immédiatement suivie par sa disparition) signifiant qu'en quelque sorte, l'univers naîtrait spontanément à partir du néant ²⁴! Mais, en l'absence d'un véritable modèle standard de la cosmologie, ce scénario de l'inflation primordiale, que l'on pourrait assimiler à un éventuel noumène bachelardien en cosmologie, ne jouissait d'aucune crédibilité.

²⁴ Vilenkin, A., « Birth of Inflationary Universes », *Phys. Rev.*, Vol. 27, 1983, p. 2848.

5.2.1. Progrès observationnels

Ce n'est pas le moindre mérite du modèle Λ CDM que d'avoir validé ce scénario, mais pour passer de la cosmologie HBBM à la cosmologie Λ CDM, il a fallu résoudre une difficulté qui relève de la phénoménotéchnique du temps : comment rendre compte, de manière quantitative, du phénomène de l'expansion de l'univers ? Aux débuts de la cosmologie, on ne disposait, pour utiliser la loi établie par Lemaître liant vitesse de fuite à éloignement [§4-5 ci-dessus], que de l'observation des *céphéides*, dont l'éclat absolu et le spectre d'émission étaient assez bien connus, ce qui permettait d'évaluer leur distance et, grâce au rougissement de leur spectre (effet Doppler), leur vitesse d'éloignement et donc, la vitesse de l'expansion. Cette évaluation a été un peu améliorée avec l'observation de supernovæ de type IA, mais, ce qui a permis à la cosmologie de devenir pleinement quantitative c'est la mesure de plus en plus précise du rayonnement micro-onde de fond cosmologique (CMB pour Cosmic Microwave Background), réalisée en astrophysique spatiale avec les missions COBE, MICROWAVE et dernièrement Planck.

5.2.2. Progrès conceptuels

D'un point de vue plus conceptuel, il a fallu renoncer à l'hypothèse arbitraire de l'absence de constante cosmologique, et adopter l'option essentielle de la philosophie de Ferdinand Gonseth, qui est celle de *l'ouverture à l'expérience*, c'est-à-dire autoriser, dans les équations de la nouvelle cosmologie, la possibilité d'une constante cosmologique non nulle, et de s'en remettre, selon Bachelard, au verdict de l'expérience :

Par contre, c'est la réflexion qui donnera un sens au phénomène initial en suggérant une *suite organique* de recherches, une perspective rationnelle d'expériences. Nous ne pouvons avoir *a priori* aucune confiance en l'instruction que le donné immédiat prétend nous fournir. Ce n'est pas un juge, ni même un témoin ; c'est un accusé qu'on convainc tôt ou tard de mensonge.²⁵

Mais il fallait aussi comprendre, d'un point de vue mathématique, les liens qui peuvent exister entre les théories, dites de jauge, qui gouvernent les interactions fondamentales du modèle standard, et celle de la gravitation qui sous-tend la théorie générale de la relativité. Le schéma dit de la *dualité jauge-gravité* tente de répondre à cet objectif²⁶ : l'idée de cette dualité est que, lorsqu'elles sont traitées de façon pleinement quantique, les théories de jauge *renormalisables* du modèle standard peuvent induire des effets typiquement gravitationnels comme une constante gravitationnelle induite et/ou une constante cosmologique induite²⁷.

²⁵ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, cit., p. 17.

²⁶ De Haro, S., Mayerson, D.R., Butterfield, J.N., *Conceptual Aspects of Gauge/Gravity Duality*, *Found. Phys.* Vol. 46, 2016, 1341-1425.s

²⁷ Adler, S., *Einstein gravity as a symmetry breaking effect in quantum field theory*, *Reviews of Modern Physics*, Vol.54, 1982, 729 ; Erratum *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 55, 1983, 837.

5.2.3. Les acquis de la cosmologie Λ CDM

Très rapidement résumés, ces quatre acquis sont les suivants :

1. La redécouverte de la constante cosmologique ;
2. La validation du scénario de l'inflation primordiale ;
3. La concordance de toutes les méthodes utilisées pour mesurer les distances en cosmologie ;
4. La découverte d'une matière-monde à deux composantes appelées énergie *sombre* et *matière sombre* qui, à elles deux représentent plus de 95% du contenu de l'univers²⁸.

C'est cette dernière découverte qui a été et est toujours considérée comme très surprenante alors que, comme nous l'avons noté ci-dessus, déjà en 1917, de Sitter remarquait qu'à côté de la matière-monde, la contribution de la matière ordinaire au contenu total de l'univers était *utterly negligible* ! Mais, si l'interprétation de l'énergie sombre en termes d'effet de la constante cosmologique fait consensus, celle de la matière sombre est considérée comme l'un des problèmes les plus ardues rencontrés en cosmologie.

5.3. Irréductibilité et énergie au repos en géométrie anti de Sitter, la phénoménotechique du temps en cosmogonie scientifique

Dans notre contribution au livre *Time and Science* dans laquelle on peut trouver les références de nos travaux en cours sur la matière sombre auxquels nous renvoyons le lecteur intéressé²⁹, nous évoquons la possibilité d'une cosmogonie scientifique qui soit compatible à la fois avec la relativité générale et avec la théorie quantique des champs qui prend en compte les deux constantes universelles, \hbar et c . Mais cette théorie, qui, en physique des particules, ne fonctionne en principe qu'à température et courbure spatiale nulles, doit être étendue pour être adaptée à la prise en compte des deux autres constantes universelles, que sont la constante de Newton G_N et la constante de Boltzmann k_B , auxquelles nous rajoutons Λ , la constante cosmologique que nous proposons de traiter, non pas comme un paramètre, mais comme une authentique constante universelle. La phénoménotechique pluridisciplinaire que nous proposons pour cette cosmogonie scientifique consisterait donc à articuler, à combiner, trois sous-disciplines de la physique quantique et relativiste qui s'appuient chacune sur une théorie prenant en compte un quantum élémentaire :

- i) *La théorie quantique des champs* qui prend en compte le quantum élémentaire d'action \hbar ,

²⁸ Encore une remarque d'ordre terminologique : en anglais ces deux composantes sont appelées *dark energy* et *dark matter*. Nous pensons préférable de traduire l'adjectif *dark* par *sombre* plutôt que par *noir* qui convient mieux à l'adjectif *black* que l'on trouve dans *black hole* usuellement traduit en *trou noir*.

²⁹ GCT&JPG *Scientific cosmogony, the time in quantum relativistic physics*, In "Time in Science", Lestienne, R. and Harris, P. (co-editors.), World Scientific Publishing, 2023, Vol 3, Chapter 10.

ii) *La théorie quantique de l'information* qui prend aussi en compte le quantum d'information ou d'entropie, k_B ,

iii) *Une théorie thermodynamique, donc quantique de l'espace-temps, encore à élaborer*, dont un quantum élémentaire pris en compte serait la constante cosmologique, Λ , que nous proposons d'interpréter comme un quantum de courbure.

Dans le cadre de cette articulation, on peut s'attendre d'une part à la *dualité du temps* c'est-à-dire qu'il y aurait deux temps complexes conjugués, le temps local (ou cinématique) t et un temps global τ , qui pourrait être le temps extra-mondain de de Sitter ou le temps *thermique* de Connes et Rovelli³⁰, et d'autre part au rôle des géométries de Sitter et anti de Sitter dans l'élaboration d'une théorie quantique d'un espace-temps comportant une température et une courbure non-nulles. C'est dans ce cadre que nous proposons d'interpréter la matière sombre comme un *condensat de Bose-Einstein de digluons dans une cinématique d'anti de Sitter*³¹. A l'appui de ce scénario, il est connu en physique des atomes ultra-froids³², selon laquelle la condensation de Bose-Einstein peut se produire dans la matière non condensée, mais également dans les gaz, que ce phénomène n'est pas lié aux interactions mais plutôt aux corrélations impliquées par les statistiques quantiques³³.

5.4. Le boson de Higgs, avatar moderne de l'atome primitif de Lemaître, le noumène de la cosmogonie scientifique

Quant au noumène de la cosmogonie, nous proposons de le trouver dans les théories de jauge sur réseau, dont nous avons dit plus haut (§ 3-2) qu'elles ignorent le temps, mais à condition de les généraliser de façon à ce qu'elles puissent inclure une dimension temporelle. La théorie de jauge sur réseau de la physique des particules ignore le temps parce que le réseau, qui tient lieu d'espace-temps, n'est pas *dynamique*. Pour faire des variables spatio-temporelles, des variables dynamiques, il convient de considérer *un réseau aléatoire*. C'est ce que proposent T.D. Lee et ses collaborateurs, *dans Gauge theory on a random lattice*³⁴.

L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître est une véritable intuition cosmogonique géniale : si l'univers *fini* qui nous est observable parce que

³⁰ Connes, A.; Rovelli, C. *Von Neumann Algebra Automorphisms and Time-Thermodynamics Relation in General Covariant Quantum Theories*. *Class. Quant. Grav.* 1994, 11, 2899-2918.

³¹ Cohen-Tannoudji G., Gazeau, J.-P., « Cold Dark Matter: A Gluonic Bose-Einstein Condensate in Anti-de Sitter Space Time », *Universe* 2021, Vol. 7, n°11, p. 402.

³² Atomes ultra-froids.

³³ Voir la note en bas de page sur l'intrication dans le §3. On pourrait dire aujourd'hui « intriqués », comme peuvent l'être des caractéristiques internes, e.g. spin, sans localisation spatiale. L'outil mathématique nécessaire à leur prise en compte est le produit tensoriel d'espaces vectoriels, une notion loin d'être évidente et trop souvent occultée dans les présentations (grand public ou même public averti) des subtilités du formalisme quantique. La maîtrise de cet outil est pourtant fondamentale pour comprendre l'intrication quantique. Cohen-Tannoudji, G., Gazeau, J.-P., *Dark matter as a QCD effect in an anti de Sitter geometry: Cosmogonic implications of de Sitter, anti de Sitter and Poincaré symmetries*. *SciPost Phys. Proc.* 14, 004 (2023).

³⁴ Christ, N. H., Friedberg, R., Lee, T.D., « Gauge theory on a random lattice », *Nuclear Physics B*, Vol. 210, n°3, 1982, pp. 310-336.

mesurable³⁵, est en expansion, avec des constituants s'éloignant les uns des autres à des vitesses proportionnelles à leur éloignement, et si par la pensée, on remonte le temps, on est obligé d'imaginer qu'à l'origine, tout le contenu de cet univers était rassemblé dans un volume infinitésimal, celui d'un unique "atome" et, donc, comme le dit Ferdinand Gonseth dans sa préface, « l'hypothèse de l'atome primitif revêt un certain caractère de nécessité »³⁶.

Mais selon l'état des connaissances à l'époque où cette hypothèse avait été formulée, elle a conduit Lemaître à imaginer que toute la masse de l'univers était concentrée dans un "gigantesque isotope du neutron" ! Mais cette image ne correspond absolument plus à celle que l'on se fait maintenant, d'un univers émergent, sans coût énergétique, d'un vide quantique de masse gravitationnelle active nulle. Autrement dit, c'est plutôt du côté de la théorie quantique des champs du modèle standard de la physique des particules qu'il est peut-être préférable de rechercher un possible candidat "atome primitif". Or, dans ce modèle standard, à côté des champs dits "*de matière*", les *leptons chargés*, les *neutrinos* et les *quarks*, qui sont tous des fermions de spin 1/2 et des champs dits "*de jauge*", photon, les bosons W et Z de l'interaction faibles et les *gluons*, les champs de jauge de la chromodynamique quantique (QCD), qui sont tous des bosons de spin 1, existe un autre champ quantique, dont le quantum, le très célèbre *boson de Higgs*, qui a les nombres quantique du vide, (spin 0, charge nulle dans toutes les théories de jauge du modèle standard) qui peut donc être considéré comme un champ quantique associé à la métrique de l'espace-temps, que l'on peut traiter *comme un réseau aléatoire*. En fait, ce boson de Higgs est la véritable clé de voûte de tout le modèle standard, c'est lui, dont nous pensons qu'il peut jouer le rôle de l'atome primitif de Lemaître³⁷ :

L'article de Gilles Cohen-Tannoudji et Jean-Pierre Gazeau propose la fondation d'une nouvelle cosmogonie, qui serait compatible à la fois avec la relativité générale et avec la théorie quantique des champs. Les éléments de cette cosmogonie ne sont pas des particules et leurs événements, mais des champs quantiques, et les interprétations de ces deux théories qu'elle suggère est une interprétation informationnelle, tout à fait conforme à l'évolution moderne de l'interprétation de la mécanique quantique. Dans cette théorie, compatible avec le Modèle Λ CDM (modèle standard incluant la matière noire froide et la constante cosmologique Λ) et impliquant les cinématiques de Sitter et anti de Sitter, les constantes fondamentales incluraient, en plus des habituels \hbar , G et c, la constante cosmologique Λ comprise comme un quantum de courbure, et la constante de Boltzmann k_B comprise comme un quantum d'entropie. Dans cette approche, le temps devient plus complexe, du moins au sens mathématique. On retrouve le temps global τ (thermique) de Connes et Rovelli, qui se présente comme le complexe conjugué du temps local. Mais c'est le temps τ qui est fondamental, à la base de l'évolution de l'univers. *Last but not the least*, le modèle esquissé propose d'interpréter la matière noire simplement comme étant liée aux gluons, «un Condensat de Bose-Einstein dans une cinématique

³⁵ Le fini est, par essence, mesurable. L'infini, lui, comme d'ailleurs tout nombre irrationnel, est incommensurable !

³⁶ Op. cit. Ferdinand Gonseth Préface à *L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître*

³⁷ Voir les figures 1 et 2.

anti de Sitter», alors que l'énergie sombre pourrait être liée aux neutrinos... Tout cela dérivant du boson de Higgs, qui pourrait être considéré comme l'avatar moderne de l'atome primitif de Lemaître.³⁸

6. Conclusion, la philosophie de Gonseth vue par Bachelard

C'est en introduction d'une rencontre organisée à l'occasion du soixantième anniversaire de Ferdinand Gonseth que Gaston Bachelard s'est exprimé à propos de l'idonéisme, la philosophie de Ferdinand Gonseth dont nous extrayons, à titre de conclusion, les quelques phrases suivantes :

L'idonéisme, par système, doit être un absolu modernisme. Il a la redoutable fonction de la modernité. Sans cesse il devra être mis à jour. C'est une philosophie du courage intellectuel. Et voilà bien pourquoi on peut en faire le point en négligeant la tâche inutile d'en faire un résumé. [...] On oublierait un des thèmes les plus actifs de la philosophie gonsethienne si l'on ne signalait pas sa position vis-à-vis des valeurs intuitives. Là encore, tout est nuance. Il faut installer l'idonéisme dans une « dialectique idoïne du concret et de l'abstrait » (cf. *La Géométrie et le Problème de l'Espace*, IV, p. 47). Et l'intuition restera toujours une nourriture concrète que l'exactitude abstraite devra assimiler. Dans *Les Fondements des mathématiques* (p. 105), Gonseth disait déjà : « Dans toute construction abstraite, il y a un résidu intuitif qu'il est impossible d'éliminer. » Serait-il même utile d'éliminer ce résidu intuitif ? Ne se reformerait-il pas de soi-même ? Ne tient-il pas à la nature même de l'esprit humain ? En élevant le débat, si la connaissance est un essentiel et constant ajustement de la nature de l'esprit et de la nature des choses, on voit bien que les dialectiques du concret et de l'abstrait – de l'intuition et de la rigueur – de l'expérimental et du rationnel sont des dialectiques motrices, dès l'instant où elles transcendent la stérile logique des oppositions. On atteint alors à cette synthèse dialectique qui est, comme dit Gonseth (loc. cit., p. 76), '*le rythme même du progrès scientifique*'.³⁹

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM, CEA, Université de Paris-Saclay)

Gilles.cohentannoudji@gmail.com

Jean-Pierre Gazeau

Astroparticule et Cosmologie, Université Paris Cité, CNRS, F-75013, Paris, France
gazeau@apc.in2p3.fr

³⁸ Commentaire fait par Rémy Lestienne, co-éditeur du livre *Time and Science*, dans lequel figure notre contribution GCT&JPG *Scientific cosmogony, the time in quantum relativistic physics*.

³⁹ Bachelard, G., *L'idonéisme ou l'exactitude discursive*, in *Etudes de philosophie des sciences*, en hommage à Ferdinand Gonseth, Neuchatel, Éditions du Griffon, 1950.

Figures

Gilles Cohen-Tannoudji, Jean-Pierre Gazeau

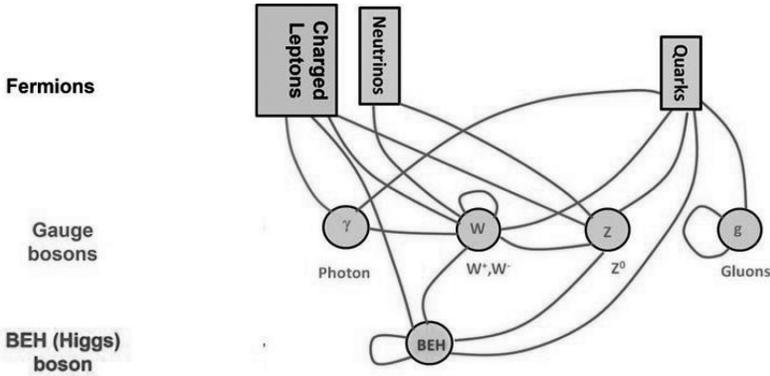


Figure 1

Le boson BEH (Higgs) comme clé de voûte du Modèle Standard : Les lignes bleues représentent les couplages des différents champs, ceux couplés au BEH, dont le BEH lui-même acquiert de la masse grâce au mécanisme BEH ; ceux qui n'y sont pas couplés restent sans masse ou conservent leur masse le cas échéant

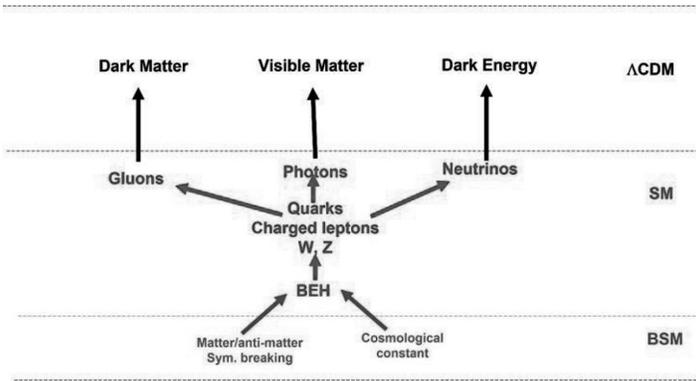


Figure 2

Illustration schématisée de l'adéquation du modèle standard de la physique des particules (SM) et du modèle standard cosmologique (Λ CDM), grâce à une hypothèse minimale « au-delà des modèles standards » (BSM).