

APRÈS LA PHYSIQUE IONIENNE ET LA PHYSIQUE DU XX^e SIÈCLE NAISSANCE ET RENAISSANCE DE LA MÉTAPHYSIQUE

Víctor GÓMEZ PIN

Université Autonome de Barcelone

Preliminaire : là où le problème concerne tout le monde

Pour mettre en relief la difficulté que l'on a parfois à cataloguer la philosophie dans le cadre des disciplines académiques, j'ai souvent utilisé un apologue : si on demande à un étudiant de chimie ou de philologie latine de décrire ce que l'on fait concrètement pendant son heure de cours, il s'en tirera sans trop de trouble. Demandons la même chose à l'étudiant qui se dirige vers son cours d'Ontologie ou même de Théorie de la Connaissance. Il aura la plus grande difficulté à expliquer au profane curieux à quoi il va occuper son temps, quelle sera non seulement sa propre tâche mais aussi celle de son professeur.

Francis Wolff a toujours eu la vocation de professeur, vocation ardue s'agissant d'une matière souvent si difficile à cerner, et il l'a menée à terme, contribuant ainsi à la formation de multiples générations d'étudiants aussi bien à l'École Normale Supérieure que dans d'autres institutions. Toutefois, l'activité de Francis Wolff dépasse de beaucoup le cadre de la pédagogie. Je l'ai vu dans les contextes intellectuels les plus divers. Il a pris part à des colloques où l'on essayait de redonner un élan à la vieille philosophie naturelle (on pourrait dire la ressusciter), avec l'aide d'éminents physiciens ou généticiens. Il s'est aussi confronté aux thèses de compositeurs contemporains de premier rang réunies à la ville de Ronda en Espagne, pour reposer encore une fois le problème des invariants qui permettent de dire que tel effet sonore (ou non sonore) est vraiment de la musique. Il s'est engagé dans des débats où l'on pose le problème de l'homologie génétique entre des espèces animales qui nous sont proches, afin de revendiquer que ce degré de familiarité n'empêche pas d'affirmer la singularité absolue que suppose dans l'histoire évolutive l'apparition de l'être de langage.

Dans tous ces contextes, Francis Wolff apparaît toujours comme le philosophe qui, loin du lieu commun du personnage traitant dans un langage abstrus de problèmes auxquels s'intéressent ses seuls collègues, parle avec la clarté et la distinction exigées

par les plus grands, de questions que l'éducation devrait convertir presque en universels anthropologiques.

Il est connu qu'aux « Lundis de la philosophie », qu'il anime depuis des années à l'ENS, chacun peut prendre la parole en toute spontanéité à condition d'observer strictement une règle : aller directement au problème dont il s'agit sans préalables historiographiques, sauf stricte nécessité. C'est lors de l'un de ces « lundis » que j'ai eu l'opportunité d'aborder et discuter le problème ontologique qui suit.

De quelques implications ontologiques d'expérimentations récentes de la mécanique quantique

Il est bien connu que la mécanique quantique souffre d'un usage excessif d'inflation qui en fait parfois un passe-partout, ou un alibi scientifique pour des positions idéologiques frôlant quelque fois le mysticisme et l'irrationnel. Cette utilisation abusive ne doit cependant pas faire oublier l'essentiel, à savoir que cette discipline a contribué plus que toute autre à dévoiler les mécanismes qui régissent les structures basiques de l'ordre naturel, en même temps qu'elle a donné une nouvelle vie à quelques-unes des interrogations majeures de la philosophie.

Des protocoles mathématiques tout autant que des expérimentations ont poussé à une mise en cause radicale de postulats très ancrés, lesquels déterminent non seulement notre connaissance de la nature mais aussi notre rapport quotidien avec elle. De telle sorte que la mécanique quantique *pousse à une reprise des interrogations ontologiques fondamentales...tout en nous privant de quelques-uns des instruments conceptuels que la tâche semble requérir.*

Les tentatives de rétablissement d'une ontologie ainsi que d'une théorie de la connaissance orthodoxes qui ne renieraient cependant pas les acquis de la mécanique quantique ont été fortement gênées par des théorisations telles que le théorème de Bell ou celui – moins convoqué dans la littérature philosophique – de Kochen-Specker, sur la base desquels on peut mettre en cause des certitudes fortement ancrées, par exemple que la nature soit constituée par des choses douées de propriétés.

Dans des articles qui dépassaient de loin le cadre de la presse spécialisée, Francis se faisait l'écho il y a quelques années de la réussite de l'équipe viennoise du Professeur Anton Zeilinger concernant un « calcul aveugle », c'est-à-dire un calcul quantique dont celui qui engage le processus ne peut rien savoir des opérations qui se déroulent. Quant aux intérêts de ce travail, j'évoquerai une réussite plus ancienne, et peut-être davantage

susceptible d'être rendue populaire, d'une autre équipe dont faisait partie le physicien viennois qui en 1992 avançait le protocole mathématique de ce que l'on appellera par la suite « *Entanglement Swapping* », qui sera réalisé expérimentalement en 2002.

En considérant certains aspects de ce protocole, on peut montrer que même le recours à des instruments qui ont trouvé une nouvelle jeunesse (la polarité aristotélicienne *puissance-acte* en premier lieu – voir *addenda*) ne réussit pas à sauver les bases de l'ontologie traditionnelle. Si l'on écarte les interprétations de ce phénomène qui vont dans le sens de la science-fiction plutôt que dans celui de la science, une ontologie du non substantiel et de l'holistique semble s'imposer, et cette fois-ci non pas comme une émanation de l'atmosphère fascinante et spéculative de la *Science de la Logique* de Hegel, mais comme un corollaire de la *Science naturelle de notre époque*, laquelle, nous rappelait Heisenberg, devrait être le fondement de toute méta-physique contemporaine.

L'« *Entanglement Swapping* » renforce la conviction, déjà ancienne, que la mécanique quantique suppose un vrai démantèlement des principes qui régissaient notre conception de la nature, cette nature dont l'élucidation est cependant rendue plus impérative par les acquis mêmes de la mécanique quantique. L'« *Entanglement Swapping* » ouvre aussi de nouvelles perspectives, expliquant pourquoi, de Schrödinger à Carlo Rovelli en passant par Heisenberg, des physiciens en mal de certitudes philosophiques ont cherché à concilier la raison avec le détournement de postulats ontologique et gnoséologiques qui, d'Aristote à Einstein, avaient été considérés comme des transcendants de la nature. Il convient de faire un petit sommaire de la manière dont, dans le sillon d'Einstein, ils sont présentés par les physiciens « conservateurs ».

Compendium des principes ontologiques.

Pour ce qui est du *principe de réalisme*, il est utile de faire une distinction entre un sens général et un sens restreint. Au sens général, le principe postule l'existence d'une réalité matérielle qui serait là indépendamment de nous. Au sens restreint, il soutient que l'univers est composé d'objets qui ont des propriétés bien définies avec une valeur mathématique précise. Si l'on mesure l'une de ces propriétés, on aura accès à cette valeur, laquelle bien sûr préexistait au fait d'être archivée par l'acte de mesurer. Une théorie pourrait bien être réaliste au sens général, sans toutefois l'être au sens restreint.

Il y a *causalité* si pour chaque événement, il y a une suite de circonstances dont l'évènement surgit conformément à une règle. Une explication causale respecte la

direction du temps, ce qui conduit à l'impossibilité d'agir sur le passé. En physique classique, la règle est donnée par les équations de mouvement de Newton, Lagrange ou Hamilton, dans la mécanique quantique non relativiste, par les équations de Schrödinger ou Heisenberg.

Par déterminisme, on entend le postulat selon lequel les effets sont totalement et exclusivement réductibles à leurs causes. Il ne faut pas, bien sûr, oublier les cas de chaos. Toutefois, il faut souligner que le chaos implique l'indéterminisme, mais seulement du point de vue pratique, et non pas du point de vue essentiel.

Le principe d'individuation soutient que des êtres tels que particules, champs, etc, sont arrangés en un continu spatio-temporel de telle sorte que si deux d'entre eux sont suffisamment séparés, chacun d'eux a droit à une existence indépendante de celle de l'autre. On peut exprimer la même idée disant que chacun d'eux est séparable.

Le principe de *localité* postule que si nous avons deux objets A, B qui (au sens de la relativité spéciale) sont spatialement séparés, alors une action sur A ne saurait avoir une influence sur B. On peut dire aussi que des actions à distance ne sont pas autorisées en physique. Il est encore utile de distinguer entre localité au sens général et localité au sens restreint. Au sens restreint, le principe déclare que même si ces influences directes ont lieu, elles ne sauraient servir pour envoyer une information à une vitesse supérieure à la lumière. Une théorie pourrait être locale au sens restreint sans l'être toutefois au sens général.

Avec les nuances que l'on peut introduire à cause de l'apparition de nouveaux concepts, on peut dire que ces principes étaient déjà implicites dans la physique des penseurs Ioniens, partiellement rendus explicites dans la physique d'Aristote, et revendiqués avec radicalité par Einstein, précisément parce qu'il sentait qu'ils étaient menacés. Einstein tenait à déclarer qu'en l'absence de l'un quelconque de ces principes ontologiques, la physique, au moins dans le sens conventionnel du terme, devenait impossible.

En fait, Einstein n'avait pas tort, si l'on considère que le rôle de la physique est de trouver ce qu'est la nature en elle-même ou en notre absence, une conviction qu'il est vraiment très difficile d'éradiquer. Dans un livre relativement récent, Lee Smolin défend cette conception philosophique¹ (Smolin 2007) sur la base de l'ensemble des principes que je viens de résumer et que, après Einstein, Smolin reprend à son compte :

¹ Lee Smolin, *The Trouble With Physics*, Boston, Mariner Books, 2007.

Puisque le monde se trouverait là en toute indépendance de notre présence, comme le premier principe le soutient, le sujet n'aurait pas le rôle principal et éventuellement pourrait être séparé. Ce monde extérieur est cependant susceptible d'intellection, laquelle nous fournirait une représentation tout à fait correcte de l'essence de l'ordre naturel. Et finalement l'idée peut-être la plus controversée, à savoir, que la nature est *une*, de telle manière que, répondant à la nature elle-même, il serait possible d'obtenir non seulement une théorie de chaque chose, mais encore une théorie unifiée.

Toutefois, il est bien connu que dans le premier quart du XX^e siècle, des faits expérimentaux au niveau microscopique ont montré que cette conception était par trop insuffisante. Et ceci non pas directement comme résultat d'une réflexion philosophique, mais comme une sorte de prolongement métaphysique du travail des physiciens eux-mêmes.

Ces évidences expérimentales jetaient le trouble sur nos certitudes concernant la nature. Les pères fondateurs de la nouvelle discipline étaient amenés à penser que les principes qui soutenaient l'interprétation standard, irréfutables tant qu'on s'en tenait à des phénomènes macroscopiques, devenaient suspects quand on se penchait vers l'intérieur de l'atome.

Postulats quantiques versus principes ontologiques classiques

La suspicion portait sur les principes soutenant la conception orthodoxe, à savoir, réalisme, causalité, déterminisme, glissement temporel continu, individuation, séparabilité et (peut-être surtout) localité. Cependant, le formalisme quantique ne fait pas d'usage explicite de ces principes mais plutôt d'un ensemble de postulats qui ne sont pas toujours compatibles avec eux, et ce, quelle que soit l'interprétation que l'on veut donner du formalisme quantique. Aussi, si le formalisme quantique a raison d'être, la conception du monde qui a pour base les principes classiques ne saurait être satisfaisante.

Sur la base du protocole *Entanglement Swapping* auquel je faisais référence plus haut, on peut faire un bilan de la destinée des principes ontologiques qui soutiennent la physique classique : au sens général, le réalisme peut être maintenu (non sans problème) mais non pas au sens restreint, puisque l'expérimentation révèle que les particules considérées n'ont pas de spin dans une direction bien déterminée avec une valeur pré-existante, que seule la mesure viendrait révéler. Le sens du spin en une direction arbitraire est défini (on n'ose pas dire « créé ») dans l'acte de mesure lui-même. *A*

minima, on peut en toute légitimité soutenir que la mesure est plutôt une préparation qu'une découverte.

La causalité est satisfaite en ce sens qu'il n'y a rien dans l'expérimentation qui permette de soutenir qu'il est possible d'agir sur le passé. Toutefois, le déterminisme est violé en raison du fait que le résultat de la mesure n'est pas exclusivement et univoquement déterminé par l'état initial. La théorie quantique est essentiellement statistique. Un résultat individuel apparaît sans raison suffisante, sans loi déterminante.

La localité est satisfaite dans le sens restreint puisque les messages à vitesse supra-luminale sont impossibles, mais on ne saurait en dire autant de la localité au sens général, sauf au prix d'une modification radicale du concept.

En rapport avec cette faille de la localité, l'individuation (*séparabilité*) est radicalement violée puisque les états *entangled*, même en absence de *swapping* sont incompatibles avec le couple *divisum* (de tout autre) *indivisum* (par rapport à soi) qui fait l'unité substantielle.

Qu'est-ce donc qui gouverne la nature?

Puisque les principes ontologiques classiques se montrent fragiles, nous sommes forcés de considérer l'hypothèse que ce n'est pas la nature elle-même qui les impose. Ils ne sont pas l'expression d'une nécessité naturelle qui nous dépasse. Ils n'ont pas la dignité de l'évidence ; il ne s'agit pas d'axiomes (au sens grec du terme) mais simplement de *postulats*, au même titre que les bases du formalisme quantique sont des postulats ...lesquels sont bien sûr introduits par nous-mêmes, c'est-à-dire par la communauté des sujets de savoir – dans ce cas, le savoir des physiciens qui cherchent à fournir une charpente cohérente à leur propre discipline.

D'où vient donc l'idée que la nature est quelque chose d'autonome, gouvernée de façon interne par la localité, le déterminisme, la causalité, l'individuation, etc ? Le physicien contemporain confronté à ce problème est en train de refaire le chemin qui a conduit au célèbre fragment de Démocrite-Galien² où les facultés (sens et intellect) du sujet lui-même se battent pour être considérées comme le fondement de la vérité.

² Diels-Kranz B125 « "C'est par convention que nous parlons de la couleur, et c'est aussi par convention qu'on se réfère au sucré et à l'amer ; en vérité il n'y a que des atomes et du vide" soutient l'intellect. Mais en écoutant ceci, les sens répondent : "Pauvre Intellect, tu prétend nous vaincre, alors même que nous sommes les sources de tes certitudes. Ta victoire sera ta défaite" ».

À la limite, on pourrait faire une lecture de ce fragment dans laquelle le problème posé surgirait parallèlement aux problèmes qu'a trouvés la physique grecque, c'est-à-dire que l'on pourrait penser que la philosophie n'a pas surgi en Grèce de la physique elle-même. Mais on peut aussi penser le contraire, c'est-à-dire que c'est la propre réflexion sur la nature, la physique ionienne, qui a conduit à cette réflexion sur le sujet.

Sans doute le fragment cité de Démocrite-Galien est-il tardif, et, en conséquence, témoigne davantage de la manière dont le problème s'est cristallisé que du fait qu'il apparaisse comme conséquence de la réflexion sur la *phusis*. Mais il n'est pas excessif du moins de soutenir que le combat entre l'intellect et les sens a un arrière-fond dans la physique ionienne.

De même, le physicien contemporain est passé d'une observation immédiate de la nature à une observation de l'être qui observe cette nature. C'est ainsi que le physicien devient méta-physicien, éventuellement sans lien explicite avec la métaphysique de la philosophie scolaire. On peut dire ainsi que dans le premier quart du XX^e siècle, la métaphysique a trouvé une sorte de renaissance, et ce n'est pas un hasard si quelques-uns ont tourné leur regard vers ce berceau qu'a été la physique des penseurs des villes maritimes de Ionie. Car ils éprouvent en eux-mêmes cette transformation qui, pour Thalès et Anaximandre, a supposé le fait de passer du groupe des premiers philosophes à celui des premiers physiciens notables.

“That which the mind has put into nature”?

Le fait que (dans le fragment de Démocrite-Galien) l'intellect humain soutienne que seules ses propres conjectures (le vide, les atomes) donnent des certitudes concernant l'essence des choses naturelles conduit à considérer sous un jour différent les activités que l'intellect avait toujours pratiquées, en commençant par la technique et l'art. Avec l'indépendance de celui qui gagne dans le combat, seul l'un des pôles de l'être humain s'érige en support ou témoin de la nécessité naturelle. Je finirais ce court essai en citant la réflexion d'Eddington (1920) :

We have found that where science has progressed the farthest, the mind has but regained from nature that which the mind has put into nature. We have found a strange foot-print on the shores of the unknown. We have devised profound theories, one after another, to account for its origin. At last, we have succeeded in reconstructing the creature that made the foot-print. And Lo! It is our own.

Addenda

Physique de choses latentes : note sur la récupération par la physique contemporaine d'une polarité aristotélicienne

Il est bien connu que l'un des traits singuliers de la mécanique quantique est le fait que la mesure d'un observable ne garantit pas qu'une seconde mesure, effectuée en des circonstances identiques, conduise au même résultat quantitatif. Ceci rend difficile de soutenir que la chose observée a effectivement l'attribut physique correspondant à cette valeur quantitative, car si une mesure donne un résultat et une seconde mesure donne un résultat différent, lequel d'entre eux doit être considéré comme *propre* à la chose ?

Avant de mesurer, on peut faire des calculs de probabilité sur le résultat à attendre. Mais la probabilité a maintenant une signification très différente de la probabilité dans la physique classique : ce savoir d'une probabilité n'est pas indicatif d'une limitation de notre connaissance en relation à l'objectivité, mais en donne le contenu exhaustif : la probabilité, *c'est l'être de cet attribut de la chose* ³.

Soit plusieurs valeurs susceptibles d'être trouvées dans l'acte de mesure. Toutes ont le même manque d'effectivité, ce que ne veut pas dire que toutes soient égales. Car, dans cet univers de latence, certaines valeurs physiques ont plus de chances d'arriver à être une propriété de la chose que d'autres, *et dans la connaissance de cette différence, consiste le savoir du physicien dans cette étape préalable à la mesure*. Dans cet univers de latence antérieur à l'intervention, il y a une différence dans les chances de devenir acte, et en conséquence, il y a une certaine hiérarchie.

On a souvent remarqué les réminiscences aristotéliciennes de cette problématique qui met en valeur cette intuition d'Aristote qui permettait d'accorder un statut

³ On peut exprimer ceci en des termes moins qualitatifs : supposons que, après avoir procédé à une mesure qui a laissé le système en un état et une valeur quantitative bien déterminés, nous nous proposons d'effectuer une seconde mesure en relation à un observable dont l'opérateur mathématique n'a pas la même base propre que le précédent. Avant d'effectuer la mesure effective, nous pouvons déjà procéder à un discours sur le nouvel observable en conformité aux postulats du formalisme quantique, car nous savons que le résultat (c'est-à-dire le nombre réel concret) que l'on est autorisés à *espérer*, répond à la formule

$$\langle A \rangle_\psi = \langle \bar{\psi}, \hat{A} \bar{\psi} \rangle$$

Nous savons aussi que seul l'une des valeurs propres de l'opérateur peut surgir, et nous pouvons calculer avec exactitude la probabilité qu'a chacun de ces nombres d'être celui que l'on pourra constater après la mesure

$$: \text{Prob}(A = a_n) ; |\psi\rangle = \langle \psi | \hat{P}_n | \psi \rangle$$

Savons-nous quelque chose d'effectif en relation avec l'observable en question? Non, sans doute... et pourtant, nous savons tout ce que l'on peut savoir, nous avons un savoir entier sur cet attribut de la chose.

ontologique à ce qui n'a pas encore de présence effective. Les physiciens eux-mêmes ont mis en lumière l'intérêt de cette polarité puissance-acte et l'on cite souvent les considérations de Heisenberg⁴. Mais l'on pourrait aussi se rapporter à la notion de *propensity* développée par Popper⁵ et surtout à celle de *latence* explorée par Margeneau⁶.

Bibliographie

- Bell John Stewart, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, New York, Cambridge University Press, 1987.
- Becher Christoph, Ferdinand Schmidt-Kaler, James D. F. V., Rainer Blatt, « Deterministic Quantum Teleportation with Atoms », *Nature* 429, 2004, p. 734-737.
- Bohm David, « A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden Variables" I and II. Phys. », *Physical Review*, 85, 166 and 180, 1952.
- Bohr Niels, *Essays 1958/1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, New York, Wiley, 1963.
- Burkert Walter, *Lore and Science in Ancient in Ancient Pythagoreanism*, Cambridge, Harvard University Press, 1972.
- Diels Hermann und Walther Kranz, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Berlin, Weidmann, 1903.
- Eddington Arthur Stanley, *Space, Time and Gravitation*, Cambridge, Cambridge University Press, 1920.
- Einstein Albert, Boris Podolsky and Nathan Rosen, « Can Quantum mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ? », *Physical Review*, 47, 1935, p. 777.
- Falkenburg Brigitte, *A Particle Metaphysics*, Berlin, Springer, 2007.
- Ferrero Miguel, Victor Gómez Pin, David Salgado and José Luis Sánchez-Gómez, « A Further Review about the Incompatibility between Classical principles and Quantum Postulates », *Foundations of Science*, Volume 18, Issue, 1, first on line 2012, 2013, p. 125-138.
- Ferrero Miguel, Victor Gómez Pin and José Luis Sánchez-Gómez, « The Relevance of the Preparation Concept for the Interpretation of Quantum Mechanical Formalism », *Epistemologia, An Italian Journal for the Philosophy of Science*, XXVII, 2014, p. 134-151.
- Freire Olival, « The Historical Roots of "Foundations of Quantum Physics" as a Field of Research (1950-1970) », *Foundations of Physics*, 34 (2004), p. 1741.
- Fuchs Christopher A., David Mermin and Rüdiger Schack (2013), « An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics », <https://arXiv:1311.5253>, DOI : 10.1119/1.4874855, submitted 20 Nov. 2013.
- Fuchs Christopher A. and Rüdiger Schack, « Quantum-Bayesian Coherence », *Reviews of Modern Physics*, 85, 1693, <https://arXiv:0906.2187v1>, 2009.

⁴ *Philosophic Problems of Nuclear Science*, New York, Pantheon 1952.

⁵ *Quantum Theory and the Schism in Physics*, London, Hutchinson, 1956.

⁶ « Reality in quantum mechanics », *Philosophy of Science* 16, (1949), p. 287-302.

- Gardner Martin, M., *The whys of a Philosophical Scrivener*, New York, St. Martin's Griffin, 1983.
- Gomperz Theodor, *Griechische Denker, Eine Geschichte der antiken Philosophie*, Leipzig, Veit und Comp, 1896.
- Harrigan Nicolas, Robert W. Spekkens, « Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states », *Foundations of Physics*, 40 (2010), p. 125-157.
- Jammer Max, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York, John Wiley and Sons, 1974.
- Heisenberg Werner, *Philosophic Problems of Nuclear Science*, New York, Pantheon, 1952.
- Jennewein Thomas, Gregor Weihs, Jian-Wei Pan, and Anton Zeilinger, « Experimental Nonlocality Proof of Quantum Teleportation and Entanglement Swapping », *Physical Review Letters* 88, (2002). DOI : 10.1103/PhysRevLett.88.017903.
- Kochen Simon, Ernest Peul Specker, « The problem of hidden variables in quantum mechanics », *Journal of Mathematics and Mechanics* 17 (1967), p. 59-87.
- Ma Xiao-Song, Stefan Zotter, Johannes Kofler, Rupert Ursin, Thomas Jennewein, Časlav Brukner and Anton Zeilinger « Experimental delayed choice Entanglement Swapping », *Nature Physics* 8 (2012), p. 479-484. DOI :10.1038/nphys2294.
- Margeneau Henry, « Reality in quantum mechanics », *Philosophy of Science* 16 (1949), p. 287-302.
- Mermin David, « QBism puts the scientists back into science », *Nature*, 507, p. 421-423, 26 mars 2014.
- « Quantum Bayesian Approach to Quantum Foundations », *Physics Today* 65 (7), 8; doi :10.1063/PT.3.1618 y 65 (12),12; doi 10.1063/PT.3.1803.
- Popper Karl, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, London, Hutchinson, 1956.
- Riebe Mark, Hartmut Häffner, Christian F. Roos, W. Hänsel, Jan Benhelm, Gavin P. T. Lancaster, Timo W. Körber, Christoph Becher, Ferdinand Schmidt-Kaler, D. F. V. James & Rainer Blatt, (2007) « Quantum teleportation with atoms : quantum process tomography », *New Journal of Physics*, 9, 211. <http://iopscience.iop.org/1367-2630/9/7/211>
- Erwin Schrödinger, *Nature and the Greeks and Science and Humanism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2014.
- *La Naturaleza y los Griegos*, Introduction and translation by Victor Gómez Pin, Tusquets, Barcelona, 1997.
- Rovelli Carlo, *Anaximandre de Milet ou la naissance de la pensée scientifique*, Paris, Dunod, 2009.
- Smolin Lee, *The Trouble With Physics : The Rise of String Theory, the Fall of Science, and What Comes Next*, Boston, Houghton Mifflin Company, 2006.
- Weinberg Steven, *Dreams of a final theory, The Search for The Fundamental Laws of Nature*, London, Vintage, 1993.
- Wigner Eugene Paul, *Symmetries and Reflections : Scientific Essays*, Bloomington, Indiana University Press, 1967.
- Wolfé Hugh C., « Quantum Mechanics and Physical Reality », *Physical Review* 49, 1936, p. 274.
- Zukowski Marek, Anton Zeilinger, M. A. Horne, and Artur K. Ekert, « “Event-Ready Detectors” Bell experiment with Entanglement Swapping », *Physical Review Letters* 71, 1993, p. 4287-4290.