Cosmologie et matière quantique: convergences conceptuelles*

Michel Paty**

Résumé: Les représentations théoriques de l'*ultra-macroscopique*, régi par la force de gravitation, et de l'*ultra-microscopique*, domaine de la physique quantique infra-atomique, deux régions extrêmes de la structuration de la matière longtemps pensées comme déconnectées, sont mises désormais en rapport par la *physique* elle-même, qui établit une convergence et un recouvrement partiel de leurs objets. Les phases primordiales de l'Univers en expansion, qui déterminent les premières impulsions de la dynamique du cosmos en imposant les contraintes physiques "initiales" de la cosmologie, coïncident avec l'objet de cette partie fondamentale de la physique subatomique qui concerne les symétries des champs et leurs brisures.

Cette rencontre entre la cosmologie et la matière quantique s'effectue par deux voies: celle des *lois de la nature*, et celle de la *constitution de la matière*, que l'on peut suivre aussi bien en étudiant les *circonstances historiques* de ces convergences conceptuelles et théoriques (mais aussi factuelles) qu'en analysant leurs *conditions épistémologiques*. L'Univers primordial de la cosmologie est considéré comme laboratoire virtuel de la physique des champs à symétrie de jauge dans la région asymptotique de leurs unifications. La pensée de la matière semble portée dans cette direction par un mouvement vers l'indifférenciation, qui part de l'identité des indiscernables constitutive de la physique quantique et va vers une identification progressive des divers *genres* d'états physiques (indifférenciation croissante par les *symétries dynamiques* d'ordres plus élevés). Le sens physique acquis désormais par de tels concept théoriques incline à y voir l'indice d'une objectivation plus grande de la théorie physique, qui ne *décrit* pas seulement le comportement de ses objets, mais les *détermine* et les *constitue* eux-mêmes de plus en plus étroitement.

La descente au fond de la matière ne s'effectue désormais pas tant dans les dimensions spatiales, que dans une plus grande indifférenciation des particules de la matière quantique: et de même pour la remontée vers "l'origine du temps" Cette dernière question s'éclaire par une analyse du rapport entre le temps et les théories physiques, notamment dans la perspective du temps cosmologique.

Abstract: The theoretical representations of the *ultra-macroscopic*, governed by the force of gravitation, and of the *ultra-microscopic*, domain of infra-atomic quantum physics, two extreme regions of the structuration of matter that were for long thought as being disconnected, are put henceforth in relation by physics itself, establishing convergence and partial recovery of their objects. The primordial phases of the Universe in expansion, that determine the first impetuses of the dynamics of the cosmos by imposing the "initial" physical constraints of cosmology, coincide with the object of this fundamental part of subatomic physics that concerns symmetries of fields and their breakings.

* Journée en hommage à Jacques Merleau-Ponty, Université de Paris 10-Nanterre, 6, 7 et 8 octobre 1997.

** Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot, 37 rue Jacob, 75006 Paris, France. E-mail: paty@paris7.jussieu.fr.

The encounter between cosmology and quantum matter happens by two ways, that of the *laws of nature*, and that of the *constitution of matter*, as one can trace it as well by studying the *historical circumstances* of these conceptual and theoretical (and also factual) convergences as by analyzing their *epistemological conditions*. The primordial Universe of cosmology is considered as a virtual laboratory for the physics of gauge symmetry fields in the asymptotic region of their unifications. The thought of matter seems to be oriented in this direction through a movement towards indifferentiation, that starts from the identity of the indistinguishables which is constitutive of quantum physics and goes towards a progressive identification of the various types of physical states (growing indifferentiation through *dynamic symmetries* of higher orders). The physical content acquired henceforth by such theoretical concept inclines us to see there an indication for a greater objectivation of physical theory, that does not only describe the behavior of its objects, but *determines* them and *constitutes* themselves closer and closer.

The descent down to the bottom of matter is henceforth not so much a descent down toward infinitely small spacial dimensions, than a descent towards a greater indifferentiation of quantum matter particles: and similarly for the ascent to the “origin of time” This last question is enlightened by an analysis of the relationship between time and physical theories, notably in the perspective of cosmological time.

“Alors, je vis l’aleph.”

“... Le diamètre de l’Aleph devait être de deux ou trois centimètres, mais l’espace cosmique était là, sans dimension de volume.”

“... J’eus le vertige et je pleurai, car mes yeux avaient vu cet objet secret et conjectural, dont les hommes usurpent le nom, mais qu’aucun homme n’a regardé: l’inconcevable univers”

Jorge Luis Borges, *L’Aleph*.

NOUS NE VOYONS NI l’Univers ni la matière élémentaire, mais nous pouvons les concevoir, comme dirait Descartes (nous n’imaginons pas l’infini, écrivait-il¹). Et, au fur et à mesure que notre vision se précise, nous les voyons en partie se confondre, se pénétrer l’un l’autre. Du moins l’un nous aide-t-il à concevoir l’autre. C’est à quelques réflexions sur ces données de la science contemporaine que ce qui suit voudrait inviter, en nous questionnant sur les circonstances de raison qui ont rendu possible un tel éclaircissement mutuel inattendu.

L’Univers considéré dans son ensemble, comme une totalité, et la “constitution intime” de la matière, aujourd’hui qualifiée comme la matière quantique, atomique et subatomique, pouvaient assez paraître correspondre, jusqu’à une époque récente, aux deux immensités de Pascal, celle de l’infinie grandeur

¹ Descartes, lettre à Mersenne, 27 mai 1630, *in* AT, Vol. 1, p. 152.

et celle de l'infinie petitesse² En les invoquant, l'auteur des *Pensées* n'envisageait pas qu'il fût possible ni même seulement pensable d'en faire jamais le tour, lui qui les voyait s'enfuir vers plus d'infini à chaque approche. Du moins nous reste-il de la question pascalienne, indépendamment des dimensions physiques de l'univers et de l'atome, l'interrogation sur les soubassements de notre pensée du monde, qui paraissent bien devoir continuer à tenir, quels que soient nos efforts, "le milieu entre tout et rien" Un peu plus près de nous, ces deux domaines, celui de l'Univers et celui de l'atome, étaient situés tous deux naguère parmi les terres interdites du positivisme, échappant par nature à la connaissance scientifique, à la connaissance positive.

Or voici que, depuis un certain temps, la cosmologie et la physique se sont attelées avec quelque succès à la tâche, peut-être enfin lavée de la malédiction de Sisyphe, de connaître les objets physiques le plus grand et le plus petit qui soient concevables. Ceux-ci, d'ailleurs, ne seraient plus infinis, si l'Univers bien qu'illimité reste fini, selon la théorie de la relativité générale et la conception des espaces riemanniens, et si les particules élémentaires nous font toucher la limite de leur extension spatiale (les leptons et les quarks seraient des particules ponctuelles, de dimension inférieure à 10^{-18} cm), selon la théorie quantique des champs (électrodynamique quantique, théorie de jauge électrofaible, chromodynamique quantique) dans son accord aux expériences³ Cela, du moins, avec d'autres conditions, permettrait plus facilement de les concevoir selon l'approche scientifique. A propos de la limite possible de signification physique d'un accès aux distances de plus en plus petites, on peut avancer que la descente au fond de la matière ne s'effectue désormais pas tant dans les dimensions spatiales, que dans une plus grande indifférenciation des particules de la matière quantique (nous y reviendrons).

Ces deux domaines, celui de l'Univers dans sa totalité, et celui des particules quantiques les plus élémentaires, ont été longtemps pensés comme déconnectés, relatifs à des conditions physiques qui semblaient à l'opposé les unes des autres, et relevant d'approches sans commune mesure: l'*ultra-macroscopique*, régi par une force de gravitation entre les masses agissant dans un espace-temps continu, et l'*ultra-microscopique*, soumis aux interactions quantifiées de la physique infra-atomique. Les représentations théoriques correspondantes, dévelop-

2 Pascal, *De l'Esprit géométrique* (vers 1657) et *Pensées* (1670), in Pascal [1963], respectivement p. 351-4 et 525-7.

3 Cf., en part., Feynman [1985], Cohen-Tannoudji & Spiro [1986], Salam, Heisenberg & Dirac [1990], Lopes & Escoubès [1995], Bimbot & Paty [1996].

pées depuis les années vingt de ce siècle, sont aussi différentes que possible et, comme l'écrivait Einstein lui-même, "semblent peu se prêter à une unification"⁴: la théorie de la relativité générale est une théorie déterministe et causale du champ continu, alors que la théorie quantique est une théorie de la discontinuité, faisant intrinsèquement appel aux *probabilités*, qui permettent de raccorder la discontinuité des grandeurs caractérisant un état à des équations différentielles pour les fonctions d'état qui décrivent les systèmes physiques (ces fonctions ayant les propriétés d'amplitudes de probabilité).

Ces deux domaines limites de la structuration de la matière universelle étaient traditionnellement pensés du point de vue théorique, notamment depuis la connaissance de la matière atomique (quantique), comme disjoints. Ils ne sont plus conçus aujourd'hui sans connexions, celles-ci ayant été appelées tout d'abord par la *cosmologie physique*, qui impliquait au départ la dynamique d'agrégats de matière, et qui implique aussi, en raison de son caractère évolutionnaire, celle des particules de matière. Ces deux régions extrêmes de la structuration de la matière sont mises désormais en rapport par la *physique* elle-même, au point d'établir une convergence partielle de leurs objets.

Bien des problèmes de la cosmologie contemporaine font appel à la connaissance des particules élémentaires, et une partie importante de cette discipline, celle qui se préoccupe de déterminer les premières impulsions de la dynamique du cosmos en lui imposant des contraintes physiques "initiales" se confond avec une partie fondamentale de la physique subatomique, qui concerne les symétries des champs et leur brisure. L'*examen épistémologique* de chacune des deux disciplines, de leurs objets et de leurs approches théoriques, auquel nous consacrerons l'essentiel de ce qui suit pour certains aspects, laisse également déceler des convergences conceptuelles qui permettent de mieux comprendre les recouvrements d'objets physiques. Nous rappellerons, chemin faisant, quelques éléments des premières convergences ou coïncidences d'objets, qui se rapportent à l'histoire de la rencontre des deux disciplines⁵.

La première région extrême de la matière, la cosmologie⁶, a pour objet l'Univers, dans son unicité et sa singularité, autrefois pensé immobile et statique, aujourd'hui évolutif, en expansion, déroulant l'espace-temps matériel; la

4 Einstein [1940], trad. fr., p. 116.

5 Paty [1980a, 1986a].

6 Sur l'astronomie, l'astrophysique et la cosmologie contemporaine, voir, en particulier, Schatzman [1962], Merleau-Ponty [1965], Sciama [1971], Weinberg [1977], Silk [1980], Hawking [1988], Andrillat *et al.* [1993], Audouze, Musset, Paty [1990], Hakim [1993], Thorne [1994].

seconde est la matière quantique, des atomes aux noyaux atomiques et aux particules élémentaires qui, ramenées à leurs constituants les plus fondamentaux, les *quarks* et les *leptons* et leurs *bosons d'échange*, sont “ponctuelles”, non affectées par le temps, et indestructibles, du moins selon une certaine acception, qui leur substitue des conservations fondamentales, celles des diverses *charges quantiques* (électrique, baryonique, leptonique, de saveurs, etc.), celles du nombre de fermions, celle de la masse-énergie⁷

L'étude des *circonstances historiques* aussi bien que celle des *conditions épistémologiques* de la rencontre entre la cosmologie et la matière quantique révèlent que cette rencontre s'effectue par deux voies: celle des *lois de la nature*, et celle de la *constitution de la matière*.

Cosmogonie physique et pensée cosmologique. La voie des lois de la nature

Prenons d'abord la première voie, celle des lois générales du monde physique (qui constituaient classiquement la *cosmologie* au sens propre, par exemple selon la définition donnée par Emile Littré dans son *Dictionnaire de la langue française*⁸). Ces lois s'appliquent au cosmos entier, en raison de l'unité de la matière: il s'agissait d'abord des lois (ou principes) du mouvement des corps et de l'attraction universelle newtonienne. D'Alembert énonçait, pour sa part, dans l'*Encyclopédie*, en s'appuyant sur la connaissance physico-mathématique développée dans le sillage de Newton (mais aussi inspirée, à des titres divers, par Descartes et par Leibniz⁹), une conception de la cosmologie qui en faisait “la science du Monde ou de l'Univers considéré en général, en tant qu'il est un être composé, et pourtant simple par l'union et l'harmonie de ses parties...”¹⁰

Dans la droite ligne de la physique des équations différentielles et du déterminisme laplacien, qui dit lois de la nature et conditions initiales énonce la possibilité d'une *cosmogonie*¹¹, c'est-à-dire d'une théorie de la constitution d'une

7 Certaines de ces conservations sont admises comme absolues (charges électrique, masse-énergie), ou quasiment (charges baryonique, leptonique), d'autres seulement partielles, suivant la nature des champs d'interaction et des symétries auxquelles ces derniers sont soumis.

8 Littré [1880], éd. 1971.

9 Paty [1998].

10 D'Alembert [1754].

11 Au sens également défini par Littré.

portion de l'Univers à partir de ses éléments localisés (la nébuleuse de gaz qui donna le système solaire, dans l'hypothèse de Kant-Laplace¹²). Je passerai, ici, sur la question du rapport entre *cosmologie* et *cosmogonie*, sur leurs définitions variables et sur les changements de signification de ces notions¹³.

La naturalisation des cosmogonies par la physique, étayée par la causalité laplacienne de la *Mécanique céleste*, étendue d'une causalité locale à un déterminisme et à une localité plus vaste, contribua (avec d'autres pensées implicitement cosmologiques concernant les concepts ou les théories de la physique¹⁴) à préparer la pensée de la cosmologie comme discipline scientifique et la théorie actuelle concernant l'état de l'Univers, fondée sur la théorie moderne de la gravitation, la Relativité générale. Les conditions initiales, ou plutôt, aux limites, étaient posées (du moins dans la pensée d'Einstein lorsqu'il écrivit son article de 1917 qui ouvrait l'ère de la cosmologie du point de vue théorique) à partir d'une réflexion sur la nature de la masse d'inertie, conçue en relation à d'autres masses mais non à l'espace (qui, sans cela, redeviendrait absolu). Cette réflexion entraînait la pensée physique vers la pensée cosmologique en posant les conditions de l'Univers au-delà des corps physiques, pour aboutir à la conclusion qu'il ne peut y avoir d'espace au-delà des masses et que l'Univers est fermé¹⁵. L'idée d'un tel Univers avait été rendue possible par l'"espace fini et illimité" de la géométrie de Riemann¹⁶.

On remarquera en passant que la théorie physique qui permit ce passage avait elle-même été tributaire, à son origine, d'une pensée cosmologique: le "principe de la relativité de l'inertie" (énoncé par Mach comme une proposition, et dénommé ainsi, puis "principe de Mach" par Einstein), qui fait intervenir l'interaction entre elles de toutes les masses de l'Univers, avait servi d'inspiration initiale à Einstein pour formuler, de manière plus maîtrisée, le principe de *covariance générale*, indépendant de tout référentiel¹⁷. Et cette généralisation elle-même, au-delà des systèmes d'inertie et à tous les mouvements, concernait l'ensemble des mouvements concevables *pour l'Univers entier*: elle était en cela

12 Kant [1755], Laplace [1796].

13 Paty [1993b].

14 Voir Merleau-Ponty [1983].

15 Einstein [1917].

16 Riemann [1854].

17 Voir, en part., Mach [1883], Einstein [1916b, 1921]. Cf. Paty [1993a], Chap. 5.

encore tributaire de l'idée cosmologique, mais retournée à un sens qui correspondait peut-être davantage au sens classique de la généralité des lois.

Notons encore que Henri Poincaré lui-même, en considérant le principe de relativité, étendu de la mécanique à l'électromagnétisme et à la "nouvelle mécanique", ne le restreignait aux mouvements d'inertie que pour des raisons d'approximation nécessaire¹⁸. Il le concevait en fait dans sa généralité, concernant tous les mouvements, en raison de son rapport direct à la relativité de l'espace qui, idéalement, se rapporte à l'ensemble des corps contenus dans l'espace entier de l'Univers, en déplacements quelconques les uns par rapport aux autres. Mais si elle restait idéale, cette proposition serait tautologique ou de pure définition et ne nous donnerait, estimait-il, aucune prise effective sur les propriétés des corps physiques réels. Il fallait donc se contenter, dans la pratique, de la considérer pour un ensemble plus local de corps, et pour des mouvements d'inertie. L'idée cosmologique apparaît liée, dans la pensée de Poincaré, à la rationalité des lois les plus générales de la géométrie et, dans cette mesure, de la physique.

Conditions initiales et échelles de correspondance

Revenons à la cosmologie elle-même. La théorie de la relativité générale jointe à la question des conditions aux limites de l'espace(-temps) physique engendrait la cosmologie comme théorie et discipline scientifique. Quand la nouvelle cosmologie abandonna quelque temps plus tard l'univers statique (avec Alexander Friedmann, dès 1922¹⁹), elle se conçut comme temporelle, en ce sens qu'elle avait pour objet l'Univers considéré non seulement dans sa structure et sa dynamique interne mais dans son évolution au cours du temps. A y bien regarder d'ailleurs, c'était là une implication naturelle du lien indissoluble de la matière non pas seulement avec l'espace, mais avec l'espace-temps. Même simplifiés, les modèles cosmologiques devaient respecter l'indissociabilité de l'espace-temps (à la différence du premier modèle d'univers cylindrique d'Einstein qui séparait la coordonnée temporelle).

Inscrite dans le temps aussi bien que dans l'espace, la nouvelle cosmologie évolutionnaire d'espace-temps se donnait les conditions de correspondre à une cosmogonie, puisqu'elle pouvait désormais être conçue comme une loi

18 Poincaré [1907, 1912]. Cf. Paty [1996].

19 Friedmann [1922].

générale combinée à des “conditions initiales” Ces dernières étaient en fait celles d’un instant quelconque, par exemple celles de l’état présent de l’Univers, la loi permettant de le ramener à un autre état, passé ou futur.

La question des conditions *initiales* au sens propre, c’est-à-dire proches de *l’origine du temps*, n’avait pas vraiment de sens physique si l’on s’en tenait à la seule théorie de la relativité générale, c’est-à-dire au seul champ de gravitation, qui n’en faisait qu’un point singulier, purement mathématique, sans contenu physique. Elle reçut ultérieurement un nouveau sens (physique, du moins jusqu’à un certain point), avec l’introduction de *champs de matière* autres que le champ gravitationnel. Mais l’idée de détermination complète de la suite du déroulement de l’Univers (entendu comme le complexe *espace-temps-matière*) par les lois de la nature (c’est-à-dire les lois des champs) et les conditions “initiales” (entendues désormais comme *un peu après le zéro des temps*), cette idée-là restait entière.

Ces champs de matière, aux très petites distances qui correspondaient à l’espace de l’Univers et aux très petits “premiers instants”, en-deçà de la prédominance du champ de gravitation aux grandes distances, sont les champs d’interaction de la matière quantique, les “champs de jauge”, tels qu’on peut les considérer dans des conditions énergétiques et spatio-temporelles particulières (grande densité de matière, volume d’espace restreint, temps primordiaux), où ils sont soumis à des relations de symétries caractéristiques, qui contribuent (et peut-être devraient suffire) à les déterminer.

Le pas décisif vers la connexion étroite entre la cosmologie et la matière quantique fut effectivement franchi quand se fit jour la nécessité de prendre en compte les champs autres que celui de gravitation, par une extrapolation de l’expansion de l’Univers vers l’origine de l’axe temporel, qui correspond à une densité extrême (ou quasi infinie) de la densité de matière, c’est-à-dire de l’énergie, dans des conditions évidemment quantiques. Il devait aboutir à une identification partielle des objets de la cosmologie et de la physique subatomique.

Aux premières phases de l’évolution de l’Univers, qui sont celles de la cosmogénèse, l’échelle des énergies élevées et des très petites dimensions spatiales coïncide avec les conditions physiques dont les physiciens nucléaire et des particules font l’objet de leurs recherches. Les théories récentes d’unification des champs d’interaction offrent même aujourd’hui aux physiciens des particules élémentaires la possibilité de trouver dans certains objets et événements cosmiques remarquables (objets denses, processus violents), mais aussi dans l’observation lointaine dans la distance, c’est-à-dire dans le temps, des données qui aident à résoudre leurs questions théoriques. En particulier, les symétries de la matière sont de plus en plus exactes pour les champs d’interaction et leur traitement unifié quand on remonte le temps de la cosmogénèse; on les voit se briser

au contraire, quand on descend son cours, engendrant la différenciation des champs et les masses des particules, causes lointaines, au fur et à mesure de l'expansion de l'Univers, des formes d'organisation ultérieures qui nous sont plus familières, les galaxies, la matière des étoiles, les objets cosmiques...

L'identification, par la cosmologie et par la théorie quantique de la matière, de leurs objets propres dans leurs régions asymptotiques respectives, est illustrée et justifiée par les échelles des grandeurs élémentaires qui les caractérisent, et par les correspondances, sur ces échelles, entre les conditions physiques de la matière élémentaire et celles de l'Univers aux premiers instants de son déploiement: température, densité, énergie, distance, relatives aux propriétés de la matière et du rayonnement, dans le domaine de la physique quantique. Il y correspond une échelle des temps qui représente les âges de l'Univers dans ces conditions, et qui dépend des modèles théoriques choisis, modèles d'univers d'une part, modèles théoriques de la matière "élémentaire" dans ces conditions de densité et de température, qui renvoient aux théories des champs fondamentaux, d'autre part.

Une telle échelle de correspondance des grandeurs physiques a évidemment un sens en raison de l'unicité de l'objet de la physique, de l'identité de la matière de l'Univers et de celle des particules. Largement démontrée dans le domaine observable, cette identité continue d'être postulée, pour les régions hors d'atteinte, asymptotiques, car elle est une condition de cohérence de la pensée physique de la cosmologie.

Cette unicité et cette identité constituent en fait la première condition de possibilité de la rencontre entre des disciplines aussi différentes que l'astrophysique et la physique subatomique (nucléaire et des particules), tant par les méthodes que par les thèmes de recherche. Une autre condition, servant de cadre à la rencontre, réside dans le fait que l'Univers a une "histoire" qui se déroule au long du temps.

La voie de la constitution de la matière

La connaissance de la constitution de la matière du cosmos, qui constitue la seconde voie du rapprochement entre la cosmologie et la matière quantique, commença avec la spectrométrie stellaire (Fraunhoffer) qui ouvrit au siècle dernier l'astrophysique, dont l'objet était de déterminer la nature et les abondances des éléments chimiques constituant les étoiles. Elle connut un tour décisif avec les observations de Edmund Hubble et la formulation de la loi de ré-

cession des galaxies, qui inaugura la *cosmologie expérimentale* (ou faut-il dire seulement *observationnelle*)²⁰

Le spectre qui se déplace vers le rouge est bien celui des éléments qui constituent la matière dont sont faites les galaxies. Ces spectres, la physique avait déjà établi leur nature quantique, et la théorie quantique se trouvait alors dans une phase décisive de son élaboration. A partir du moment où la cosmologie était *physique*, et non pas seulement *mathématique* (comme on distingue astronomie physique et astronomie mathématique), elle portait en elle la question de la matière et de sa structure, et donc de la matière quantique au niveau de l'Univers lui-même. C'est précisément cette question que la suite du développement de la cosmologie allait rendre explicite jusqu'à ses ultimes conséquences.

Entretemps s'était développée l'idée d'une formation naturelle, par synthèse, des éléments chimiques. On doit à N. Lockyer, dès 1890, la première suggestion d'une genèse des éléments qui serait liée à l'évolution stellaire. Quelque temps après, la relation masse-énergie de la relativité restreinte fit imaginer à un Paul Langevin l'idée d'une constitution des différents atomes par fusion à partir d'atomes d'hydrogène²¹, et la nucléosynthèse des atomes dans les étoiles fut formulée à titre d'hypothèse avant de se voir confirmée²².

L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître (1931), pensée à l'image de l'atome radioactif, extrapolé à l'Univers, constituait un modèle grossier et peu vraisemblable, correspondant plutôt à une idée générale, à une analogie difficilement justifiable en rigueur, mais qui fut inspiratrice²³. Elle avait, en effet, cette vertu d'indiquer, malgré son invraisemblance et de manière encore lointaine, une direction de pensée qui s'avèrerait naturelle et féconde, quand l'analogie vague laisserait la place à une possibilité théorique précise. Cette direction était celle d'une connexion nécessaire, au point de fuite originaire de l'expansion de l'Univers, de la cosmologie avec la structure atomique et quantique de la matière. L'Univers-atome de Lemaître n'était plus inaltérable comme l'avaient été chacun de leur côté, dans les conceptions encore récentes, respectivement l'Univers et l'atome. Il était susceptible de transformations "spontanées" avec le temps, que Lemaître concevait sur le mode de la décomposition de l'atome radioactif.

20 Cf. Hubble [1936], Eddington [1933].

21 Langevin [1913].

22 En 1939, Hans Bethe proposait sa théorie du cycle de la fusion, dans les étoiles, de l'hydrogène en hélium, accompagnée de la production de neutrinos, aboutissant à la synthèse du carbone.

23 Voir Lemaître [1946].

Avec la théorie de George Gamow, de l'Univers considéré comme un "corps noir" (c'est-à-dire un four chauffé en équilibre thermique), le modèle devenait plus consistant et vraisemblable. Il évitait l'image originelle simplement métaphorique d'un Univers-particule en considérant l'Univers dans ces instants primordiaux comme l'état d'un *système physique* d'un genre connu, correspondant à des phénomènes que l'on savait décrire théoriquement, et dont on pouvait calculer les paramètres en fonction de données pensées comme observables. Au surplus, ce genre de système physique, un corps noir rayonnant à l'équilibre, avait constitué l'archétype même de la matière quantique dans ses premières manifestations connues (il avait suscité l'hypothèse du quantum d'action de Planck²⁴). Il mettait en jeu des atomes ordinaires et du rayonnement électromagnétique, dont les propriétés étaient désormais bien établies par la physique quantique.

Les observations astronomiques qui le confirmèrent ou plutôt, historiquement parlant, qui permirent de le retrouver (puisque A. Penzias et R. Wilson firent leur observation fortuitement avant de connaître la prédiction que Gamow avait faite), portaient précisément sur de tels objets: le rayonnement électromagnétique fossile de longueur d'onde centimétrique (caractéristique d'un *corps noir* refroidi à la température de 2,7 K) auquel s'ajoutait l'abondance de l'hélium synthétisé dans l'univers primordial. Ces données se rapportent depuis lors à deux des problèmes les plus importants de la cosmologie observationnelle²⁵. Le rayonnement, aujourd'hui fossile, fut produit dans un état d'équilibre avec les atomes (principalement d'hydrogène et d'hélium) qui se constituèrent alors (vers un temps cosmologique de trois minutes²⁶), à partir des noyaux et d'électrons. Sa longueur d'onde diminua à mesure que le rayonnement se diluait et se refroidissait dans l'Univers en expansion.

Plus récemment, les constituants élémentaires de la matière (ceux qui sont connus aussi bien que d'autres encore hypothétiques) se sont vus mobilisés, soit pour servir de témoins éventuels (fossiles) des processus primordiaux (comme les neutrinos très lents du fond du ciel, qui sont la contrepartie du rayonnement radio centimétrique²⁷, ou d'hypothétiques monopoles magnétiques lourds²⁸), soit pour accompagner les processus ordinaires des corps qu'étudie l'astrophysique (particules de haute énergie émises dans les supernovæ, rayons

24 Formulée en 1900.

25 Tels qu'ils sont inventoriés par exemple dans *Physical Cosmology* de P.J.E. Peebles (Peebles [1971]).

26 Weinberg [1977].

27 Voir Paty [1995].

28 Dirac [1978] (en partic. la conférence sur "Magnetic monopoles"); Musset [1986].

cosmiques, etc.), soit encore pour rendre compte de la “masse manquante” de l’Univers, qui constitue actuellement l’un des principaux problèmes de la cosmologie observationnelle (neutrinos massifs, diverses formes de matière noire...) ²⁹ Sans compter d’autres effets, comme la dissymétrie observée matière-antimatière, qui a une contrepartie théorique dans les processus dynamiques initiaux de l’expansion de l’Univers ³⁰. En retour, des constatations inexplicables classiquement, comme la très grande isotropie du rayonnement fossile du fond du ciel, trouvent une explication dans certains modèles hypothétiques de la théorie des interactions des particules et des champs fondamentaux, comme le modèle “inflationnaire” ³¹

L’Univers primordial comme laboratoire virtuel

A ce niveau où les particules et les champs quantiques rejoignent la cosmologie pour former cette nouvelle discipline mixte de la physique, intermédiaire entre les deux, qu’on appelle parfois l’“astroparticule”, les deux voies distinctes d’approche que nous avons décelées se retrouvent encore: les lois générales de la physique se confondent avec les lois de symétrie des champs dont les particules de la matière quantique sont la source, et d’ailleurs les champs et leurs sources tendent aussi, asymptotiquement, à s’indifférencier ³²

Dans cet état extrême de la coïncidence de leurs objets, la cosmologie et la physique subatomique se prêtent un secours mutuel, la seconde offrant à la première ses principes de symétrie qui entraînent des conséquences sur le cours ultérieur de l’expansion de l’univers et la formation de ses constituants (galaxies, etc.) à l’ère de la gravitation classique (que l’on pourrait appeler de la *cosmologie lente*), et la première s’offrant à elle comme un laboratoire naturel. Un laboratoire qui n’est pas d’accès direct, est-il besoin de préciser. Car tous les processus qui ont pu se succéder dans la phase primordiale de l’Univers ont été effacés par les suivants, jusqu’au dernier “lessivage” par le couplage de la ma-

²⁹ Lachièze-Rey [1990].

³⁰ Cf., p. ex., Bouquet [1990]. Les premières idées théoriques sur ce sujet remontent à un travail de Andréï Sakharov paru en 1967 (voir Sakharov [1984], article 7: “Violation de l’invariance CP, asymétrie C et asymétrie baryonique de l’Univers”, p. 95-8; voir aussi les articles 8 à 12 de cette collection).

³¹ Linde [1984], Nanopoulos [1990].

³² Dans les théories de supersymétrie.

tière atomique et du rayonnement. Mais cela n'interdit pas de tenter de les reconstituer d'une manière hypothético-déductive, ces états pouvant entraîner certaines conséquences susceptibles d'être constatées sur le long terme, comme des contraintes sur des paramètres tels que la proportion relative d'antimatière³³ ou l'existence de phénomènes comme... la formation de galaxies.

Toutefois, en étant ce "laboratoire" originel de la physique des particules et des champs, la cosmologie déborde la physique au sens habituel, faisant acquérir à celle-ci des traits qui ne lui appartenaient pas traditionnellement, tels que: unicité de l'objet, non reproductibilité de son évolution temporelle, irréversibilité de la succession de transitions de phase qui caractérise cette dernière, etc.

Les théories de "Grande unification" qui imposent la considération d'énergies asymptotiques et une échelle des énergies, des distances et des temps correspondant à celle de l'univers dans les conditions de ses premiers instants, se sont imposées comme objet de recherche à la fois par leurs implications en physique des particules et par leurs conséquences en cosmologie: cette conjonction constitue un fait nouveau en physique. Ces théories sont relatives à ces deux domaines (ou ces deux sciences), et présentent corrélativement des traits différents de ceux des théories habituellement considérées en physique des particules.

En s'incorporant les théories de jauge unifiées, la cosmologie entre, à un certain stade de ses conditions, celles de l'univers primordial, dans le cadre des concepts et de la théorie quantique. En particulier, la signification d'une quantification de la gravitation, d'une unification de la mécanique quantique et de la relativité générale, prend ici toute sa force. Elle est exigée par une simple considération temporelle: celle des instants de l'univers qui précèdent la valeur du temps de Planck ($t < 10^{-43}$ seconde), et dont les conditions physiques de densité d'énergie correspondent à la convergence des champs d'interaction de jauge subatomiques et du champ de gravitation. Du point de vue théorique, la gravitation quantique représente l'un des enjeux les plus importants de la cosmologie se constituant comme théorie fondamentale: cette perspective est peut-être ce qui légitime le mieux l'ambition de faire de la cosmologie une *théorie* fondamentale, contournant par là-même les difficultés épistémologiques (comme la place de l'observateur, etc.) considérées *a priori*.

33 N_B et $N_{\bar{B}}$ étant respectivement le nombre de baryons (généralisation du proton et du neutron) et d'antibaryons dans l'Univers, et N_γ le nombre de photons du rayonnement fossile, le rapport $\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma}$ observé est égal à 10^{-9} .

Quant à la physique nucléaire et des particules, elle fournit aux astrophysiciens et aux cosmologues la description de processus fondamentaux dans un domaine, d'ailleurs inédit, qui permet de comprendre la structure de certains objets de l'Univers (considérons seulement les plasmas de quarks et de gluons des étoiles denses, ou les incidences de la physique des neutrinos sur l'astronomie) et celle de l'Univers primordial même.

La cosmologie des premiers instants de l'Univers d'une part et la physique de la matière nucléaire, des particules et des champs d'autre part, se fournissent mutuellement, avec leurs données respectives, des contraintes à respecter, permettant de mieux resserrer le filet des théories acceptables, des "modèles standards" de l'une et de l'autre (la théorie du "Big-bang" d'un côté, les théories de jauge électrofaible et chromodynamique pour les leptons et les quarks de l'autre). Elles se fournissent également des objets de recherche du point de vue expérimental, comme celle de particules ayant éventuellement joué un rôle fondamental au moment du découplage des champs d'interaction, ou de la formation de "germes" de structures qui ont ensuite donné les galaxies.

Cette convergence n'a fait que se renforcer depuis ses premières esquisses dans les années 70, et le *modèle standard* des cosmologues et des physiciens est désormais la juxtaposition de celui des champs à symétrie de jauge unifiés de la physique subatomique et celui du "big bang" de la cosmologie.

L'indifférenciation des indiscernables

Est-il possible d'éclairer davantage les convergences factuelles et théoriques dont nous venons de parler, par une réflexion portant sur certains éléments conceptuels particulièrement adaptés à ces recouvrements de descriptions d'objets? L'on pourrait, par exemple, examiner l'idée suivante: *l'unité* et la *singularité* (ou *l'unicité*) de l'objet Univers, qui s'oppose à la multiplicité, à la diversité et à l'hétérogénéité des objets qu'il contient, dans le stade de son *évolution lente*, gouvernée par le champ d'interaction gravitationnel, retrouve, au stade de son *évolution rapide* (on entend ici *lent* et *rapide* selon l'échelle des temps de la cosmologie), une matière élémentaire mais caractérisée aussi par *l'unité* et, dans une mesure que nous allons préciser, par *l'indifférenciation*, propres à une *étoffe cosmique*.

Cette indifférenciation prend en premier lieu la forme de *l'indiscernabilité des particules quantiques identiques* (formulée dès les années 1925-1926), qui montre la matière quantique non pas sous la forme de particules individuelles toujours identifiables, mais sous celle de particules, toujours individuelles, certes³⁴ mais caractérisées seulement par un genre et *non discernables au sein de ce genre*.

On ne considère plus un électron, par exemple, comme s'il était identifiable de manière singulière, par exemple numérotable, au sein d'une collection de particules semblables, mais on doit le concevoir comme identique en tout point aux autres électrons, *indistinct d'eux*. (En corollaire, pour des raisons sur lesquelles nous allons revenir, un électron n'est pas superposable à un autre dans le même état quantique au sein d'un système physique, ce qui constitue le *principe d'exclusion de Pauli*³⁵). Tout électron est absolument semblable à tout autre, autant dire que ces particules représentent des "clones" parfaits³⁶. Et de même pour les autres genres de particules: chaque particule quantique est un exemplaire *individué*, mais *non identifiable* par rapport à un autre du genre auquel il appartient.

Les particules de la matière quantique sont ainsi réparties en espèces ou genres: atome d'hydrogène, électron, neutrino, proton, méson pi, etc., et ces "genres" les caractérisent complètement. Une *particule quantique* est donc décrite complètement par son *genre*, et un système de telles particules est complètement représenté par l'ensemble des états quantiques que ces particules peuvent occuper: ainsi se répartissent les électrons d'un atome selon les états possibles des divers niveaux déterminés par les nombres quantiques atomiques³⁷

Se référant à l'indiscernabilité, Hans Reichenbach proposa le terme de "*génidentité*" des particules quantiques³⁸. Cet état de choses réduit déjà de manière considérable le nombre des éléments individué et distincts qui constituent la matière. On rencontre déjà en physique classique une situation analogue, *jusqu'à un certain point*, puisque c'est en supposant que des particules d'une classe donnée sont identiques que l'on peut traiter une collection d'un grand nombre de ces objets par la mécanique statistique. Cette dernière, cependant, ne postule rien sur la *nature* de tels objets: c'est par une hypothèse sciemment simplifica-

34 La question du caractère individuel ou non des particules selon la mécanique quantique, encore discutée des années 30 aux années 60, est désormais clarifiée par la possibilité de construire des faisceau de particules (électrons, neutrons, photons, etc.) très peu intenses et de structure temporelle très bien définie, de sorte que l'on soit assuré que, durant une durée contrôlable (p. ex. 10^{-11} sec), une unique particule quantique traverse l'instrument d'analyse sans qu'il soit besoin de la détecter et donc de la perturber en lui faisant perdre son aspect corpusculaire.

35 Pauli [1925].

36 Bien entendu, les particules quantiques élémentaires ne gardent pas la mémoire de leur histoire individuelle, ce trait n'étant d'ailleurs pas propre aux seuls objets quantiques, mais étant commun à tout objet décrit par une physique réversible.

37 A savoir le nombre quantique principal, n , qui caractérise la couche d'énergie, les nombres quantiques l , m et s , liés respectivement au moment cinétique, au moment magnétique et au spin.

38 Reichenbach [1956].

trice qu'elle les prend identiques et, en fait, discernables, qu'il s'agisse des particules d'un gaz ou des étoiles d'une nébuleuse. Elles sont dans une relation d'équivalence qui n'est qu'un choix de commodité, moyennant l'absence acceptée de certaines informations sur elles.

Comme elle ne se prononce pas sur leur nature, la mécanique statistique continue d'attribuer à de tels objets une individualité, dont rend compte le traitement statistique classique, avec l'*interprétation subjectiviste* correspondante: le caractère statistique signale une *ignorance*, celle, ici, de la *différence* d'identité entre les particules considérées comme identiques en pratique. Ludwig Boltzmann répartissait les particules d'un gaz dans des cellules d'occupation, en les comptant individuellement comme si chacune d'elle possédait, en plus de sa caractérisation de genre (atome de telle sorte, molécule monoatomique ou autre), *une identité propre* par laquelle elle se distingue de ses semblables.

La modification du traitement simplement statistique opérée par la physique quantique, par l'imposition de contraintes supplémentaires, revient, en fait, à se prononcer *sur la nature* des particules considérées, en n'attribuant plus leur équivalence théorique à une simplification ou à une ignorance, mais à un caractère physique. Elle a pour effet de réduire considérablement, pour un système de particules identiques, le nombre de ses états possibles. Soit un système ($\mathcal{S}$) constitué d'un certain nombre (N) de telles particules (P) se trouvant dans un même état (décrit par une fonction d'état ψ et des grandeurs physiques $\mathcal{A}$). Un échange (ou permutation) de deux particules (P_i et P_j) identiques mais discernables (cas de la physique classique) transforme l'état ψ en un autre état, différent, ψ' . Une permutation de deux particules (P_i et P_j) identiques mais indiscernables absolument, *par nature* (cas de la physique quantique), transforme le système en son image, qui peut correspondre soit au même système représenté par la même fonction ψ (symétrie), soit à son opposé, c'est-à-dire à la fonction $-\psi$ (antisymétrie). La transformation correspond à une loi de symétrie particulière pour le système et sa fonction d'onde, appelée loi de "spin-statistique": l'antisymétrie vaut pour les systèmes de fermions (de spin ou moment angulaire intrinsèque demi-entier), tandis que la symétrie vaut pour les systèmes de bosons (de spin nul ou entier)³⁹

Cette propriété des indiscernables implique une modification du traitement statistique, et donc l'abandon de la mécanique statistique proprement dite.

39 Le spin des particules quantiques est en réalité exprimé en unités de $\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$

La statistique de Fermi-Dirac dans le premier cas, celle de Bose-Einstein dans le second, ne correspondent pas seulement à une modification de la *statistique*, dans le sens habituel du mot, mais à un changement de la *théorie* elle-même décrivant l'état physique du système par la fonction ψ , avec les grandeurs qui lui sont associées. Ce changement est celui opéré par la théorie quantique.

Nous ne discuterons pas ici de la modification subie, ce faisant, par la notion de probabilité, qui ne correspond plus à la définition de la mécanique statistique⁴⁰. Nous voulons seulement insister sur ce qu'a de spécifique le type nouveau d'équivalence d'objets identiques exprimé par le concept d'*indiscernabilité*, ou de *génidentité*, des *particules quantiques*. C'est, en quelque sorte, une *indiscernabilité de nature*, et non plus d'ignorance; en supprimant l'identité propre à des individus même semblables qui subsistait en physique classique, elle entraîne un comportement statistique différent, première manifestation profonde de la spécificité quantique ou, si l'on veut, symptôme de l'accès au niveau quantique de la matière, qui peut être conçu comme un monde d'*objets* quantiques ayant cette propriété.

Il est possible de revoir sous cet angle tout le parcours de l'élaboration de la physique quantique depuis les travaux de Planck de 1900 jusqu'à son aboutissement avec la mécanique quantique dans les années 1926-1927. L'indiscernabilité des particules quantiques se trouve, de fait, au fondement même de la théorie quantique dès ses débuts, dans le travail de Max Planck sur le rayonnement du corps noir où, en partant de la mécanique statistique, s'inspirant de la physique des gaz de Boltzmann, il calculait la répartition des fréquences de rayonnement dans des cellules d'énergie d'un résonateur⁴¹. En éliminant de manière systématique certaines configurations pour obtenir un nombre discret d'états concordant avec la distribution observée de fréquences, Planck modifiait sans le savoir le comptage statistique à la Boltzmann pour des éléments discernables en un comptage statistique *pour des éléments indiscernables*, comme Einstein s'en aperçut en 1925 à la suite du travail de Bose sur le rayonnement et du sien propre sur les gaz monoatomiques⁴².

La statistique de Bose-Einstein, valable pour le rayonnement électromagnétique (gaz de photons) comme pour des gaz d'atomes de spin entier, ap-

40 Paty [1988], chap. 5; [1990c], [à paraître, a], [à paraître, b].

41 Voir Kastler [1981], Darrigol [1988].

42 Bose [1924], Einstein [1924, 1925a et b]. Einstein, lettre à Erwin Schrödinger du 28.2.1925 (Archives Einstein). Cf. Paty [à paraître, a].

parut liée à la notion d'onde de matière développée par Louis de Broglie⁴³. Elle permettait de concevoir l'accumulation de particules de rayonnement (photons) ou d'atomes d'une certaine espèce (bosons) totalement indiscernables dans un même état: d'où résultent respectivement l'émission stimulée de rayonnement par transition entre des niveaux atomiques⁴⁴ (et ses conséquences à terme, le pompage optique et l'effet laser⁴⁵), aussi bien que la condensation de Bose-Einstein⁴⁶. Quant à la statistique de Fermi-Dirac, elle donnait immédiatement l'explication théorique du principe d'exclusion de Pauli⁴⁷, rendant ainsi naturellement compte de la classification périodique des éléments chimiques.

La "génidentité" ou le sens physique d'un concept théorique

La "génidentité" des particules (ou des états) quantiques indiscernables est caractérisée exclusivement par les valeurs des grandeurs physiques de masse, de spin, de charge, etc., qui sont les grandeurs quantiques déterminant cet état. C'est l'état qui définit l'identité, quelque soit le nombre des "individus", qui continuent par ailleurs d'être pensables individuellement, dans le sens d'être dénombrables: en effet, pour un système de particules données, le nombre de ces particules est une grandeur physique au sens de la mécanique quantique (*valeur propre d'un opérateur*)⁴⁸

43 de Broglie [1924]. Einstein fit le rapprochement dès qu'il eut connaissance de la thèse de Louis de Broglie, que lui communiqua Paul Langevin. Cf. Einstein [1925a et b], et Albert Einstein, lettre à Paul Langevin, 16.12.1924, *in*. L. Langevin [1972].

44 Einstein [1916a].

45 Cf., p. ex., Kastler [1973].

46 Phénomène prédit dès 1925 (Einstein [1925], Griffin, Snoke & Stringari [1995]), observé en 1995 seulement à des températures extraordinairement basses: des dizaines de milliers d'atomes d'hélium liquide à l'état d'énergie "du point zéro" se condensent par transition de phase en un superatome unique qui se comporte comme un fluide parfait, homogène et occupant tout l'espace qui se présente à lui (Cornell & Wieman [1998]).

47 Paty [1988], chap 6; [1993b] et [à paraître, a]; Amaldi [1987]; Darrigol [1990]. L'antisymétrie de la fonction d'état d'un système de fermions identiques (par exemple, des électrons) qui se trouveraient dans le même état quantique entraîne que cette fonction soit nulle pour une permutation de deux de ces particules: il s'ensuit que deux particules identiques ne peuvent occuper le même état quantique dans un système donné (p. ex., au niveau atomique, où chaque état ne peut être occupé que par un seul électron).

48 En théorie quantique des champs, la définition des états comporte celle d'opérateurs de création et de destruction de particules, pour rendre compte des transformations entre particules dans les interactions, ce qui implique la possibilité de les compter.

L'absence d'identité propre pour des particules indiscernables peut être énoncée comme une propriété d'*existence* de nature à la fois formelle et empirique. Dans ce sens, Paul Langevin appelait à reconsidérer notre manière commune de concevoir la notion de particule⁴⁹, en supprimant la notion d'identité individuelle au niveau quantique. On peut interpréter ainsi de manière objective la "génidentité" par laquelle Hans Reichenbach désignait la restriction de l'identité des particules quantiques à leurs seuls caractères génériques lorsqu'on les décrit dans l'ordre temporel. Ce n'était pas ainsi, cependant, qu'il la concevait lui-même: il la voyait non pas comme l'expression d'une propriété matérielle, mais comme fonctionnelle, c'est-à-dire formelle⁵⁰. Cependant, la juxtaposition du formel et de l'empirique, caractéristique de l'empirisme logique de Reichenbach, ne fait pas de place à la théorie physique considérée en elle-même, comme une instance *sui generis*, une construction conceptuelle où s'imbriquent le *donné empirique* de l'expérience et le *formel mathématique constitutif* de la formulation des concepts comme grandeurs physiques⁵¹.

Or, l'indiscernabilité, ou la génidentité, apparaît comme parfaitement ajustée à la conception d'une théorie qui définit par elle-même ses propres concepts, sans supplément externe de justification ou d'interprétation. Nous pouvons y voir l'indice du passage à une objectivation plus grande de la théorie physique: les particules quantiques ne possèdent *que* la caractérisation que la théorie leur donne, et ne peuvent être pensées en dehors de cette dernière. Au contraire, des particules classiques peuvent être vues comme différentes même si elles restent parfaitement semblables dans leur traitement théorique. C'est là un trait que l'on peut retrouver d'une manière générale avec les autres contenus conceptuels de la physique quantique, comme ceux que nous évoquerons plus loin, la non-séparabilité locale et la définition des propriétés des genres de particules par les groupes de symétrie.

Cette considération revient à l'adoption d'une position minimale du point de vue théorique et méta-théorique, avant toute autre considération ou tentative d'interprétation. Les éléments conceptuels dont nous disposons théoriquement pour décrire de tels "objets" se ramènent aux seules grandeurs qui les désignent effectivement, définies dans la théorie (masse, spin, charge, autres nombres quantiques, etc.). Ces objets sont donc, selon la description quantique,

49 Langevin [1933]. Cf. Paty [1988], Chap. 6.

50 Reichenbach [1956].

51 Paty [1989], [1993a], Chap. 7.

strictement équivalents, même si l'on peut les dénombrer (par exemple, tant de photons dans tel état défini): telle est exactement l'indiscernabilité, avérée par les phénomènes et dont la théorie (la mécanique quantique) rend parfaitement compte, donnant l'explication des propriétés du rayonnement du corps noir, de celles des gaz monoatomiques avec la statistique de Bose-Einstein, du principe d'exclusion de Pauli par la statistique de Fermi-Dirac, de la condensation de Bose-Einstein en physique atomique, et de multiples traits également constatés en physique subatomique.

Cette propriété est désormais si fondamentale qu'elle est inscrite dans le cadre conceptuel général de la physique quantique. Sa puissance est remarquable par ses implications phénoménologiques et théoriques dans des domaines variés. Telle, en astronomie, l'explication théorique de l'existence d'objets célestes comme les *naines blanches* ou les *étoiles à neutrons*, qui sont respectivement un gaz d'électrons complètement dégénéré⁵² et un gaz de neutrons également dégénéré, dans lesquels seule la pression de dégénérescence due au principe d'exclusion fait équilibre à celle due à l'attraction gravitationnelle, empêchant l'effondrement sur elles-mêmes de ces étoiles dont le carburant nucléaire est épuisé.

Vertus heuristique et épistémologique de l'indiscernabilité

En ce qui concerne les implications de l'indiscernabilité sur la théorie fondamentale des particules, la plus caractéristique est peut-être la formulation du concept de "*couleur*" des quarks, devenu la grandeur représentant la charge spécifique du champ d'interaction forte, formulé par la suite en *chromodynamique quantique*. La représentation en termes des quarks *u* et *d* des *baryons non étranges* (famille dont font partie les nucléons, proton et neutron, constitués respectivement comme *uud* et *udd*) donnait, pour la particule-résonance Δ^{++} une combinaison de trois quarks identiques *u* dans le même état⁵³. Les quarks étant des

52 Sur les naines blanches, cf. déjà Eddington [1925]. Un système se trouve dans un état "dégénéré" lorsqu'il n'a plus de structure propre et que tous ses constituants élémentaires se trouvent dans des états quantiques semblables.

53 Il faut trois quarks *u* (de charge électrique $+\frac{2}{3}e$) pour former un baryon de charge $+2$. Le spin d'un quark *u* étant $+\frac{1}{2}\hbar$, les spins des trois doivent être alignés (et les quarks doivent donc se trouver dans le même état) pour former le spin $+\frac{3}{2}\hbar$ de la particule Δ^{++} . Au sein du proton et du neutron, au contraire, les deux quarks identiques *uu* et *dd* sont dans des états de spin antiparallèle, donc différents.

fermions⁵⁴, la cohérence théorique soit interdisait un tel état (par le principe d'exclusion), soit obligeait à concevoir une grandeur spécifique par laquelle trois quarks identiques dans un même état peuvent être distingués⁵⁵: une grandeur pouvant donc prendre trois valeurs. Cette grandeur à trois indices, dénommée "couleur", servait à caractériser les quarks dans le champ d'interaction forte qui les lie entre eux, mais n'apparaissait pas en dehors de la portée de ce champ.

On supposa donc que les quarks physiques sont des *superpositions (linéaires) neutres de quarks de couleur*, et qu'ils échangent cette couleur dans leurs interactions fortes entre eux, par l'intermédiaire de bosons d'échange, les gluons⁵⁶: ce qui permettait du même coup de formuler et le *champ d'interaction forte*, devenu désormais le "champ de couleur" de la "chromodynamique" et le "*confinement des quarks*" au sein de la matière nucléaire⁵⁷. Nous disons bien: de *formuler*, mais non pas encore d'*expliquer*: le problème du confinement des quarks, par exemple, en devenant "confinement de la couleur", restait entier. Cependant, telle fut la force heuristique de l'hypothèse tirée de l'indiscernabilité, que cette formulation particulière ouvrait la voie à un développement théorique d'une fécondité considérable en termes de *théorie quantique des champs*, celui de la "chromodynamique quantique"

Les développements récents de la physique reliés à l'indiscernabilité possèdent aussi une vertu épistémologique, en nous faisant mieux comprendre le caractère objectif de cette propriété générale des systèmes quantiques, comme on l'a indiqué plus haut⁵⁸. Tout comme le concept de champ (au sens classique) s'est avéré se suffire à lui-même, avec la théorie de la relativité d'Einstein, sans support du type d'un éther mécanique, de même celui de quanton (ou de système quantique, ou de champ quantifié), caractérisé notamment par l'indiscernabilité des particules identiques, est lui aussi autosuffisant, sans substance

54 Leur spin est $\frac{1}{2} \hbar$.

55 Les quarks u doivent avoir leurs spins $\frac{1}{2}$ alignés (et donc se trouver dans le même état pour former le spin $\frac{3}{2}$ de la particule Δ^{++} . Dans le proton et le neutron, au contraire, les deux quarks identiques uu et dd sont dans des états de spin antiparallèle, donc différents.

56 Les gluons g_{ij} , porteurs de deux charges de couleur (i et j) échangées entre deux quarks q_i et q_j .

57 Les quarks ne se manifestent pas directement à l'état libre en dehors de la matière nucléaire "naturelle" que sont les particules "hadroniques" (à interaction forte), mésons et baryons. Ils peuvent cependant être déconfinés dans certains états de densité d'énergie très élevée de la matière (plasmas de quarks et de gluons, réalisés dans des collisions d'ions lourds et probablement dans l'une des phases de l'Univers primordial).

58 Cet argument est développé par ailleurs (Paty [à paraître, c]).

discernable, ondulatoire ou corpusculaire, sous-jacente, sans projection ou réduction sur des concepts extérieurs à la théorie. Rien ne justifie physiquement de tels concepts, qui sont donc inutiles du point de vue fondamental pour la théorie considérée.

Ces remarques concernent, d'une manière générale, la description quantique en tant que cadre conceptuel pour la représentation théorique d'objets. Elles s'appliquent dans des termes presque identiques à d'autres propriétés quantiques spécifiques, en rupture avec les propriétés des objets classiques, en particulier à la *non-séparabilité quantique*⁵⁹. Ce n'est pas le lieu ici d'y revenir, et nous nous contenterons de la rattacher à ce qui précède sur l'indiscernabilité, sous le point de vue particulier suivant: la *non-séparabilité locale*, propriété également caractéristique des systèmes de particules quantiques, peut être aussi vue comme participant de l'indifférenciation, puisque la localisation, devenue relative, ne permet pas de penser ou décrire une particule (un quanton) séparément d'une autre quand elles appartiennent à un ensemble corrélé au sens quantique (ce qu'exprime la proposition que "les quantons sont des systèmes étendus")⁶⁰.

L'indifférenciation par les symétries

L'indifférenciation entre les objets quantiques se poursuit, en considérant cette fois les genres, avec les *symétries des particules élémentaires*, qui identifient à un seul *genre* (qu'on pourrait appeler "genre d'ordre supérieur"⁶¹) toute une famille d'états (un multiplet) caractérisée par des nombres quantiques communs sauf un, ne différant par exemple que par la charge électrique: tels le *nucléon* (p , n), ou le *méson* π (+, 0, -), ou d'autres encore, dont les divers états de charge sont équivalents (leurs propriétés sont identiques) selon l'invariance des transformations du groupe de l'isospin ($SU(2)$); sous le groupe de symétrie unitaire $SU(3)$, l'équivalence a lieu pour les différents états du spin unitaire (combinant l'isospin et l'étrangeté ou l'hypercharge), et ainsi de suite pour les groupes d'invariance liés aux différentes *savours*, rapportées en dernière instance aux saveurs

59 Paty [1988], chap. 6, [1987].

60 On peut rapporter aussi la non-séparabilité locale à une perspective cosmologique au sens large en y voyant la marque d'une totalité insécable de la réalité matérielle (Bohm [1980]).

61 L'appellation n'est pas nomenclaturée, et je la propose donc sous toutes réserves. On pourrait spécifier: non plus, par exemple, "genre proton" (ou méson π^+), mais "genre nucléon" (ou méson pseudoscalaire) du groupe de l'isospin, de symétrie unitaire, etc. (voir plus bas).

des quarks constituant des particules hadroniques, en considérant les membres d'un même multiplet de cette grandeur (jusqu'à $SU(6)$, pour six saveurs).

Les groupes de transformation des grandeurs identificatrices que sont les *saveurs* (des quarks) opèrent ainsi une réduction à chaque pas plus poussée des genres de particules distincts. Ces genres eux-mêmes, pour ce qui est des particules hadroniques, se ramènent à des combinaisons de six *quarks de saveur* (les fermions fondamentaux), distincts les uns des autres par cette grandeur appelée "saveur" qui comprend six variétés⁶², chacun d'eux étant soumis d'autre part à un autre groupe d'invariance, celui de la *couleur* ($SU(3)_c$). L'ensemble des genres de particules fondamentales de type fermion sont alors ramenés à 6 quarks (de saveur) et 6 leptons (les leptons chargés, *électron*, *muon*, *taupon*, et leurs *neutrinos* correspondants)⁶³ et aux bosons, quanta des champs d'interaction entre ces "briques fondamentales" (briques quantiques, est-il nécessaire de le rappeler).

Dans les théories "de grande unification" (*GUT*) qui se proposent de traiter dans un seul schème et selon une invariance ou symétrie supérieure les trois champs d'interaction de la physique subatomique (*électromagnétique et faible unifiés en électrofaible*, et *chromodynamique*), les leptons et les quarks sont mêlés, les particules fondamentales ramenées à un seul genre, celui de fermion de spin $\frac{1}{2}$, source du champ indifférencié de grande unification. Au-delà, une symétrie d'un ordre plus élevé est proposée pour rendre indistincts les fermions et les bosons: c'est la supersymétrie⁶⁴

Il n'est pas excessif de voir dans ce mouvement de constitution de dynamiques répondant à des symétries de plus en plus puissantes, par delà l'*indiscernabilité* comme *propriété structurelle de toutes les espèces d'objets quantiques*, une tendance à faire des objets de ces dynamiques que sont les particules élémentaires

62 Les grandeurs isospin I , 3^e composante d'isospin ou état de charge I_3 , étrangeté S , charme C , beauté (ou fond, *bottom*), B , vérité (*truth* ou sommet, *top*) T . Par-delà les dénominations fantaisistes des diverses saveurs, restent les désignations symboliques, plus neutres, des grandeurs correspondantes (I, I_3, S, C, B, T).

63 Les "charges leptoniques" qui distinguent ces genres de leptons sont l'équivalent des "saveurs" des quarks. Les doublets de leptons peuvent être associés aux doublets de quarks correspondants en raison de la similitude de leurs interactions selon le champ électrofaible: (e, ν_e et u, d ; μ, ν_μ et s, c ; t, ν_τ et b, t). Cette structure des fermions élémentaires en trois familles dont le couplage aux champs d'interaction est universel est probablement due à une propriété fondamentale sous-jacente encore inconnue. Le nombre de ces familles est limité par certaines contraintes à trois: tous les quarks et les leptons sont désormais connus.

64 Fayet [1985].

res de la matière, *des éléments de plus en plus indifférenciés*. Cette indifférenciation croissante se révèle à la faveur de la montée vers les énergies asymptotiques, qui est aussi la remontée du temps cosmologique vers les toutes premières phases de l'Univers primordial. Aboutirait-on, au terme (si parler de terme peut revêtir quelque signification), à une *éttoffe cosmique indifférenciée*? L'intérêt reste, du moins, dans la tendance constatée.

La loi du temps cosmologique Physique subatomique et déploiement de l'espace-temps

Nous venons de mentionner le “terme” problématique de la remontée temporelle: il est souhaitable de revenir à cette question pour terminer. Dans l'ordre épistémologique, la nature des extrapolations effectuées, par exemple, le statut de la “singularité”, s'il en est, supposée par l'idée de “Big bang” ou le statut de la notion de temps qui est en jeu aux diverses étapes de l'évolution même de l'Univers, souvent acceptée sans critique comme s'il existait quelque chose comme une notion universelle du temps, indépendante des théories physiques à travers lesquelles il intervient.

Or c'est l'un des enseignements de la théorie de la relativité, et déjà de la relativité restreinte, que le temps comme grandeur servant à décrire l'état des phénomènes et des systèmes physiques n'est pas indépendant de ces derniers. La mécanique avait pu se contenter, avec une approximation qui parut longtemps suffisante, d'un temps défini comme universel, indépendant de l'espace et du mouvement des corps, conforme au principe de relativité galiléen. Elle l'avait pu dans la mesure où elle admettait des actions à distance instantanées, corrélatives de simultanéités absolues. La physique des champs à propagation de proche en proche exigea, pour être traitée d'une manière cohérente, que les grandeurs spatiales et le temps soient soumis au principe physique de relativité étendu au champ électromagnétique (ce qui implique la constance de la vitesse de la lumière, et le lien structurel de l'espace-temps). Le temps (avec l'espace) subit une autre modification physique avec la dynamique de la gravitation exprimée par la théorie de la relativité générale (en fait, par sa soumission à une propriété encore plus générale des phénomènes physiques, la covariance généralisée). Le temps est, comme quatrième composante de la variété espace-temps, structuré par la dynamique des champs de gravitation⁶⁵ On voit comment le temps phy-

65 Paty [1993a], chapitres 4 et 5.

sique ainsi construit est déterminé par les phénomènes qui, pour ceux liés au champ de gravitation, le dissuadent pour ainsi dire de “couler uniformément”, et comment ce “contenant” est marqué dans sa forme même par son “contenu”

Ces reconstructions du temps comme grandeur physique correspondent au développement d’une autre compréhension que celle de cadre ou de mesure externe des phénomènes. (Il faudrait ajouter que, dès la mécanique classique, tout en étant pensé comme indépendant des phénomènes, le temps était cependant conçu comme une grandeur continue à une dimension, intelligible selon la signification attachée, pour de telles grandeurs, aux opérations de différentiation et d’intégration, ce qui était déjà les préparer à servir à l’expression des phénomènes physiques).

On peut considérer sous cet angle la signification physique du temps comme grandeur de la cosmologie. Dans les phases primordiales du déroulement de l’Univers, les échelles de temps et d’espace sont structurées directement par les lois qui gouvernent les champs d’interaction en jeu⁶⁶. On peut considérer que le déroulement du temps n’est pas uniforme par définition, mais donné par la loi de structure de l’Univers physique dans cette phase temporelle et spatiale, qui est en fait celle du type de champ et de particules quantiques qui la caractérise. Le temps, dans de telles phases, signifierait alors physiquement ce que les théories physiques lui font signifier, considérant que c’est la condition de correspondre à un état de l’Univers, et non pas seulement de la matière, qui lui octroie cette signification particulière. La physique des particules et des champs, considérée seule, admet l’espace-temps indépendant de la dynamique, comme dans la relativité restreinte. Mais la cosmologie des premiers instants ajoute les conditions globales de l’Univers, qui constituent une contrainte: le fait que le quadri-volume de l’Univers (en expansion) soit fermé et exactement délimité correspond à une relation réciproque entre le temps (ou l’espace) et la loi dynamique.

Cette relation se poursuit dans la phase antérieure au temps de Planck⁶⁷, tout en retrouvant le lien du temps (en fait de l’espace-temps) à la dynamique alors en vigueur, qui est celle du champ de gravitation. Cependant, cette théorie n’est plus la relativité générale, mais la *gravitation quantique*, dont nous ne connaissons pas encore les lois. Nous ignorons encore tout (malgré de nombreux efforts récemment entrepris dans ce domaine) de la théorie qui correspond à

66 Cf Paty [1994].

67 $t_P = 10^{-43}$ sec La distance correspondante est $d_P = 10^{-19}$ cm, et l’énergie, ou “masse de Planck”
 $m_P = 10^{19}$ GeV

cette région de dimensions spatiales extrêmement petites et d'énergies immenses, où la gravitation doit être quantifiée. Et par là-même nous ne savons pas, en deçà du temps de Planck, ce que le temps pourrait signifier comme grandeur physique. A plus forte raison peut-on douter que la notion d'un "temps zéro" de l'Univers ait un sens. Le temps nous est donné par les phénomènes physiques et par les théories qui les représentent, et l'on peut après tout imaginer que, dans certaines conditions physiques comme celles des époques de l'Univers qui nous échappent, il ne soit même plus une grandeur physique pertinente.

Il est d'ailleurs vraisemblable de penser que l'Univers, tel que l'impliquent la théorie de la relativité générale, les cosmologies relativiste et quantique, ainsi que les observations astronomiques et astrophysiques, déploie lui-même son espace et son temps, qui ne sont pas définis en dehors de lui.

En résumé, dans la perspective asymptotique de la cosmologie primordiale, dans le "modèle standard du Big bang", qui rejoint le "modèle standard de la physique des particules et des champs" devenant le "modèle standard de la physique et de la cosmologie", le concept de temps garde une signification physique jusqu'à la valeur $t_p = 10^{-43}$, temps de Planck, pour lequel l'interaction de gravitation rejoint les autres interactions fondamentales et requiert d'être quantifiée. En-deçà de cette valeur, en l'absence d'une théorie quantique adéquate de la gravitation, le temps n'a plus, pour nous, de signification physique. On pourrait employer à son sujet à peu près le même langage que Descartes lorsqu'il évoquait la division du temps comme grandeur continue en-dessous de l'unité de jour ou d'heure (qui seules avaient, à l'époque, une signification physique, par les phénomènes astronomiques): elle est de pure convention, et tient uniquement à ce que nous considérons le temps comme une grandeur continue, c'est-à-dire indéfiniment divisible. Mais nous sommes peut-être désormais fondés à nous demander si nous n'en avons pas atteint la limite.

Références bibliographiques

- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1754]. Articles "Cosmogonie" et "Cosmologie" (avec Formey) de l'*Encyclopédie*, in d'Alembert & Diderot [1751-1780], vol. 4, 1754.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond, et DIDEROT, Denis (éd.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780.
- AMALDI, Edoardo [1987]. The Fermi-Dirac statistics and the statistics of nuclei, in Doncel et al. [1987], p. 251-277.
- ANDRILLAT, H., HANCK, B., MAEDER, A. & MERLEAU-PONTY, Jacques [1988]. *La cosmologie moderne*, 2^e éd., Paris, Masson, 1988.
- AUDOUZE, Jean [1997]. *L'Univers*, Coll. Que sais-je?, Presses Universitaires de France, Paris, 1997.
- AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul & PATY, Michel (éds.) [1990]. *Les particules et l'Univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.
- BIMBOT, René et PATY, Michel [1996]. Vingt cinq années d'évolution de la physique nucléaire et des particules, in Yoccoz, Jean (éd.), *Physique subatomique: 25 ans de recherches à l'IN2P3*, Ed. Frontières, Bures-sur-Yvette, 1996, p. 12-99.
- BOHM, David [1980]. *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- BOSE, Satyendranath N. [1924]. Planck's Gesetz und Lichtquantenhypothese, *Zeitschrift für Physik* 26, 1924, 178-181 (trad. par A. Einstein); texte angl., Planck's law and the hypothesis of light quanta, in H. Theimer, and B. Ram, The beginning of quantum statistics, *American Journal of Physics* 44, 1976, 1056-1057.
- BOUQUET, Alain [1990]. L'origine de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 303-312.
- DE BROGLIE, Louis [1924]. *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, Paris, 1924; *Annales de physique*, 10^e ème série, 3, 1925, 22-128; ré-éd., Masson, Paris, 1963.
- BUNGE, Mario [1973]. *Philosophy of physics*, Reidel, Dordrecht, 1973. Trad. fr. par F. Balibar, *Philosophie de la physique*, Seuil, Paris, 1975.
- COHEN-TANNOUJJI, Gilles & SPIRO, Michel [1986]. *La matière-espace-temps. La logique des particules élémentaires*, Fayard, Paris, 1986.
- CORNELL, Eric & WIEMAN, Carl, La condensation de Bose-Einstein, *Pour la Science*, n°247, mai 1998, 92-97.
- DARRIGOL, Olivier [1988]. Statistics and combinatorics in early quantum theory, *Historical Studies on the Physical Sciences* 19 (1), 1988, 17-80.
- DESCARTES, René [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1^{ère} éd., 1896-1913); nouvelle édition révisée, 1964-1974; ré-éd., 1996. [Édition indiquée AT en note].
- DIRAC, Paul A. M. [1978]. *Directions in physics*, New York, Wiley, 1978.
- DONCEL, Manuel, HERMANN, Armin, MICHEL, Louis & PAIS, Abraham (eds.) [1987]. *Symmetries in physics (1600-1980)*, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 1987.
- EDDINGTON, Sir Arthur Stanley [1925]. *The internal constitution of stars*, Cambridge University Press, Cambridge, 1925.
- [1933]. *The expanding universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1933; 1940.

- EINSTEIN, Albert [1916a]. Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen* (Zürich), 1916, 47-62; également in *Physikalische Zeitschrift* XVIII, 1917, 121-128. Trad. fr., Théorie quantique du rayonnement, in Einstein [1987-1993], vol. 1, p. 134-147.
- [1916b]. Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, 49, 1916-769-882; trad fr., Les fondements de la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 2, p. 179-227.
- [1917]. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1917, Part. 142-152; trad fr., Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale, in Einstein [1989-1993], vol. 3, p. 88-98.
- [1921]. *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1922; trad. fr. par Maurice Solovine, *Quatre conférences sur la théorie de la relativité*, Paris, Gauthier-Villars, 1955.
- [1924]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte* 22, 1924, 261-267. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique, in Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 172-179.
- [1925a]. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 3-14. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique. Deuxième mémoire, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 7, 1982, 129-145.
- [1925b]. Quantentheorie des idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 18-25.
- [1940]. Considerations concerning the fundamentals of theoretical physics, *Science*, n.s., XCI, 1940 (may 24), 487-492; également, *Nature* 145 (june 15) 1936, 920-924. Trad. fr., Les fondements de la physique théorique, in Einstein [1952], p. 109-123.
- [1952]. *Conceptions scientifiques, morales et sociales*, trad. fr. par Maurice Solovine, Flammarion, Paris, 1952.
- [1987-1993]. *The Collected Papers of Albert Einstein*, edited by John Stachel (vols. 1 & 2), Martin Klein et al. (vols. 3-5), Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1987-1993, vols. 1-5.
- [1989-1993], *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud et al., sous la dir. de Françoise Balibar, Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols.
- EINSTEIN, Albert et INFELD, Leopold [1938]. *The evolution of physics*, New York, Simon and Schuster, 1938. Trad. fr., *L'évolution des idées en physique*, Paris, Flammarion, 1938.
- FAYET, Pierre [1985]. La supersymétrie et l'unification des interactions fondamentales, *La Recherche* 19, n° 197, mars 1988, 334-345
- FEYNMAN, Richard [1985]. *QED, The strange theory of light and matter*, Princeton University Press, Princeton, 1985.
- FRIEDMAN, Alexandre [1922]. Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik* 10, 1922, 377-386.
- GRIFFIN, A, SNOKE, D.W. & STRINGARI, S. (eds.), *Bose-Einstein condensation*, Cambridge University Press, 1995.
- HAKIM, Rémy [1993]. *La science de l'Univers*, Syros, Paris, 1993.
- HAWKING, Steve [1988]. *A brief history of time*, Bantam Book, New York, 1988. Trad. fr. par Isabelle Naddeo-Souriau, *Une brève histoire du temps*, Flammarion, Paris, 1989.
- HUBBLE, Edwin [1936]. *Realm of nebulae*, Yale University Press, New Haven, 1936.

- KANT, Immanuel [1755]. *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder versuch von der Verfassung dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes, nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt*, 1755. Trad. fr. par Camille Wolf, in Wolf [1886], p. 103-255. Autre trad. fr. sous la dir. de Jean Seidengaart, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel*, Vrin, Paris, 1984
- KASTLER, Alfred [1973]. Le concept d'atome depuis cent ans, *Journal de physique*, Colloque C10, Supplément au n° 11-12, Tome 34, nov.-déc 1973, 33-43. Repris dans A.K., *Œuvres*, éd. CNRS, Paris, vol. 2, p. 1156-1166.
- [1981]. On the historical development of the indistinguishability concept for microparticles, in Alwyn van der Merwe (ed.), *Old and new questions in physics, cosmology, philosophy and theoretical biology, Essays in honour of Wolfgang Yourgrau*, New York, Plenum Press, 1981, p. 607-623.
- KLEIN, Etienne et SPIRO, Michel (éds.) [1994]. *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994; 2^e éd., 1995; Flammarion, Paris, 1996.
- LACHIÈZE-REY, Marc [1990]. La masse cachée dans l'Univers, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 207-248.
- LANGEVIN, Luce [1972]. Paul Langevin et Albert Einstein d'après une correspondance et des documents inédits, *La Pensée*, n° 161, janvier-février 1972, 3-40.
- LANGEVIN, Paul [1913]. L'inertie de l'énergie et ses conséquences, *Journal de physique*, 3, 1913, 553-592; repris dans Langevin [1950], p. 397-426.
- [1934]. *La notion de corpuscules et d'atomes*, Paris, Hermann, 1934.
- [1950]. *Oeuvres scientifiques*, Paris, Ed du CNRS, 1950.
- LAPLACE, Pierre Simon de [1796]. *Exposition du système du monde*, Paris, 1796; ré-éd. augm., 1835; Paris, Fayard, 1984.
- LEMAITRE, Georges [1946]. *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie* (recueil de textes), Neuchâtel, Griffon, 1946; nlle éd., Culture et civilisations, Bruxelles, 1972.
- LITTRÉ, Paul-Emile [1880]. *Dictionnaire de la langue française*, Paris (1880); éd. nlle, Monte-Carlo, Ed du Cap, 1971, 4 vols.
- MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4^e éd. allde) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [1965]. *Cosmologie du XX^e siècle. Etude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965.
- [1983]. *La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983.
- [1988]. *Le spectacle cosmique et ses secrets*, Paris, Larousse, 1988.
- MUSSET, Paul [1986]. Magnetic monopoles, *Nuovo Cimento* 9c, 1986, 559-572.
- NANOPOULOS, Dimitri V. [1990]. Supersymétrie et inflation, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 279-302.
- NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiæ Naturalis principia mathematica*, London, 1687; trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 (3^e éd., 1726; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934); *Opticks or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, 1704 (4^e éd. corrigée, Londres, 1721; Londres, Bells, 1931).
- PASCAL, Blaise [1963]. *Oeuvres complètes*, Préface d'Henri Gouhier, Présentation et Notes de Louis Lafuma, Seuil, Paris, 1963.

- PATY, Michel [1986]. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, 47-87.
- [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Paris, Archives contemporaines, 1988.
- [1990a]. *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, Paris, L'Harmattan, 1990.
- [1990b]. Remarques épistémologiques sur l'objet commun de la physique des particules et de la cosmologie, in Audouze, Musset & Paty [1990], p. 47-75.
- [1990c]. Reality and Probability in Mario Bunge's *Treatise*, in Dorn, Georg and Weingartner, Paul (eds.), *Studies on Mario Bunge's Treatise*, Poznan studies in the philosophy of the sciences and humanities, Rodopi, Amsterdam-Atlanta, 1990, p. 301-322.
- [1993a]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.
- [1993b]. A propos de la cosmologie contemporaine, *La Pensée*, n° 291, janv.- fév. 1993, 5-13.
- [1994]. Sur l'histoire du problème du temps: le temps physique et les phénomènes, in Klein & Spiro [1994], p. 21-58.
- [1995]. Les neutrinos, *Encyclopaedia Universalis*, vol.12, 1995, p. 294-300.
- [1996]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1984*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
- [1998]. *Albert Einstein, ou la création scientifique du monde*, Belles Lettres, Paris, 1997.
- [à paraître, a]. *Einstein, les quanta et le réel*, à paraître.
- [à paraître, b]. Physique quantique et probabilité, Exposé à la *Journée Physique et probabilité*, Marseille, 21.10.98.
- [à paraître, c]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie*, à paraître.
- PAULI, Wolfgang [1925]. Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppe in Atom mit der Komplexstruktur der Spektren, *Zeitschrift für Physik* 31, 1925, 765-783.
- PEEBLES, P. J. E. [1971]. *Physical cosmology*, Princeton University Press, Princeton, 1971.
- POINCARÉ, Henri [1907]. La relativité de l'espace, *L'année psychologique* 13, 1907, 1-17; repris dans Poincaré [1908], livre 2, chap. 1.
- [1908]. *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908.
- [1912]. L'espace et le temps, *Scientia*, 12^e année, 25, 159-170; repris dans Poincaré [1913], éd. 1963, p. 97-109.
- [1913]. *Dernières pensées*, Paris, Flammarion, 1913; 1963.
- REICHENBACH, Hans [1956]. *The direction of time*, ed. by Maria Reichenbach, Berkeley, University of California Press, 1956.
- RIEMANN, Bernhard [1854]. Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen (1854), *Abhandlungender königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 13, 1867; trad. fr dans B. R., *Œuvres mathématiques*, Paris, 1898, p. 280-297.
- SAKHAROV, Andrei D. [1984]. *Collected scientific works*, transl. from Russian, *Oeuvres scientifiques*, trad. par L. A. E. Riouai, Anthropos, Paris, 1984.

- SALAM, Abdus, HEISENBERG, Werner & DIRAC Paul [1990]. *Unification of fundamental forces.*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990. Trad. par Jean Kaplan et Alain Laverne, *La Grande unification. Vers une théorie des forces fondamentales?*, Seuil, Paris, 1991.
- SCHATZMAN, Evry (éd.), *L'astronomie*, Gallimard (coll. La Pléiade), Paris, 1962.
- SCIAMA, Dennis, W. [1971]. *Modern cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1971; 1981.
- SILK, Joseph [1980]. *The Big Bang*, New York, Freeman, 1980.
- THORNE, Kip S. [1994]. *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, New York, Norton, 1994.
- WEINBERG, Steven [1977]. *The first three minutes. A modern view of the origin of the Universe*, Basic Books, New York, 1977; trad. fr. par Jean-Benoît Yelnik, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Seuil, 1978.
- [1992]. *Dreams of a final theory: the search for the fundamental laws of nature*, Pantheon, New York, 1992.
- WOLF, Camille [1886]. *Les hypothèses cosmogoniques. Examen des théories scientifiques modernes sur l'origine des mondes*, suivi de la traduction de la *Théorie du ciel de Kant*, Gauthier-Villars, Paris, 1886.