

À 4 mains... minimum!

Une interprétation relationnelle de la physique quantique

ALICE VAN HELDEN

Département Sciences, Philosophies et Sociétés

Université de Namur

alice.vanhelden@unamur.be

Avec la complicité pédagogique de
Savannah MILLIEX

RÉSUMÉ. – Une interprétation de la physique quantique est un système de propositions philosophiques (ontologiques) qui cherche à expliquer les phénomènes quantiques observés expérimentalement en décrivant la constitution de la matière au sens large, ainsi que ses propriétés. L'interprétation relationnelle en est une, qui est présentée ici sous un angle réaliste (en l'occurrence sans donner de statut physique particulier aux observateurs conscients) de manière à pouvoir être comprise par la majorité, et sans prérequis, c'est-à-dire en évitant d'utiliser le formalisme mathématique. Bien qu'on puisse la présenter simplement, elle soulève tout de même des questions qui seront brièvement traitées pour donner un aperçu des pistes de recherches dans ce domaine.

ABSTRACT. – Interpreting quantum physics involves creating a system of philosophical (ontological) propositions that attempts to explain experimentally observed quantum phenomena by describing the composition of matter (in the broad sense of the term), as well as its properties. One of these is the relational interpretation, which is presented here from a purely realistic point of view (i.e., without granting any particular physical status to conscious observers) so as to be more widely understood, without the need for any prerequisite training, and thus excludes the use of mathematical formalism. Although presenting this interpretation is a fairly simple task, it still raises certain questions that will briefly be addressed in order to provide an overview of the various avenues of research in this field.

MOTS CLÉS. – Interprétation — Ontologie — Physique quantique — Relatif — Relationnel

Plan

1. Introduction
2. Expériences
 - 2.1. Expérience des fentes de Young
 - 2.1.1. Expérience initiale
 - 2.1.2. Expérience photon par photon
 - 2.1.3. Perturbation par un détecteur
 - 2.2. Expérience de Stern et Gerlach
 - 2.2.1. Expérience initiale : le spin
 - 2.2.2. Déclinaison à plusieurs détecteurs
 - 2.3. Expérience d'Alain Aspect
 - 2.3.1. Principe de l'expérience
3. Interprétation relationnelle des expériences
4. Analyse ontologique
5. Conclusion

1. Introduction

De quoi le monde qui nous entoure est-il fait ? Qu'est-ce qui explique d'une part cette diversité de formes qui semblent bien séparées et indépendantes les unes des autres, et d'autre part cette matérialité qui leur est commune ? Cette question est si simple à poser, elle fait partie de nos interrogations depuis des milliers d'années, et pourtant nous n'en possédons pas encore la réponse.

Prétendre avec les idéalistes que ces formes sont issues de nos propres structures mentales n'est pas vraiment répondre à la question. Faire le choix d'un instrumentalisme¹ pour la suspendre, par pragmatisme ou par pessimisme quant à notre capacité à y répondre, est une issue facile, mais aussi une fuite. Ce qu'on attend lorsqu'on pose cette question est une explication dite réaliste, qui nous dise comment *sont* les choses et non comment nous les pensons.

La physique quantique rassemble pour l'instant les modèles qui décrivent le mieux les observations faites au niveau fondamental. Toutefois, ces modèles n'incluent pas d'explication des phénomènes physiques observés en termes d'objets réels produisant les effets que nous observons. Une explication de ce type est qualifiée d'interprétation de la physique quantique et il en existe une bonne dizaine actuellement².

Chacune d'entre elles implique une vision du monde physique différente et il y a lieu de choisir dans ce panel selon les présupposés philosophiques qui

1. Position philosophique qui choisit de ne traiter que les questions qui sont testables expérimentalement.

2. Pour un exposé détaillé et exhaustif du panel d'interprétations existantes, lire Laloë, 2018.

les sous-tendent. Le principe de non-contradiction, selon lequel on ne peut pas être une chose et son contraire en même temps et sous les mêmes rapports, est un exemple de ce type de présupposés. Concrètement, on peut être à la fois grand et petit à des moments différents (si on grandit entretemps) ou par rapport à des références différentes (par rapport à une fourmi ou à une maison), mais jamais en même temps et par rapport au même objet. Ce principe est généralement considéré comme un principe directeur pour les réalistes, c'est pourquoi les interprétations qui le violent ne leur paraîtront pas satisfaisantes. De même pour les interprétations basées sur un pouvoir d'intervention de l'observateur sur l'état de l'objet observé, ou de manière générale, celles qui font de l'observateur conscient un objet particulier sur le plan physique.

Auprès du grand public, cette affirmation selon laquelle l'observateur détermine l'état observé est souvent présentée comme un fait, alors qu'elle n'est que peu présente dans le paysage interprétatif actuel. La recrudescence du réalisme dans les nouveaux courants philosophiques s'accompagne d'une revalorisation des interprétations de la physique quantique compatibles avec le réalisme, et ce depuis une cinquantaine d'années. L'interprétation développée ici sera présentée sous un angle qui maximise cette compatibilité. Mais, par souci d'exhaustivité, je signalerai en note les points de divergence qui permettent une adaptation à d'autres systèmes philosophiques.

Partons de la base : les faits expérimentaux. Les trois expériences qui ont montré de la manière la plus évidente la difficulté de comprendre la nature de la matière sont l'expérience des fentes de Young, l'expérience de Stern et Gerlach et les expériences d'intrication, dont nous ne présenterons que le dispositif le plus simple, celui d'Alain Aspect.

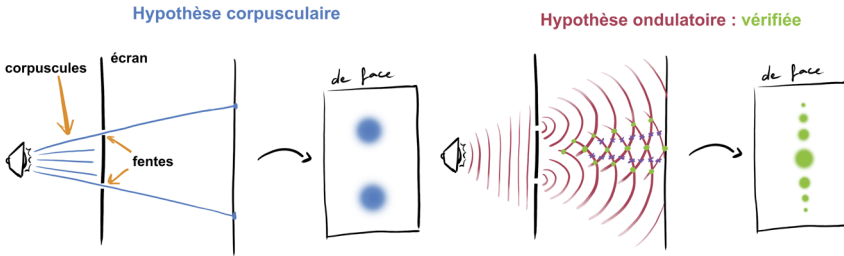
2. Expériences

La première version de l'expérience des fentes de Young est bien antérieure à la physique quantique, elle a été réalisée par Thomas Young en 1801, d'où le nom qui lui a été donné. Par la suite, elle a été déclinée de diverses façons afin de mettre en évidence les effets quantiques (Young, 1804; Geoffrey, 1909; Jönsson, 1961).

2.1. Expérience des fentes de Young

2.1.1. Expérience initiale

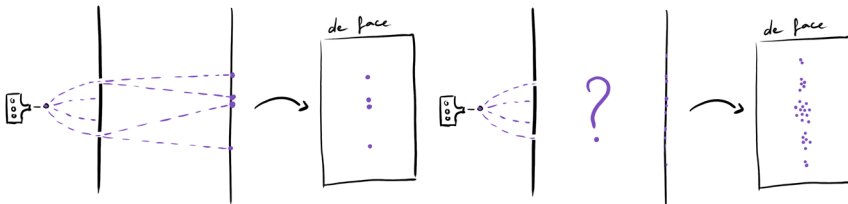
On projette de la lumière sur une plaque percée de deux fentes. On observe la figure projetée sur un écran. Des corpuscules projetteraient deux taches lumineuses alors qu'un milieu continu parcouru d'une onde (comme la surface d'un lac) produirait une figure d'interférences : une alternance de taches claires et sombres due à l'interaction des ondes provenant des deux fentes (à la surface d'un lac, lorsqu'une crête rencontre une crête, elles fusionnent en une crête plus haute, mais lorsqu'une crête rencontre un creux, ceux-ci s'annulent et la surface devient plate). C'est cette dernière figure qui est effectivement observée, ce qui indique une nature de continu.



Illus. n°1.
Expérience historique des fentes de Young.

2.1.2. Expérience photon par photon

On peut aussi envoyer la lumière par très petites quantités à la fois (= photons).

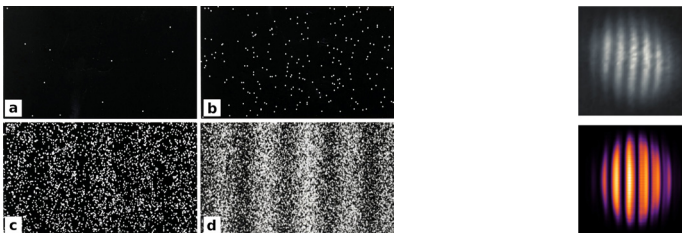


Illus. n°2.
Fentes de Young avec une lumière atténuée (par petits « paquets » de lumière à la fois).

Dans ce cas :

1. Il est impossible de prévoir à quel endroit chaque photon impactera l'écran (c'est ce qu'on appelle l'indéterminisme quantique).
2. Une accumulation d'un grand nombre de photons reproduit la même figure d'interférences que lorsqu'on les envoie tous en une fois, alors même qu'ils ne peuvent pas interagir entre eux.

On peut faire la même expérience avec des électrons et des atomes, ce qui indique que la matière présente également un caractère de continu ondulatoire.



Illus. n°3.

Variations de l'expérience des fentes de Young en utilisant de la matière.

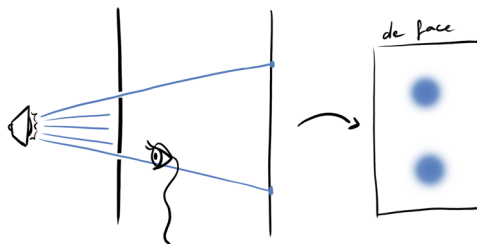
À gauche : en utilisant des électrons envoyés un par un, qui s'accumulent entre l'image a et l'image d (Source : https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_4.jpg).

À droite : en utilisant un gaz d'atomes de Rubidium artificiellement maintenus dans un état quantique. L'image en couleur est ce que prévoyait la simulation de cette expérience.

Source : Burchianti *et al.* (2020).

2.1.3. Perturbation par un détecteur

Lorsqu'on place à la sortie d'une des fentes un détecteur qui ne détruit pas les photons, mais dans lequel ils laissent une trace de leur passage, on observe cette fois les taches qu'on attendrait d'un comportement corpusculaire.



Illus. n°4.

Variation avec détecteur de l'expérience des fentes de Young.

Cet effet peut être interprété de différentes façons, et ne signifie pas forcément que c'est l'observateur qui modifie le comportement des photons, nous le verrons par la suite.

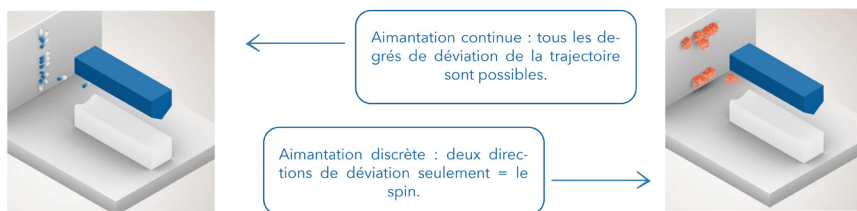
Remarquez que nous parlions d'investiguer la matière, alors que ce qui est étudié ici est plutôt la lumière, qui n'est pas de la matière dans le sens courant. J'emploie en effet le terme de matière dans un sens très général qui est celui d'une substance, c'est-à-dire quelque chose qui existe par soi-même et non pas en tant que propriété d'autre chose³.

2.2. Expérience de Stern et Gerlach

L'expérience de Stern et Gerlach (1922) a été réalisée dans les années 1920, en utilisant des atomes d'argent et d'hydrogène, mais il est plus intéressant d'utiliser des électrons (car le comportement des atomes d'argent et d'hydrogène est en fait dû à leurs propres électrons), ce qui n'a pu être réalisé que plus tard pour des raisons techniques.

2.2.1. Expérience initiale : le spin

On fait passer un faisceau d'atomes ou d'électrons dans un champ magnétique (c'est-à-dire entre deux aimants de forme particulière), dont l'intensité varie de façon uniforme, de façon à dévier la trajectoire de tout aimant qui y passerait en fonction de l'orientation de ses pôles. Le faisceau se divise en deux faisceaux distincts, alors qu'on s'attendrait à ce que la déviation varie de façon continue.



Illus. n°5.

Expérience de mise en évidence du spin.

Source de l'image des aimants : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Spin_quantique_et_exp%C3%A9rience_de_Stern_et_Gerlach.jpg

3. Cette définition s'applique aussi bien à la matière au sens propre qu'à son complémentaire, l'antimatière, mais aussi la matière noire (un type de matière exotique encore mal connue), ainsi que les champs et rayonnements (dont la lumière fait partie), toutes ces notions renvoyant à des types différents de matérialité.

Cela signifie que l'aimantation des électrons (et par extension des atomes) n'est pas continue, mais discrète, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs — et non pas toutes — dans un intervalle donné. Le dispositif de Stern-Gerlach permet ainsi de mesurer ce qu'on appelle le « spin » d'un électron : « up » ou « down » selon la direction de déviation.

2.2.2. Déclinaison à plusieurs détecteurs

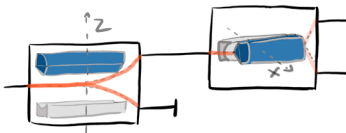
On aligne un deuxième dispositif identique sur l'un des faisceaux qui sortent du premier dispositif. On peut ainsi réaliser plusieurs variations intéressantes de l'expérience initiale.

On aligne un second dispositif sur l'un des faisceaux sortant du premier :

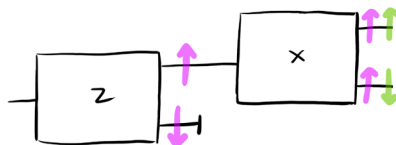


→ Un seul faisceau en sort

On tourne le second dispositif à 90° :

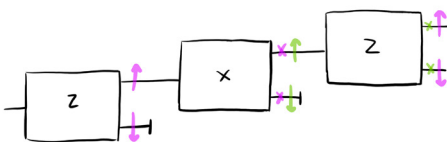


→ Deux faisceaux en sortent



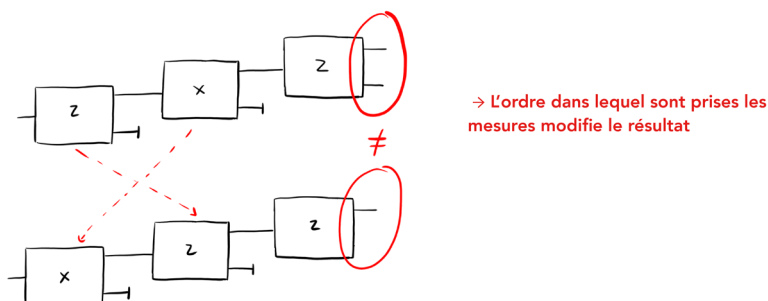
→ Logiquement, on s'imagine que les électrons sortants accumulent les deux propriétés : spin up selon l'axe z et spin up ou down selon l'axe x.

On ajoute alors un troisième dispositif à la suite, à nouveau orienté selon l'axe z :



→ L'idée de propriétés combinées doit être écartée, puisqu'on retrouve de nouveau du spin down selon z à la sortie (alors que tous les électrons entrant dans le 3ème dispositif étaient censés être de spin up selon z).
 Tout se passe comme si la propriété « spin selon x » avait réinitialisé la propriété « spin selon z ».

Si on avait procédé dans un autre ordre :



Illus. n°6.
Variations de l'expérience de Stern-Gerlach.

Les spins mesurés selon des axes perpendiculaires sont incompatibles ; la mesure de l'un balaye la valeur précédente de l'autre. On observe cette même incompatibilité pour d'autres paires de variables, notamment la position et l'impulsion (c'est-à-dire la masse multipliée par la vitesse). Tous ces phénomènes sont généralement désignés par l'appellation « incertitude » ou « indétermination de Heisenberg »⁴ et peuvent être interprétés soit comme le fait qu'on ne peut pas mesurer ces variables simultanément avec précision (une incertitude, donc) soit comme le fait que les propriétés correspondantes ne peuvent en elles-mêmes pas avoir une valeur précise en même temps (une indétermination).

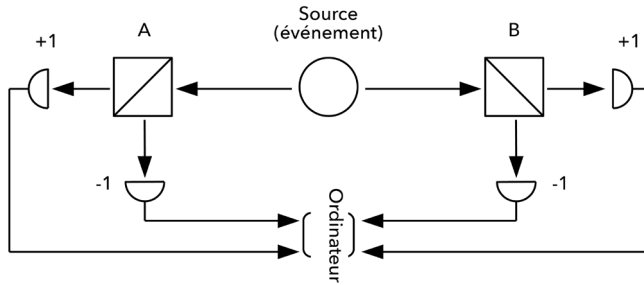
2.3. Expérience d'Alain Aspect

L'expérience suivante met en évidence le phénomène d'intrication (Aspect, Grangier, & Roger, 1982) entre deux objets quantiques, qu'on appelle aussi « paire de Bell » en référence au physicien qui l'a étudié le plus en détail et a proposé une façon de le tester avec précision (Bell, 1964)⁵.

4. Bien qu'en toute rigueur, celle-ci ne concerne que le couple position/impulsion.
5. Notez que John Bell n'est pas le premier physicien à imaginer des situations mettant en évidence un phénomène d'intrication, l'idée originale est à attribuer à Einstein et plusieurs de ses collègues ont également apporté leur pierre à l'édifice (Schrödinger, Podolsky, Rosen...), mais cette discussion restait alors théorique et l'intrication discutée impossible à tester en l'état.

2.3.1. Principe de l'expérience

Deux photons sont produits par un même événement (par exemple la désintégration d'un atome) et envoyés dans des directions opposées. On place des polariseurs à égale distance des deux côtés (A et B).



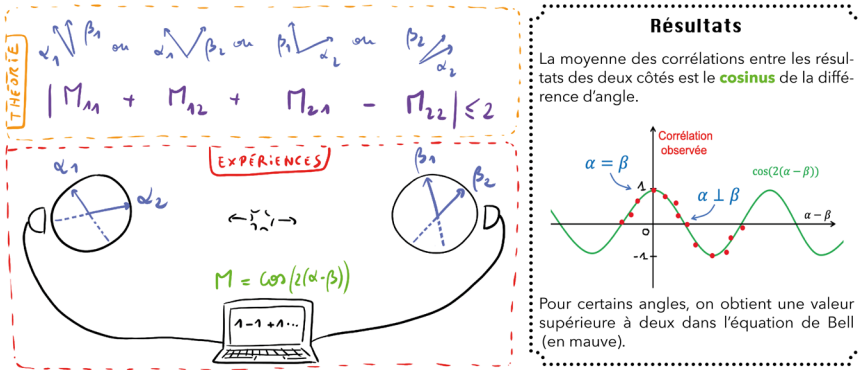
Illus. n°7.

Schéma de l'expérience d'intrication d'Aspect.

Les symboles carrés représentent les polariseurs, les demi-cercles sont des détecteurs de photons.

Un polariseur est une sorte de grille qui filtre la lumière oscillant selon une certaine direction, cette direction étant appelée polarisation. C'est ainsi que l'on mesure la polarisation selon un angle : si le photon franchit le polariseur, c'est qu'il a cet angle de polarisation, et un compteur enregistre +1. S'il a un angle de polarisation perpendiculaire, il est réfléchi, et un compteur enregistre -1. Les photons sont ici produits avec la même polarisation, mais celle-ci peut changer lors du passage dans les polariseurs (car comme dans l'expérience de Stern et Gerlach, la mesure « perturbe » d'une manière ou d'une autre l'état de la particule).

On fait varier les angles des polariseurs A et B l'un par rapport à l'autre et, pour chaque paire d'angles, on mesure les corrélations entre les passages des deux côtés. C'est-à-dire que l'ordinateur multiplie le résultat du compteur de chaque côté puis additionne tous ces produits sur un grand nombre de lancers et divise par ce nombre (autrement dit, il en fait la moyenne). Donc, à la première étape, si les résultats sont identiques (+1 et +1 ou -1 et -1), le produit sera +1, et s'ils sont différents (+1 et -1 ou -1 et +1), le produit sera -1. Ainsi, lorsqu'on moyenne ensuite tous ces produits, on obtiendra +1 si les photons avaient tous la même polarisation, -1 s'ils étaient tous polarisés perpendiculairement, et 0 s'ils étaient décorrélés (parfois dans le même état, parfois pas, et sans que l'un prenne l'ascendant sur l'autre sur un grand nombre de lancers).



Illus. n°8.

Résultats de l'expérience d'intrication d'Aspect.

On peut conclure de cette expérience — et d'autres similaires qui l'ont reproduite ou complexifiée (notamment Hardy, 1992) — que la nature ne respecte pas toujours l'inégalité de Bell (la somme des moyennes en mauve dans l'illus. n°8). Mais la démonstration mathématique que Bell a faite de cette inégalité est correcte, donc la seule façon d'expliquer qu'elle ne soit pas toujours vérifiée est qu'au moins l'un des présupposés dont Bell est parti pour la démontrer n'est pas respecté dans la nature. Ainsi, on doit accepter au moins l'une de ces hypothèses (qui sont les négations de ces présupposés) :

1. il n'y a pas d'explication aux corrélations entre les polarisations (on abandonne le principe de raison) ;
2. il y a une explication causale à ces corrélations, mais qui n'est pas spatio-temporelle ;
3. il y a une rétrocausalité (un effet du futur sur le passé) ;
4. il y a une action instantanée à distance (hypothèse dite « de non-localité »)⁶.

On choisit généralement la quatrième. Certains physiciens qui ont travaillé sur des expériences du même type proposent plutôt d'embrasser la deuxième (Gisin, 2012), c'est-à-dire de considérer qu'il existe des causes physiques non spatio-temporelles. Nous sommes déjà familiers avec ce type de causes dans le domaine non physique des relations humaines. Par exemple, lorsqu'un soldat meurt à la guerre, sa femme est instantanément veuve, d'un point de vue

6. Notez que c'est toujours une action spatio-temporelle, au sens où elle a une valeur dans le temps (« instantanée ») et dans l'espace (« à distance »). Distinguer « hors du temps » et « instantané », c'est un peu comme distinguer « rien » et « zéro ».

légal, même sans le savoir. En effet, les lois humaines n'ont pas à se plier aux contraintes des mouvements dans l'espace, puisqu'elles ne sont pas de nature physique. On pourrait alors imaginer qu'il existe dans la nature un type d'être similaire à ces relations.

La question de l'interprétation du phénomène d'intrication reste en débat, mais on peut mentionner que la simple non-localité bute sur certaines variations plus complexes des expériences d'intrication qui mettent aussi en évidence des corrélations (sans communication possible) à travers le temps (Kim, et al., 2000).

3. Interprétation relationnelle des expériences

Selon les défenseurs de cette interprétation, la clé de ces énigmes est l'interaction⁷. Un objet quantique est toujours une onde lorsqu'il se *déplace* et toujours une particule lorsqu'il *entre en contact avec* un autre objet. Les changements brusques de certaines propriétés (comme dans l'expérience de Stern-Gerlach) se font toujours lors d'un changement d'appareil de mesure, donc d'interaction, puisque, rappelons-le, une mesure n'est rien d'autre qu'une interaction entre l'appareil qui prend la mesure et ce qui en fait l'objet. Les comportements probabilistes ne sont jamais observés sur une seule particule, mais sur un ensemble de particules, donc sur un ensemble d'interactions qui sont chacune différentes puisque, si l'appareil de mesure demeure, la particule observée est toujours renouvelée.

Ainsi, la position, l'impulsion, la direction du spin, sont des propriétés relationnelles au sens où elles n'existent que par la relation entre deux objets en interaction, plutôt que d'appartenir à un seul objet. Par contre, la charge électrique d'un électron ou la fréquence d'un photon sont des propriétés intrinsèques, car elles sont ce qui fait d'un électron un électron et d'un photon un photon. Ce sont des propriétés « de nature », généralement nommées « propriétés essentielles » dans la littérature philosophique, en référence au concept d'« essence » des choses. Étonnamment, on se rend compte que le fait d'être une onde ou un corpuscule n'est donc pas une propriété essentielle, mais plutôt une propriété relationnelle, qui dépend de ce avec quoi l'onde ou le corpuscule interagit.

7. L'article fondateur est celui de Rovelli (1996). Pour une version vulgarisée de l'interprétation telle que la conçoit Rovelli cf. Rovelli (2021). Pour une mise en évidence précoce de l'intérêt d'une description relationnelle, lire Teller (1986).

Dans l'expérience des fentes de Young, la lumière se déplace comme une onde dans les fentes, avec lesquelles elle interagit. Ainsi, elle possède des propriétés associées aux ondes telles que la fréquence, la vitesse de propagation, etc. Par contre, elle n'a pas de position bien localisée, elle se répand sur une large étendue. Lorsqu'elle arrive sur l'écran, elle est absorbée par la matière qui le compose, ce qui constitue un autre type d'interaction et lui confère donc d'autres types de propriétés. Elle acquiert alors notamment une position précise et un aspect corpusculaire⁸.

Le principal sujet d'étonnement de l'expérience de Stern-Gerlach est le fait que la mesure d'un spin efface la valeur de l'autre. Ceci impose d'admettre d'ajouter au modèle un principe supplémentaire, à savoir que certaines propriétés relationnelles sont incompatibles, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune interaction susceptible de les générer toutes les deux simultanément. Chaque interaction produira soit l'une, soit l'autre, soit aucune des deux. Ici, les orientations du spin selon deux axes perpendiculaires sont des propriétés de ce type. Ce qui est amusant, c'est que l'expérience nous amène à considérer l'aimantation selon une direction comme une propriété distincte de l'aimantation selon une autre direction. D'autre part, lorsqu'on ajoute un détecteur à l'expérience, celui-ci interagit avec le photon, même s'il ne l'absorbe pas, et c'est la raison pour laquelle le comportement ondulatoire disparaît : la présence du détecteur (peu importe qu'il y ait un observateur ou pas) rend le photon corpusculaire.

Les partisans de l'interprétation relationnelle proposent souvent une résolution très élégante, quoique tautologique, de la difficulté soulevée par l'expérience d'Aspect (Smerlak, 2014). En effet, puisque c'est l'interaction entre deux objets qui rend réelle une propriété, il faut que deux objets interagissent pour pouvoir comparer leurs propriétés (tant qu'elles sont relationnelles). Or dans cette expérience, les paires de photons sont précisément dans une situation qui rend impossible toute interaction entre eux. Donc, il est impossible de comparer leurs polarisations par rapport à leurs polariseurs respectifs au moment où elles sont mesurées. Ce n'est que lorsque l'ordinateur collecte les données que l'on peut constater une corrélation entre les polarisations actualisées plus tôt.

8. La description qui suit est une acception réaliste de l'interprétation, mais on peut aussi la formuler en se tenant strictement à un point de vue d'observateur (Martin-Dussaud, *et al.*, 2019), de sorte à augmenter la compatibilité avec d'autres approches philosophiques qui mettent l'accent sur notre connaissance. Pour ce faire, il suffit de remplacer dans l'ensemble de ce texte le mot « interaction » par « observation », ce qui réduit les propriétés relationnelles à des « observables » prenant une valeur différente pour des observateurs aux points de vue différents.

Mais alors, cette corrélation est locale, car la corrélation elle-même n'est actualisée que par l'ordinateur, quand l'information provenant des deux photons est rassemblée au même endroit. À la lecture de ces données, on ne peut pas dire qu'elles impliquent que cette interaction-ci ait engendré la même propriété que cette interaction-là en même temps, puisqu'il n'y a pas de « même temps ». En fait, une fois qu'on se débarrasse de la vision absolue de ces propriétés, on ne peut même plus formuler le problème. Toutefois, la question reste à creuser, car les corrélations dans les données collectées par l'ordinateur ont beau être locales, on ne parvient pas pour autant à les expliquer. Nous nous permettrons d'introduire à la fin de la section 4. une autre piste d'explication, que l'interprétation relationnelle rend plus facile à envisager après l'analyse de ce qu'on entend exactement par « relationnel ».

Enfin, dans l'interprétation relationnelle, la transition entre l'aspect des corps microscopiques qui composent la matière et l'aspect des corps macroscopiques que nous sommes et au milieu desquels nous vivons se fait sans heurts, sans frontière entre un monde microscopique quantique et un monde macroscopique classique. Simplement, il se fait que les variations que peuvent provoquer les interactions successives sont trop petites pour avoir une influence sur les énormes systèmes de particules que nous avons l'habitude de manipuler. Les interactions s'enchaînent trop vite pour que nous puissions les remarquer, et les petites différences occasionnées se compensent statistiquement à grande échelle⁹.

9. Un lecteur ayant déjà lu des textes de vulgarisation pourrait être surpris de ne voir nulle part mentionné le paradoxe du Chat de Schrödinger, qui est une expérience de pensée dans laquelle on lie le destin d'un chat (macroscopique) à la désintégration d'un atome (microscopique) par une chaîne de conséquences impliquant la libération d'un poison. La désintégration étant imprévisible (indéterministe), on considérait anciennement que cet indéterminisme se propageait dans toute la chaîne de conséquences, ce qui rendrait l'état « mort ou vivant » du chat indéterminé également (on parle souvent de « superposition de deux états », mais cette formulation relève de l'interprétation). En réalité, il est établi depuis les années 1980 que cette propagation n'a pas lieu, et ce peu importe l'interprétation. Dès qu'on parle d'objets constitués de plus d'une centaine d'atomes à température ambiante, ce qui est notamment ici le cas du poison, il est impossible de maintenir une description quantique (indéterminisme, superposition, etc.). On ne peut pas expliquer pourquoi le poison est libéré à un tel moment et pas un autre, mais on peut expliquer pourquoi on peut être sûr qu'il est soit déjà libéré, soit pas encore libéré, mais ne reste pas dans l'indécision (grâce à un phénomène mathématique qu'on appelle la décohérence et qui implique que plus un corps est chaud, désordonné et constitué d'un grand nombre d'atomes, plus vite la probabilité de conserver des comportements quantiques comme ceux présentés dans les expériences ci-dessus devient négligeable).

4. Analyse ontologique

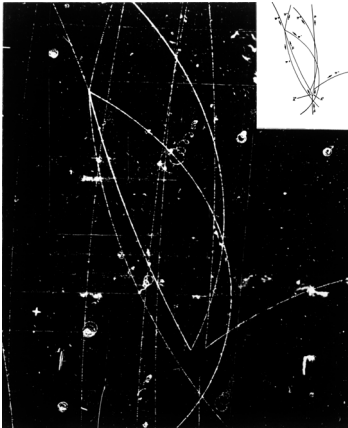
Lorsque les particules sont en interaction, il y a peu de questions à se poser : toutes les propriétés pertinentes dans le contexte de cette interaction sont définies, qu'elles soient relationnelles ou intrinsèques. Par contre, la description de l'état d'une particule libre ou de la transition entre son état libre et son état d'interaction nécessitent une réflexion plus poussée. C'est assurément la position spatiale qu'il est le plus difficile d'imaginer comme non définie. Est-il seulement possible d'exister dans la nature sans posséder de position ? N'est-ce pas implicite dans le concept d'existence qu'il faille exister *quelque part* ?

Cette question s'est déjà posée dans l'histoire de la philosophie, mais souvent dans des contextes qui ne peuvent pas nous être utiles ici. Chez Kant par exemple, ce qui constitue la réalité (la « chose en soi ») n'est pas spatial, mais nous ne pouvons pas nous la représenter sans y appliquer notre notion de spatialité (Kant, 1781, chap. « Esthétique transcendantale »). Par définition, ce système ne nous fournit donc pas de compréhension quant à la façon dont on peut exister sans être situé spatialement. Selon Leibniz par contre, l'espace est ontologiquement postérieur à la matière, c'est-à-dire que son existence découle de l'existence de la matière, et ce qui est ontologiquement premier (qui existe vraiment par soi-même) ce sont les forces qu'il qualifie de « primitives » (Leibniz, 1985, pp. 61-62 ; pour une explication plus complète, voir Hespel, 2003, pp. 167-181). L'existence de la matière est induite par l'existence de ces forces, et celle de l'espace par celle de la matière. Toutefois, bien que ces concepts soient logiquement distincts, ils vont toujours ensemble, la matière est nécessairement spatialisée. Ce n'est pas le cas chez Aristote, car un objet fait exception : le premier moteur qui, selon lui, n'a pas de lieu (Aristote, 2012, 258b10). Il s'agit en effet d'un objet qui génère un mouvement permanent, à la source de tous les autres mouvements, de sorte que l'Univers ne devienne jamais statique (que tous les mouvements ne s'arrêtent jamais). Toutefois, le premier moteur est le seul à exister de cette manière : son mode d'être lui est propre et diffère de ceux de la matière, des propriétés, etc. On ne peut donc pas reprendre la description d'Aristote d'un être non spatio-temporel à notre compte et l'appliquer aux particules matérielles de la physique contemporaine. Il paraît donc difficile de trouver dans l'histoire de la philosophie des exemples d'êtres non spatio-temporels qui puissent nous permettre de comprendre les objets quantiques.

Comme si cela ne suffisait pas, un problème de taille se pose si l'on admet que plusieurs particules de matière de même type pourraient se trouver libres

et donc perdre toute propriété spatiale, car il deviendrait alors impossible de les distinguer. On pourrait seulement connaître le nombre total d'électrons dans l'Univers, mettons, mais uniquement de façon abstraite, car les électrons étant absolument identiques en ce qui concerne leurs propriétés intrinsèques, vu leur absence de spatio-temporalité, on ne disposerait d'aucun critère pour distinguer cet état où ils sont censés être plusieurs d'un état où il n'y en aurait qu'un. La recherche des critères permettant d'établir l'identité de deux objets (c'est-à-dire le fait qu'ils sont un seul et même, mais pris à des moments différents par exemple) et d'individualité d'un objet (c'est-à-dire le fait d'être distinguable du reste), est déjà fastidieuse dans d'autres interprétations de la physique quantique, mais elle deviendrait probablement ici tout à fait insoluble.

Enfin, comment expliquer l'observation de trajectoires dans les chambres à bulles (voir Figure 9) si entre chaque interaction avec une molécule de liquide, la particule, libre, ne se trouve plus nulle part ? Pourquoi, si elle ne se trouve plus nulle part, se retrouve-t-elle lors de l'interaction suivante en une position aussi proche de la précédente ? Qu'est-ce qui la contraint à cette continuité ? De même pour l'expérience des fentes de Young : si, en l'absence d'interaction, les particules ne se trouvent plus nulle part entre les fentes et l'écran, pourquoi restent-elles alignées avec la figure d'interférence induite par les fentes ? Cette figure d'interférence, qui est une répartition spatiale, ne devrait pas être conservée après une perte de toute spatialité.



Production and decay of neutral lambda and anti-lambda hyperons

Illus. n°9. Chambre à bulles.

Si on chauffe très progressivement une cuve de liquide, on peut atteindre un état dit « métastable », c'est-à-dire qui reste liquide malgré qu'il devrait devenir gazeux dans ces conditions. La moindre perturbation provoque alors immédiatement le changement d'état. Ainsi, le simple passage d'une particule laisse une traînée de bulles dans son sillage, là où elle a provoqué l'évaporation locale du liquide.

Source : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Bubble_chamber_event._Decay_of_neutral_lambda%2C_anti-lambda_hyperons._Photograph_circa_July_1959._Bubble_Chamber-772A_-_DPLA_-_5141859e360581251906c073668c70de.jpg

L'accumulation de ces problèmes semble indiquer que l'interprétation relationnelle conduit à une impasse, qu'elle n'apporte pas plus de compréhension ni de possibilité de se représenter la matière que les autres interprétations. Cependant, ces problèmes trouveraient une solution toute simple si on pouvait montrer qu'une particule n'est jamais libre, mais qu'elle est en interaction per-

manente. Pour cela, il faudrait soit un principe qui garantisse que lorsqu'une interaction prend fin, une nouvelle lui succède immédiatement, soit mettre en évidence une interaction qui ne cesse jamais, avec un corps qui soit donc éternellement présent partout. Or, il existe plusieurs entités capables de jouer ce rôle. La première est l'espace-temps tel qu'il invite à le concevoir la relativité générale. L'interprétation la plus répandue de cette théorie est en effet que l'espace-temps soit un champ, c'est-à-dire un continu, qu'on peut se représenter comme une sorte de gel uniformément présent, à travers lequel évoluent les autres corps. Il est un peu particulier par rapport aux autres champs (comme par exemple les champs électromagnétiques) parce qu'il contient aussi la géométrie, c'est-à-dire qu'il est en quelque sorte « sillonné » de toutes les lignes droites possibles, comme un tissu quadrillé, mais en trois dimensions. Si le tissu se courbe (ou que le gel se contracte, pour rester dans une comparaison à trois dimensions), les lignes droites se courbent et les objets qui se trouvent sur une trajectoire en ligne droite ne peuvent faire autrement que de suivre cette courbe. En effet, de leur point de vue, c'est ça « aller tout droit », même si cela peut paraître « tourner » par rapport à un autre point de vue que le leur, parce que c'est la ligne droite elle-même qui est devenue courbe pour l'autre point de vue.

Le grand public est généralement assez au courant que dans cette représentation, l'espace est courbé par les corps massifs, et d'autant plus courbé que leur masse est grande. Notez que le passage du temps en chaque point change en fonction de cela, c'est pour ça que l'on dit « l'espace-temps se courbe », même si le temps ne peut pas se courber, bien entendu, il ne peut que s'écouler plus vite ou plus lentement.

Si l'espace-temps est bien un champ, alors il est évident qu'aucune parcelle de matière n'est jamais libre, au sens où elle n'interagirait avec rien. Toute parcelle de matière interagit forcément *au moins* avec l'espace-temps. Des changements peuvent survenir lorsqu'elle rencontre une autre parcelle de matière, de sorte qu'elle interagit alors à la fois avec l'espace-temps *et* avec autre chose. Mais l'important est que, dans une telle hypothèse, toute parcelle de matière est toujours quelque part, qu'elle soit ramassée en un point dans son état de particule ou étendue sur une large portion d'espace dans son état ondulatoire.

La supposition que l'espace soit un champ semble dépendre de la validité de cette interprétation de la théorie de la relativité. Or cette théorie entre en conflit avec la physique quantique sur de nombreux points. On pourrait donc se demander s'il est raisonnable de faire reposer une interprétation de la physique quantique sur un modèle avec lequel elle s'avère jusqu'ici incompatible.

Toutefois, on peut parvenir par une autre voie à la conclusion que l'espace est une substance.

On peut notamment en trouver une démonstration dans *Buckets of Water and Waves of Space : Why Spacetime Is Probably a Substance*, un article du philosophe Tim Maudlin (1993) qui reprend les arguments historiques autour de cette question et les connecte à des propositions plus modernes, en explicitant les contraintes auxquelles on doit se soumettre si on veut encore pouvoir considérer que l'espace émerge des relations entre les corps et n'existe pas par lui-même. Au vu de ces contraintes (qui incluent notamment de garantir qu'il y ait de la matière partout, sans aucun « trou » de vide sous peine de perdre toute possibilité de reconstruire les axiomes de la géométrie), il conclut qu'il est finalement plus simple de se reposer sur l'hypothèse que l'espace est lui-même une substance.

Heureusement, même sans accepter cette hypothèse, nous disposons de deux autres candidats pour garantir l'absence de vide : un champ de matière proposé par la théorie quantique des champs sous le nom de « vide quantique » (dont les perturbations localisées sont ce que nous appelons des particules de matière, et qui reste de surcroît toujours présent entre les particules), et le champ de Higgs, qui génère la masse des corps selon le modèle actuel de la physique des particules (et dont l'existence est très probable, sachant qu'on a déjà observé les particules qui traduisent l'action de ce champ sur le reste de la matière, qu'on appelle bosons de Higgs).

Dans tous les cas, ces conclusions servent bien nos objectifs, puisqu'elles garantissent l'impossibilité pour une particule de se trouver absolument seule, du fait de l'omniprésence d'un champ, qu'il s'agisse de l'espace-temps, ou d'un autre. Quelle que soit la solution retenue, jamais il n'arriverait que sa position — et a fortiori le reste de ses propriétés relationnelles — ne soit pas définie.

Il est important de noter que l'adjectif « relationnel » est à distinguer de l'adjectif « relatif », une distinction basée sur la nécessité d'un observateur conscient. Ainsi, pour qu'un objet ait une propriété relative au sens courant, il faut que l'observateur ait une connaissance des caractéristiques de l'objet et de son référent (l'objet de référence auquel on le compare). Les propriétés communément qualifiées de relatives résultent en effet d'une comparaison, et tiennent donc forcément au fait qu'une conscience établit cette comparaison. Par exemple, pour qu'un bocal à poisson rouge soit grand ou petit, il faut qu'on le compare respectivement à un objet plus petit comme le poisson qu'il contient ou plus grand comme la maison qui le contient. Sans quoi, il possèdera

juste une taille, sans que cette taille soit grande ni petite. Dans le langage courant, on utilisera souvent indifféremment « relatif » ou « subjectif », pour indiquer que le passage par la conscience introduit de la subjectivité dans la description. Il est ainsi entendu qu'une propriété relative varie en fonction de l'observateur (donc d'un sujet, d'où le terme « subjectif »). Deux personnes différentes pourront dire d'un objet qu'il est grand ou petit selon leur système de référence, qui dépend de leur propre expérience¹⁰.

Dans la théorie de la relativité, paradoxalement, les propriétés étudiées sont plutôt relationnelles que relatives, au sens où elles dépendent d'une référence extérieure, mais qui n'est pas forcément un observateur conscient. Par exemple, la durée d'un mouvement ne sera pas absolue, elle dépendra du référentiel que nous utiliserons pour la décrire, mais elle ne serait pas plus absolue sans qu'il existe des humains pour faire le lien entre le référentiel et le mouvement qu'il décrit. Le mouvement a bel et bien lieu, ce qui implique qu'il dure effectivement, même si le temps qu'il dure n'est pas une propriété intrinsèque à ce mouvement, mais une propriété qui le met en relation avec les autres mouvements qui l'entourent. Le temps est une propriété qui structure les mouvements les uns par rapport aux autres, mais qui ne repose sur aucune propriété interne absolue (contrairement au fait d'être petit ou grand dans l'exemple précédent, qui repose sur la taille). Il n'est donc pas le résultat d'une comparaison. De ce fait, il n'est pas subjectif, au sens où son existence ne dépend pas de sa perception par un sujet.

Dans l'interprétation relationnelle de la physique quantique, enfin, la relation qui confère des propriétés aux objets a un sens beaucoup plus fort, car il s'agit d'une interaction réelle. Lorsque l'interaction a lieu, la relation n'a pas besoin d'observateur pour être établie, quelle que soit la définition qu'on donne au terme « observateur ». Dire d'une propriété qu'elle est « relationnelle » (dans une optique réaliste, toujours) revient à hypostasier la relation qu'elle qualifie, c'est-à-dire à considérer que la relation existe dans le monde physique et non pas seulement dans notre description du monde. Si c'est l'interaction elle-même qui a des propriétés, c'est qu'elle existe elle aussi, en plus des objets qui interagissent. Et lorsque nous, observateurs, la décrivons, nous ajoutons simplement une interaction supplémentaire avec l'objet physique que

10. Notons qu'on pourrait arguer que le fait qu'un poisson soit plus petit que son bocal ne dépend pas de l'observateur : tous les observateurs arriveront à la même conclusion, mais c'est parce qu'ici on parle de la propriété « être plus petit que », qui est absolue, et non pas de la propriété « être petit », qui, elle, est relative.

nous sommes¹¹. On peut dire qu'une interaction est un type de relation, un type de « lien » qui diffère des autres relations (au sens courant) par le fait d'exister sans avoir besoin d'être établi par l'Humain.

Une fois qu'on a introduit ce nouvel objet qu'est une relation non humaine dans la description du monde que nous avons, il est beaucoup plus simple de comprendre l'intrication, en acceptant la deuxième hypothèse proposée dans la section qui lui est consacrée ci-dessus. Il n'y a en effet aucune contradiction à supposer qu'existent des relations liant des objets quantiques en dehors de l'espace et du temps. Ce nouvel objet qu'est la relation n'a pas forcément à être spatio-temporel, de la même façon que la relation légale qui lie le soldat et sa veuve ne l'est pas. Le phénomène d'intrication pourrait s'expliquer par une cause de nature relationnelle. Il faudrait certes encore décrire cette relation de façon plus complète, mais nous pouvons déjà être assurés que son existence n'a rien de contradictoire ni d'incompatible avec la relativité générale.

Une dernière notion qu'il est utile d'introduire est la notion de disposition, ou de potentialité (reprise de Dorato, 2013), afin d'expliquer la continuité entre les interactions successives. En effet, dans l'expérience des fentes de Young, il ne suffit pas de garantir que les propriétés d'un photon sont toujours définies pour expliquer la concordance entre ses états successifs (onde puis corpuscule, mais la même figure d'interférences). Cela s'explique bien mieux en considérant que la forme de l'onde détermine la possibilité du corpuscule de se matérialiser en l'un ou l'autre point. Après avoir interagi avec les fentes, la lumière est présente à certains endroits et elle est absente d'autres endroits (à cause des interférences). Avant de rencontrer l'écran, le photon possède donc une disposition à arriver sur les franges d'interférences constructives, qui se trouvent là où continuerait de se propager l'onde si l'écran n'était pas là, et ne possède au contraire aucune disposition à arriver sur les franges destructives, où rien ne se propagerait de toute façon. Cette potentialité est ensuite actualisée, c'est-à-dire réalisée effectivement, par l'interaction avec l'écran qui fait de la lumière un corpuscule. Quant à l'endroit précis, sur toute la surface des franges d'interférences constructives, où se manifeste alors le corpuscule, il est déterminé par l'interaction de ce corpuscule particulier avec l'écran. Et si l'on se demande comment des corpuscules absolument identiques (puisque les photons

11. Une variation possible permettant d'éviter d'hypostasier les relations est de considérer que seuls les observateurs conscients peuvent donner des propriétés aux objets qu'ils observent, et que ces propriétés ne sont que potentielles en dehors de l'observation. Ceci a pour prix de conférer un statut spécial sur le plan physique aux objets doués de conscience, et donc capables d'être des observateurs (c'est-à-dire les humains et certains animaux).

de l'expérience sont tous identiques) peuvent avoir des interactions différentes avec un même objet, il suffit, pour le comprendre, de se souvenir qu'en réalité, il ne s'agit pas du même objet, puisque l'écran a entretemps été gratifié d'un photon supplémentaire (et probablement d'autres particules passant par-là). Il est donc par principe impossible que deux interactions identiques aient lieu. Comme le disait Héraclite, on ne se baigne jamais deux fois dans la même rivière.

5. Conclusion

Pour résumer, l'interprétation relationnelle permet d'expliquer de manière intuitive les expériences fondamentales de la physique quantique, en postulant que la plupart des propriétés physiques ne sont pas intrinsèques aux particules, mais relationnelles, en ce sens qu'elles n'existent que lors d'une interaction. En dehors des interactions où elles se manifestent, les propriétés sont de l'ordre de la disposition. Pour garantir que certaines propriétés soient toujours définies (notamment la position), on peut s'appuyer sur l'hypothèse selon laquelle l'espace-temps est une substance, ou bien sur celle selon laquelle il existe des champs partout dans l'univers, si bien que toute particule est toujours au moins en interaction avec l'espace ou avec un champ.

Il faut donc s'imaginer que le monde qui nous entoure, bien qu'il nous paraisse stable, est en constante redéfinition. Les constituants de la matière d'une chaise sont en interaction sans cesse renouvelée avec les constituants de l'air, les particules libres qui la traversent, etc., sans oublier les particules plus lointaines avec lesquelles certaines particules de la chaise peuvent être intriquées. Une grande partie de ce qui fait de la chaise ce qu'elle est est ultimement relationnelle. Il n'y a pas de magie à ce que nous ne percevions rien de ces relations dans la vie de tous les jours, que nous ne voyions et ne touchions que des corps localisés, avec des propriétés classiques, puisque nos sens ne sont capables de percevoir que cela. Ils ne sont pas assez fins pour percevoir de si petites et si courtes variations de position, d'énergie ou de forme, et sont totalement incapables (de par leur constitution) de percevoir quelque chose qui n'est pas spatio-temporel. Mais les expériences que nous faisons en laboratoire, alliées aux constructions logiques que nous en tirons, peuvent mieux nous renseigner et compléter l'approximation de nos sens.

Bibliographie

- Aristote (trad. 2012). *La Physique* (introduction et traduction de A. Stevens). Paris : Vrin.
- Aspect, A., Grangier, P., & Roger, G. (1982). Experimental realization of Einstein-Podolsky-Bohm Gedankenexperiment : a new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, 49, 91–94. doi: [10.1103/PhysRevLett.49.91](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91)
- Bell, J. S. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, I, 195–200.
- Dorato, M. (2013). Rovelli's relational quantum mechanics, anti-monism and quantum becoming. *arXiv:1309.0132* [quant-ph] (texte issu d'une conférence).
- Geoffrey, I. T. (1909). Interference Fringes with Feeble Light. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 15: 114.
- Gerlach, W., & Stern, O. (1922). Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Zeitschrift für Physik*, 9-1.
- Gisin, N. (2012). *L'impensable hasard*. Paris : Odile Jacob.
- Hardy, L. (1992). Quantum mechanics, local realistic theories, and Lorentz invariant realistic theories. *Physical Review Letters*, 68, 2981–2984. doi: [10.1103/PhysRevLett.68.2981](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.2981)
- Hespeel, B. (2003). *Outre Newton : quelques images du monde à l'Âge classique*. (Philosophia Naturalis et Geometricalis). Peter Lang.
- Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. *Zeitschrift für Physik*, 161(4), 454–474. doi: [10.1007/BF01342460](https://doi.org/10.1007/BF01342460)
- Kant, I. (1781). *Critique de la raison pure*.
- Kim, Y.-H. et al. (2000). Delayed « Choice » Quantum Eraser. *Physical Review Letters*, 84-1. doi: [10.1103/PhysRevLett.84.1](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.1)
- Laloë, F. (2018), *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*. CNRS éditions, EDP Sciences.
- Leibniz, C. W. (1985). Fragment sur la matière première. Dans *Lettres et opuscules de physique et de métaphysique du jeune Leibniz (1663-1671)* (traduction de R. Violette) (pp. 61-62).
- Martin-Dussaud, P. et al. (2019). The Notion of Locality in Relational Quantum Mechanics. *Found Phys*, 49, 96–106. doi: [10.1007/s10701-019-00234-6](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00234-6)
- Maudlin, T. (1993). Buckets of Water and Waves of Space : Why Spacetime Is Probably a Substance. *Philosophy of Science*, 60(2), 183–203. doi: [10.1086/289728](https://doi.org/10.1086/289728)
- Rovelli, C. (1996). Relational Quantum Mechanics. *Theor. J. Phys.*, 35, 1637–1678. doi: [10.1007/BF02302261](https://doi.org/10.1007/BF02302261)
- Rovelli, C. (2021). *Helgoland : le sens de la mécanique quantique*. Flammarion.
- Smerlak, M. (2014). L'interprétation relationnelle de la mécanique quantique et le paradoxe EPR. Dans B. d'Espagnat & H. Zwirn (dir.). *Le monde quantique : les débats philosophiques de la physique quantique* (Séance VII). Éditions Matériologiques.
- Teller, P. (1986). Relational Holism and Quantum Mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, 71–81.

Young, T. (1804). The Bakerian lecture. Experiments and calculation relative to physical optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 94, 1–16.