

NOTE SUR LA CONNAISSANCE EN PHYSIQUE:

107

DE L'INVISIBLE SELON L'OBSERVATION AU VISIBLE SELON LA PENSEE <1>

Michel Paty <2>

(Directeur émérite au CNRS, Paris)

Résumé.

Les phénomènes physiques qui échappent à l'observation directe nous sont connaissables (comme les autres d'ailleurs) par l'entendement. L'observation des phénomènes microscopiques (nommément, quantiques), recourt à des instruments, et donc à des phénomènes, macroscopiques et elle est, dans ce sens, "indirecte". Cela implique-t-il, comme cela fut admis de manière prédominante dans les débuts de la physique quantique, une impossibilité de caractériser le domaine quantique sans recourir au mode de description de la physique classique ? Les développements de la recherche au cours des dernières décennies semblent décidément autoriser à penser le contraire. Ils montrent comment la pensée théorique (en l'occurrence celle de la physique quantique) constitue le véritable moyen intellectuel que nous ayons de représenter les phénomènes et les réalités du monde physique et de les comprendre. L'observation a un rôle décisif en amont, par les données fournies, et en aval, par la vérification des prédictions. Entre les deux, les physiciens pensent désormais les systèmes quantiques directement à travers la théorie quantique, qui leur est devenue intelligible malgré ses obscurités initiales. Le formalisme mathématique abstrait des débuts s'est avéré chargé de signification du point de vue proprement physique, c'est-à-dire chargé de contenu physique, jouant désormais le rôle d'une théorie physique à proprement parler.

(1) Intervention à la Table-ronde "Invisible, inexplicable ou inintelligible", Colloque "L'Univers invisible. Energie noire, matière noire: l'Univers Outre-noir", Palais de l'UNESCO, Paris, 6-10 juillet 2009 (le 10.07).

(2) Directeur de recherche émérite au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (EQUIPE REHSEIS-Laboratoire de Philosophie et d'Histoire des Sciences-UMR 7219, CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot), Paris, France.- Courriel/e-mail : michel.paty@univ-paris-diderot.fr

La théorie quantique n'a plus besoin d'être interprétée de l'extérieur, elle fournit elle-même, avec ses propres ressources, de l'intérieur, les ressorts fondamentaux de son interprétation, qui concerne les phénomènes et systèmes quantiques indépendamment des systèmes classiques. Le propos de cette note est de présenter synthétiquement dans cet esprit l'état actuel de ces questions.

ملخص

إنّ الظواهر الطبيعية التي تخرج عن نطاق الملاحظة المباشرة تكون قابلة للمعرفة (شأنها في ذلك شأن الظواهر الأخرى) بواسطة الفاهمة. تلجأ ملاحظة الظواهر الميكروسكوبية (خاصة الكوانتية) إلى أدوات، وبالتالي إلى ظواهر ماكروسكوبية، فهي من جرّاء ذلك ملاحظة غير مباشرة. هل ينجرّ عن ذلك استحالة تعيين الميدان الكمومي بدون اللجوء إلى شكل الوصف المتبع في الفيزياء الكلاسيكية، مثلما كان رائجا في بدايات الفيزياء الكمومية؟ يبدو أن التطورات الأخيرة للبحث العلمي تقود إلى التفكير في اتجاه مضادّ. تظهر هذه التطورات كيف ان الفكر النظري في حالة الفيزياء الكمومية يمثل الوسيلة العقلية الحقيقية التي نمتلكها لتمثل الظواهر و وقائع العالم الفيزيائي وفهمها. تلعب الملاحظة في المنبع دورا رئيسيا من خلال المعطيات التي توفرها، و في المصبّ من خلال التحقق من التنبؤات العلمية. بين هذين العمليتين، يتعقّل الفيزيائيون مباشرة الأنظمة الكمومية من خلال النظرية الكوانتية التي أصبحت قابلة للفهم رغم غموضها في بداية ظهورها. بدت الصورانية الرياضية المجردة مشحونة بدلالة فيزيائية بحتة، أي بمضمون فيزيائي، لاعبة بذلك دور نظرية فيزيائية بكلّ معاني الكلمة. لم تعد النظرية الكوانتية بحاجة الى ان يقع تأويلها من خارج، بل هي تمنح من داخلها و بمصادرها الخاصة المرتكزات الأساسية لتأويلها و التي تتعلق بالظواهر و الأنظمة الكوانتية من حيث هي مستقلة عن الأنظمة الكلاسيكية. تتعين خصوصية هذه المدونة في تقديم الوضع الحالي لهذه المسائل بصورة تليغية عبر هذا النوع من التفكير.

Abstract.

Physical phenomena that escape direct observation are knowable to us (like the other ones anyway) by the understanding. Observation of microscopic phenomena (namely, quantum ones), makes use of macroscopic instruments and therefore of macroscopic phenomena, and is, in that sense, indirect. Does this imply, as it was admitted predominantly in the early days of quantum physics, an impossibility to characterize the quantum domain without resorting to the mode of description of classical physics? The developments of research in the last decades seem decidedly to authorize thinking otherwise. They show how the theoretical thinking (in this case that of quantum physics) is the truly intellectual mean that we have in order to represent and understand the phenomena and realities of the physical

world. Observation has a peremptory role upstream, in providing the data, and downstream, by the verification of predictions. Between the two, physicists now think quantum systems directly through the quantum theory, which has become intelligible to them despite its initial obscurities. The abstract mathematical formalism of the beginnings has got a lot of significance from the physical point of view, that is to say, it has got plenty of physical content, in such a way that it plays now fully the paper of a physical theory in the proper meaning. Quantum theory does not any more need to be interpreted from the outside, it provides itself, with its own resources, from within, the mainsprings of its interpretation, which is about the quantum phenomena and systems regardless of classical ones. The purpose of this note is to present synthetically with this view the current status of these issues.

1. La Physique contemporaine (celle qui a commencé au début du xx^e siècle) est d'une certaine façon une Physique de l'invisible, d'un *invisible* qui était jusqu'alors donné pour presque à coup sûr *inconnaisable*: les atomes et tous les phénomènes du domaine atomique et subatomique. En fait, la Physique a fait cet *invisible* devenir *connaisable* en développant pour cela des outils matériels (appareillages) et intellectuels (concepts, modèles théoriques et théories). Mieux, elle fait cet invisible devenir *visible*.

2. Il y a une différence entre le *connaisable* et le *visible*. Si le visible nous est donné premièrement par les sens, (en l'occurrence, la vision), la connaissance que l'on s'en donne fait appel aux autres sens et à l'entendement qui coordonne les données des sens, les organise et les transcrit en des termes signifiants. D'un autre côté, le *connaisable* peut nous être connu indirectement, par une théorie, associée, certes, à des expériences, mais celles-ci ne nous rapportant que *de loin, et de manière médiate*, des informations (qui peuvent être précises) sur le domaine invisible. Tel est, par exemple, le statut du domaine quantique tel qu'on le concevait avec la théorie quantique dans la perspective de l'Ecole de Copenhague. La "théorie quantique" n'était considérée en fait que comme un formalisme mathématique sur des quantités abstraites, sans contrepartie physique directe, et augmenté d'une "interprétation". Ce formalisme est celui de la *fonction d'état* définie sur un espace mathématique abstrait de Hilbert - ou "amplitude de probabilité" -, des *opérateurs hermitiques* agissant sur ces fonctions, correspondant à des "observables" mais dont seules les "valeurs propres" sont

observées, etc.. L'interprétation, indissociablement physique et philosophique dans la pensée "orthodoxe" de l'Ecole de Copenhague, pose la relation entre ces entités abstraites du formalisme et les résultats d'observation et d'expérience. Certains des éléments de cette interprétation sont simplement des règles (acceptées par tous) donnant le sens physique des grandeurs, comme l'interprétation probabiliste de la fonction d'état de Max Born (qui la fixe comme amplitude de probabilité); ou comme la "complémentarité" des grandeurs classiques pour décrire les systèmes quantiques, qui établit dans quelle mesure les grandeurs classiques peuvent encore servir à décrire les systèmes quantiques, étant donné qu'elles sont par elles-mêmes insuffisantes : à strictement parler, la complémentarité concerne les propriétés mutuelles des grandeurs quantiques dites incompatibles (dont les opérateurs qui les expriment ne commutent pas entre eux). Ces grandeurs sont caractérisées, comme opérateurs (quantiques), par les relations d'anti-commutation, et quant à leurs valeurs propres mutuelles *pour l'approximation classique*, par les inégalités de Heisenberg.

D'autres éléments d'interprétation sont des énoncés philosophiques sur la connaissance du genre : décrire les systèmes quantiques n'a pas de sens indépendamment de la spécification de leurs conditions d'observation (par des moyens classiques); on ne peut décrire un système mais seulement un système inséparablement lié à l'instrument (classique) de son observation... En bref, selon l'interprétation dominante à l'époque pionnière de la mécanique quantique, on ne pouvait penser les systèmes quantiques de manière intrinsèque, leur pensée elle-même étant toujours conditionnée par le mode classique de penser qui est associé aux moyens de l'observation (toujours par des appareillages classiques) <3>.

3. On pouvait cependant objecter à cela que la connaissance ne se base pas seulement sur l'observation, mais aussi sur le raisonnement, et que le pouvoir de représentation de la pensée peut, si certaines conditions sont données, anticiper les possibilités de l'observation.

(3)Paty [2000b].

C'est d'ailleurs ainsi que la théorie physique fonctionne fréquemment, la prédiction théorique d'un phénomène précédant souvent sa constatation expérimentale (par exemple, le prédiction des ondes électromagnétiques par la théorie de Maxwell, et en particulier que la lumière est une onde électromagnétique dans un certain domaine de longueurs d'onde). Retenons de cet état de choses que la *pensée théorique* constitue le véritable moyen intellectuel que nous ayons de représenter les phénomènes et les réalités du monde physique et de les comprendre. L'observation a un rôle fondamental en amont (elle a permis de former les conditions de cette représentation) et en aval (elle constate, vérifie, et précise ce que la pensée théorique a pu relier et expliquer dans son système symbolique).

4. Cependant la physique a effectué au xx^e siècle un pas de plus, en faisant que ce *connaissable* (voir §2) devienne *visible*, que nous entendrons ici dans le sens de *connu* comme *directement* et en rapport à la connaissance sensible. Précisons ce que l'on doit entendre par là. On peut le comprendre au sens littéral, d'abord (bien qu'il ne s'agisse pas de "visible" au sens de ce qui est éclairé par la lumière visible : mais déjà les rayons X, γ et toutes sortes de rayonnements, y compris les neutrinos et bientôt sans doute les gravitons, sans oublier ceux des accélérateurs de particules quantiques, ont permis d'élargir considérablement le sens ancien de "visible"). Littéralement parlant, l'expérience nous fait voir depuis une ou deux décennies, les atomes individuels. Elle nous fait voir des agrégats de systèmes quantiques (quants) identiques atteignant les dimensions macroscopiques d'un volume visible dans l'espace, tels que les condensats de Bose-Einstein, observés au microscope. Elle nous fait voir des états quantiques intriqués ("entangled") (chats de Schrödinger mésoscopiques) et la transition même où ils passent de l'intrication (cohérence quantique) à la désintrication (décohérence) <4>.

5. En même temps, la théorie quantique est "interprétée" de fait, dans sa mise en œuvre en physique même (indépendamment de toute considération philosophique explicite), très différemment de la manière dont on avait cru pouvoir le considérer à l'étape

(4)Voir, p. ex. Paty [2003a].

pionnière précédente. Elle n'a plus besoin d'être interprétée de l'extérieur, *elle fournit elle-même*, avec ses propres ressources, de l'intérieur, *les ressorts fondamentaux de son interprétation*. La Physique quantique contemporaine conçoit de fait que *la théorie donne une représentation pour ainsi dire directe des systèmes et des phénomènes quantiques*, c'est-à-dire tels qu'ils sont censés être ou se produire à leur niveau, sans référence au niveau macroscopique classique. (Elle le conçoit au moins implicitement, elle fait comme si tel était bien le cas).

La *référence* de la description et de la compréhension des systèmes et phénomènes quantiques n'est aucunement l'observation et ses conditionnements macroscopiques et classiques, mais *ce qui existe (les systèmes) ou ce qui se passe (les phénomènes) au niveau quantique même*. Cela est dû à ce que les *physiciens pensent désormais les systèmes quantiques directement à travers la théorie quantique*, qui leur est devenue intelligible malgré ses obscurités initiales. Par cet exercice pratique et constant de leur pensée théorique qui consiste à concevoir les grandeurs selon leur forme mathématique, fournie par le "formalisme", étant donné que c'est ainsi que l'on accède aux propriétés spécifiquement quantiques (considérant notamment l'importance à cet égard du principe de superposition), ils ont changé le sens initial de *ce formalisme mathématique* en celui de *théorie physique* à proprement parler : de fait, ces éléments du formalisme se sont chargés de contenu physique par cette mise en œuvre même, systématiquement répétée et réussie.

Les physiciens ont intégré à leur mode de pensée, comme *concepts physiques* et comme *relations de concepts* (et donc comme *théorie physique* au sens propre), l'outil, initialement conçu comme neutre par rapport au sens (ou signification) physique, c'est-à-dire aux contenus de sens quant à la physique, qu'était le formalisme théorique dans la période initiale, à savoir la *forme mathématique des grandeurs*. Ces grandeurs sont en fait désormais pensées comme des *concepts physiques*, porteurs de contenus physiques, gros de phénomènes <5>.

(5) Paty [1999, 2003, 2009].

6. Dans cette vue, la pensée théorique conçoit et caractérise les systèmes quantiques (c'est à eux qu'elle se réfère), puis les soumet à l'épreuve de l'expérience par l'intermédiaire d'appareils, certes classiques en dernier ressort, mais *dont l'agencement est organisé en vue des relations de propriétés quantiques dictées par la théorie*; ensuite, les résultats de l'expérience (de nature statistique en général) sont reportés sur les caractéristiques théoriques (non classiques !) des systèmes quantiques, dont ils auront ainsi éclairé les propriétés. En somme, *l'expérience* ne nous aura pas fait sortir de la pensée du système quantique. Et l'on peut même dire que c'est elle, l'expérience, par le caractère classique de ses appareillages, qui est indirecte en rapport aux systèmes quantiques en examen, et non la représentation théorique quantique qui, elle, est directe dans le sens que nous avons indiqué et justifié.

7. Il en résulte un *changement de perspective* par rapport à la première manière de voir. La caractérisation du domaine quantique dépendait de l'approche qui en était possible par la physique classique. Le monde quantique est conçu désormais comme sous-jacent au monde macroscopique classique, de manière objective, de telle sorte que le monde macroscopique émerge ou résulte de l'organisation du monde quantique sous-jacent <6>. Du moins est-ce ainsi que l'on conçoit aujourd'hui les choses, sinon encore dans les exposés philosophiques qui en sont proposés, du moins dans la manière de pratiquer et de concevoir la Physique, classique et quantique.

8. Pour autant, tout n'est pas exactement clarifié. Car il demeure par endroits du flou quant à la connaissance et à la compréhension que nous avons de *l'interface* du monde quantique et du monde classique. Les deux domaines sont bien caractérisés et de manière indépendante l'un de l'autre. L'on a une connaissance précise du monde quantique, par la théorie quantique, qui nous le rend "visible", au sens de connaissable, pour l'entendement. L'on a d'autre part une connaissance précise du monde macroscopique, par les théories physiques classiques et relativistes. Mais l'on ne dispose pas du raccord entre les deux, sinon à la jonction de la limite des deux domaines. Les concepts quantiques peuvent-ils rendre compte des concepts classiques ? Il ne semble pas, pour l'instant, à moins que l'on en propose un jour une

reconstitution explicite, comme le tentent d'ailleurs certains théoriciens. Chacun des niveaux, quantique et classique-macroscopique, est caractérisé par son système théorico-conceptuel, les deux systèmes résultant de types d'approches différentes, chacune inscrite dans une durée et un contexte historiques propres, et portant sur un domaine phénoménal bien circonscrit <6>.

La théorie de la décohérence l'illustre assez bien en ce qui la concerne, en montrant comment les caractères quantiques s'évanouissent dans les conditions d'interactions et d'intrications multiples entre systèmes quantiques dans les milieux matériels, de telle sorte qu'ils ne se retrouvent pas dans les systèmes de corps à plus grande échelle. Mais cela ne dit rien sur la manière dont les propriétés physiques classiques apparaissent à ce niveau plus élevé de l'organisation de la matière, pour lequel l'on se contente dès lors de reprendre les concepts et les théories classiques.

9. Par exemple, comment l'espace au sens physique classique (représenté par un continuum de points) s'engendre-t-il à partir de l'agrégation à relativement grande échelle de systèmes physiques quantiques? On sait, en effet, que le concept d'espace n'est pas intrinsèque à la théorie quantique, et même qu'il est sans doute étranger à elle, si l'on pense à la non-séparabilité locale (ou non-localité), à l'indiscernabilité des particules ou systèmes quantiques identiques - à leurs définitions et à leurs conséquences -, etc. Pourtant, les corps macroscopiques, qui sont de grands agrégats de systèmes quantiques, ne peuvent être pensés sans le concept d'espace. Les particules quantiques elles-mêmes se déplacent dans l'espace - il est vrai que, dans ce cas, il s'agit d'un milieu qui leur est extérieur. Mais ce milieu lui-même résulte de la cosmogénèse <7>. Ce milieu, l'espace, nous est bien connu, par la Théorie de la Relativité générale, dès lors que la dynamique de l'Univers est celle du champ classique (par opposition à quantique, mais en fait relativiste) de gravitation, et sa métrique en tout point de l'espace-temps est déterminée par les champs de gravitation engendrés par les masses que celui-ci contient.

(6) Paty [2003]. (7) Paty [2000c].

Mais quand et dans quelles conditions ce champ métrique se met-il en place? Que sait-on sur la période intermédiaire ou de transition, à la lisière de la période cosmologique précoce, où ce champ prend forme et se détermine, quand les conditions quantiques de l'Univers primordial se mettent à ne plus prévaloir, et que la matière et le rayonnement se découplent ?

Ne peut-on penser que les difficultés du “modèle standard” de la Cosmologie sont liées à cette phase, plutôt peut-être qu'à des phénomènes qui demandent des hypothèses supplémentaires très particulières ?

10. Par l'ordre de ces remarques, et non pour une autre raison, dans cette intervention, les “invisibles” de la Cosmologie sont évoqués seulement après ceux de la Physique quantique. Je n'en dirai pas davantage ici sur ce sujet, sinon que la réflexion sur les invisibles du monde microscopique-quantique ne leur reste sans doute pas étrangère. Ceci en premier lieu pour une raison générale, qui est la même que celle dont nous avons parlé en commençant, à savoir la progression de la connaissance qui va du visible à l'invisible selon les sens, et au visible selon l'entendement. Ensuite pour cette raison propre à la Cosmologie évolutionnaire, que les grandes structures de l'Univers se voient rapportées à l'organisation de la matière à son niveau le plus ténu, dans ses tout débuts selon l'échelle du temps cosmologique, et donc que les conditions de la connaissance propres à chacun des deux domaines se rejoignent ou se chevauchent. Ce que nous regardons dans les deux directions qui nous paraissent aujourd'hui si dissemblables, nous ramène en fait vers un même objet : ceci tient d'une part à la fermeture de l'Univers, et d'autre part à l'unité de la matière dont il est constitué, grosse de son déploiement dans le temps (et dans l'espace qu'elle forme en même temps). La Physique a simplifié une aussi énorme complexité, en faisant de la Cosmologie une de ses provinces : elle prend pour objet non pas simplement un morceau de la matière, mais la matière de l'Univers entier, et elle semble s'y promener à l'aise. Mais son immense succès n'a pas dissipé toutes les ombres. Peut-être parce qu'elle ne dispose pas d'un instrument unique pour voir ensemble (selon la connaissance par l'entendement) ces deux objets de descriptions si différentes qui en fin de compte se

superposent dans le lointain. Elle doit se contenter encore d'une dualité pratique au point de vue de ses concepts. Sa vue de l'Univers unique est encore floue à l'endroit de la couture...

Références

(Ce texte bref étant une réflexion de synthèse, les références ont été restreintes à des études de l'auteur effectuées au cours des dernières années (sauf la première, plus ancienne) sur plusieurs des thèmes évoqués. En s'y reportant, on y trouvera les données bibliographiques détaillées qui ne pouvaient trouver leur place ici).

PATY, Michel [1986]. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae* (Oxford, Strasbourg) 7, 1986, 47-87.

- [1999]. Are quantum systems physical objects with physical properties ?, *European Journal of Physics* 20, 1999 (november), 373-388. (Special issue on « Unsolved problems of physics ».)

- [2000a]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie* (Bruxelles), n°212, 2 (juin) 2000, 199-242.

- [2000b]. Cosmologie et matière quantique, *Epistémologiques, philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 1, n°1-2, janvier-juin 2000, 219-249. (in Seidengart, Jean et Szczeciniarz, Jean-Jacques (éds.), *Cosmologie et philosophie. Hommage à Jacques Merleau-Ponty*, numéro spécial.)

- [2000c]. The Quantum and the Classical Domains as Provisional Parallel Coexistents, *Synthese* (Kluwer, Dordrecht/Boston), 125, n°1-2, oct.-nov. 2000, 179-200. (in French, Steven ; Krause, Décio ; Doria, Francisco (eds.), *In honour of Newton da Costa, on the occasion of his seventieth birthday*).

- [2001]. Physical Quantum States and the Meaning of Probability, as Chapter 14, in Galavotti, Maria Carla, Suppes, Patrick and Costantini, Domenico, (eds.), *Stochastic Causality*, CSLI Publications (Center for Studies on Language and Information), Stanford (Ca, USA), 2001, p. 235-255.

- [2003]. The Concept of Quantum State : New Views on Old Phenomena, in Ashtekar, Abhay ; Cohen, Robert S. ; Howard, Don ; Renn, Jürgen ; Sarkar, Sahotra & Shimony,

Abner (eds.), *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics : Festschrift in Honor of John Stachel*, Series "Boston Studies in the Philosophy and History of Science", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, p. 451-478. – Original en français : Le Concept d'état quantique : un nouveau regard sur d'anciens phénomènes, inédit.

- [2005]. The Problem of the Physical Interpretation of Theoretical Quantities and the Intelligibility of the Quantum World, in Debru, Claude & Paty, Michel (éds.), *Changes in Interpretation and Conceptual Contents. Changements dans l'interprétation et contenus conceptuels*, in Saldaña, Juan José (ed.), *Science and Cultural Diversity. Proceedings of the xxist International Congress of History of Science (Mexico, 2001)*, Universidad Autónoma de México & Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y de la Tecnología, CD-Rom, México, 2005, vol. 37, p. 2774-2793.

- [2006]. L'Espace physique vu du monde quantique. Une approche épistémologique, in Lachièze-Rey, Marc (éd.), *L'espace physique, entre mathématiques et philosophie*, Coll. « Penser avec les sciences », EDP-Sciences, Paris-Les Ulis, 2006, p. 41-79.

- [2009a]. On the Today Understanding of the Concepts and Theory of Quantum Physics. A Philosophical Reflection, in Cattani, M.S.D., Crispino, L.C.B., Gomes, M.O.C. & Santoro, A.F.S. (eds.), *Trends in Physics. Festschrift in Homage to Prof. José Maria Filardo Bassalo*, Livraria da Física, São Paulo, 2009, p. 209-235.

- [2009b]. 'Construction d'objet' et objectivité en physique quantique, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias* (Bogotá, Col.), 33, n°126, 2009, 61-77.