

PROJET DE THÈSE AU LABORATOIRE SPHERE

LE DÉVELOPPEMENT DE L'OPTIQUE QUANTIQUE DES ANNÉES 1960 AUX ANNÉES 1980

GAUTIER DEPAMBOUR

L'optique quantique est la branche de la physique qui décrit la lumière et ses interactions avec la matière à l'aide de la théorie quantique. Sa genèse, au début des années 1960, marque une période cruciale et pourtant méconnue de l'histoire de la lumière. Jusqu'alors, celle-ci était envisagée tantôt de façon ondulatoire, tantôt de façon corpusculaire. Au XIX^e siècle, Thomas Young, Augustin Fresnel et plus tard James Clerk Maxwell établirent la théorie ondulatoire de la lumière, dite *classique*. A l'orée du XX^e siècle, Albert Einstein proposa une conception corpusculaire de la lumière, dite *quantique*, introduisant en physique l'idée de « quantum de lumière » plus tard nommé « photon » (Darrigol 2014). Faut-il alors décrire la lumière de manière ondulatoire ou corpusculaire ?

Tel est le problème qui parcourt l'histoire de l'optique, et que traduit la célèbre expression de « dualité onde-corpuscule ». Or, dans les années 1950, les physiciens qui œuvraient dans le domaine de l'optique traditionnelle s'en tenaient à une vision ondulatoire de la lumière, très efficace pour décrire les phénomènes d'optique. Ce fut le cas de Max Born et Emil Wolf, qui publièrent en 1959 un ouvrage de référence en optique classique intitulé *Principles of Optics* (Born and Wolf 1959; Wolf 2004).

C'est alors que deux événements importants se produisirent : les expériences menées en Angleterre par les physiciens Robert Hanbury Brown et Richard Twiss¹ (Hanbury Brown 1991), ainsi que l'invention du laser². Ces deux phénomènes pouvaient parfaitement s'expliquer en adoptant la vision classique ondulatoire de la lumière. Pourtant, ce sont bien eux qui allaient entraîner de profonds changements dans la façon de décrire la lumière.

En effet, en cherchant à expliquer ces deux phénomènes sous un angle tout de même quantique, le physicien américain Roy Glauber établit en 1963 une nouvelle théorie quantique de la lumière qui dépassait la dualité onde-corpuscule (Glauber 1963). Cette théorie proposait ainsi un tout nouveau regard sur la lumière, qui ne pouvait plus être considéré dans ce cadre comme de nature simplement corpusculaire ou ondulatoire. Tout le monde cependant n'accepta pas cette révolution conceptuelle, ce qui entraîna des débats pendant de nombreuses années.

C'est cet épisode de l'histoire de la physique, qui changea les pratiques de l'optique et qui demeure cependant très peu exploré, que je me propose d'étudier. Par exemple, les travaux des physiciens français qui se sont illustrés en optique quantique dans les années 1960 – 1980 à Paris et à Orsay n'ont jamais vraiment fait l'objet d'une analyse historique systématique. Deux historiens se sont certes penchés sur cette période : Joan Lisa

1. Les expériences de Hanbury Brown et Twiss ont mis en évidence d'étranges corrélations entre photons : ceux-ci avaient tendance à être détectés par paires dans des détecteurs séparés dans l'espace, comme s'ils « s'attendaient » les uns les autres pour être détectés en même temps. C'est ce qu'on appelle l'« effet HBT ».

2. Cette toute nouvelle source de lumière manifestait des propriétés exceptionnelles, comme celle de produire très facilement des interférences.

Bromberg, qui a orienté ses recherches sur le laser en Amérique (Bromberg 1991, 2006, 2016), et Olival Freire, qui s'est intéressé aux controverses autour du concept de photon (Silva and Freire 2013) et autour des expériences d'optique quantique concernant les inégalités de Bell³ (Freire Jr 2006). Mais dans ces travaux, l'optique quantique demeure un sujet annexe. Il reste donc à aborder de front l'histoire de ce champ de recherches, qui soulève de multiples paradoxes intéressants pour l'historien. L'optique quantique mérite d'autant plus d'être traitée comme un thème d'étude à part entière qu'elle a de nos jours une importance considérable : en effet, toutes les recherches actuelles sur la cryptographie quantique, l'ordinateur quantique, ou plus généralement l'information quantique, prennent leur source dans les réflexions sur la lumière inaugurées dans les années 1960.

L'objectif est donc de retracer le développement de l'optique quantique des années 1960 aux années 1980 en l'inscrivant dans un contexte expérimental, institutionnel, économique et politique, donnant ainsi au sujet une cohérence globale.

J'envisage de mener mes recherches en trois temps, qui suivent un ordre quasi chronologique, et qui peuvent chacun occuper raisonnablement une année de la thèse.

La première partie de mes recherches sera consacrée à la naissance de l'optique quantique et au débat qui s'ensuivit sur la nature de la lumière. Je m'intéresserai d'abord à l'impact du laser sur le développement de ce nouveau champ de recherche (Bertolotti 2015; Bromberg 1991; Townes 1999). Si le laser a contribué à établir les fondements théoriques de l'optique quantique, il a aussi rapidement suscité un fort intérêt chez les militaires, qui y voyaient une potentielle arme de guerre : c'est ainsi que de nombreux laboratoires d'optique ont bénéficié de financements militaires. Dans quelle mesure ces financements ont-ils pu affecter l'orientation des recherches⁴? Pour y répondre, je prendrai l'exemple de laboratoires à Paris et à Orsay qui, dans les années 1960, ont reçu des subventions de la DRME (Direction des Recherches et des Moyens d'Essais), plus tard renommée la DRET (Direction des Recherches et des Etudes Techniques), sous l'égide du Ministère de la Défense.

D'autre part, en quoi l'apparition des lasers a-t-elle modifié les programmes de recherches dans les laboratoires? Pour l'illustrer, je mettrai en valeur une amélioration technique intervenue à la fin des années 1960 qui a ouvert des perspectives considérables dans l'étude de la matière par la lumière : le laser dit « accordable », dont la fréquence pouvait être réglée à souhait. De plus, je montrerai que les fortes intensités permises par le laser ont conduit également à la fin des années 1960 à l'émergence de l'optique appelée « non-linéaire » (Bertolotti 2015, chap. 8), qui a ouvert la voie à un nouveau type d'expérience avec des paires de photons, par exemple.

En parallèle, dans la suite directe de mon mémoire de Master, j'étudierai une violente controverse qui marqua l'origine de l'optique quantique, et qui se poursuivit jusqu'à la fin des années 1970. L'enjeu principal était de rendre compte des résultats des expériences de

3. Les inégalités de Bell, formulées par le physicien John Bell en 1964, mettent en lumière des prédictions différentes entre l'interprétation réaliste de la mécanique quantique, défendue par Einstein, et l'interprétation dite « de Copenhague », défendue par Niels Bohr.

4. Notons que cette question a déjà été abordée par l'historien des techniques Paul Forman pendant les années 1940 – 1960 aux Etats-Unis : selon lui, sur cette période qui précède la naissance de l'optique quantique, les recherches en physique ont été guidées par les militaires (Forman 1987).

Hanbury Brown et Twiss sur les corrélations observées entre temps d'arrivée de photons dans deux détecteurs distincts, ainsi que des propriétés de la lumière laser. D'un côté, je montrerai comment Roy Glauber, qui défendait une vision quantique de la lumière, a introduit des méthodes de théorie quantique des champs en optique – ce qui illustre un transfert de connaissance important entre deux domaines distincts de la physique. D'autre part, je me demanderai pourquoi d'éminents physiciens attachés à la conception classique de la lumière n'acceptèrent pas la nouvelle théorie de Glauber. Pour le comprendre, j'étudierai d'abord les comptes rendus de la Conférence d'Electronique Quantique de Paris qui s'est tenue en février 1963 ([Grivet and Bloembergen \(eds.\) 1964](#)). Je porterai aussi dans l'étude de cette controverse une attention particulière à l'Université de Rochester (New York), qui constitua tout à la fois un pôle important de l'optique quantique et un bastion pour les défenseurs de la vision classique de la lumière, et à celle de Harvard, où se trouvait Glauber. En particulier, pour analyser la progression du débat, je scruterais les comptes rendus de grandes conférences consacrées à l'optique quantique, qui eurent lieu à Rochester environ tous les six ans à partir de 1960, et qui furent soutenues financièrement par les militaires ([Mandel and Wolf \(eds.\) 1973, 1978, 1984](#); [O'Neill and Bradley 1961](#)). L'étude de ces *Proceedings* permettra de cerner l'état des connaissances en optique quantique à un instant donné et de suivre l'évolution du positionnement des protagonistes dans le débat⁵. Je compléterai ces sources avec les interviews de Roy Glauber⁶, Emil Wolf et Leonard Mandel, conservées par l'American Institute of Physics (AIP) ([Glauber 1977, 1987](#); [Mandel 1984](#); [Wolf 1984](#)).

La deuxième partie de mes recherches aura pour fil conducteur un paradoxe lié au développement expérimental de l'optique quantique dans les années 1970. A la fin de cette décennie, une expérience réalisée en 1977 par Jeff Kimble, Mario Dagenais et Leonard Mandel à l'Université de Rochester a permis de mettre en évidence un phénomène prédit par la théorie quantique de la lumière au détriment de la théorie classique ([Kimble et al. 1977](#)). D'autres expériences antérieures prétendaient avoir fait de même, mais n'ont eu quasiment aucun écho. C'est le cas de celle menée par John Clauser au Laboratoire Lawrence à Berkeley (Californie), en 1974 ([Clauser 1974](#)). Pourquoi l'expérience de Kimble, Dagenais et Mandel a-t-elle largement pesé dans le débat décrit plus haut en faveur de la vision quantique, et non pas l'expérience de Clauser qui lui est pourtant antérieure ? Tel est le paradoxe que je me propose d'élucider. Pour cela, je chercherai d'abord à comprendre pourquoi cette expérience de Clauser n'a pas convaincu la communauté scientifique de la nécessité d'employer la théorie quantique pour décrire la lumière. En particulier, la personnalité difficile de Clauser aurait-t-elle été un frein à la diffusion des idées qu'il défendait⁷ ? Cela explique peut-être en partie les réticences de la communauté

5. Précisons qu'il n'existe pas de *Proceedings* de la Conférence de Rochester de 1966 ; en revanche, je dispose déjà de quelques abstracts de conférences, qui ont été aimablement scannés et mis à ma disposition par Harvey Jason, bibliothécaire au Département de Physique et d'Astronomie de l'Université de Rochester. Harvey Jason m'a proposé de consulter l'ensemble de ces abstracts sur place (248 pages).

6. Lors de mes recherches pour mon mémoire de Master, je suis parvenu après de multiples tentatives à contacter le fils et la fille de Roy Glauber, qui m'ont octroyé une autorisation spéciale pour consulter une grande interview de leur père (150 pages). J'ai pu me concentrer sur une partie de cette interview d'une très grande richesse dans le cadre du mémoire de Master, mais un tel document, inédit, mérite une analyse bien plus approfondie.

7. La grande interview de Clauser contenue dans les archives de l'AIP pourra donner des indices sur

de l'optique à donner plus de crédit à ses expériences.

A contrario, dans quelle mesure peut-on dire que l'expérience de Kimble, Dagenais et Mandel a constitué un véritable tournant dans le développement de l'optique quantique ? Pour le savoir, je commencerai par identifier les raisons pour lesquelles les résultats de cette expérience ont modifié l'état d'esprit de la communauté scientifique. L'une d'entre elles pourrait être le revirement de Mandel, auparavant fervent défenseur de la vision classique de la lumière, qui jouissait d'un certain prestige et qui s'est reconverti à la vision quantique à la suite de sa propre expérience⁸.

De plus, quelle fut la portée de cette expérience dans la croissance de l'optique quantique ? Je tâcherai de l'évaluer en dressant un panorama des laboratoires, des institutions et des revues consacrés à ce domaine de recherche dans les années 1980. Il importera aussi d'évaluer dans quelle mesure l'expérience de Kimble, Dagenais et Mandel a inspiré les programmes de recherche dans les laboratoires d'optique quantique, par exemple à l'Université de Rochester. En effet, c'est dans cette institution auparavant acquise à la vision classique de la lumière que fut menée à la fin des années 1980 une expérience d'interférences à deux photons, qui requiert la vision quantique de la lumière⁹ (Hong et al. 1987).

Pour mon troisième axe de recherche, je souhaite mettre l'accent sur la contribution française au développement de l'optique quantique, des années 1960 aux années 1980. En effet, les travaux d'historiens que j'ai pu citer précédemment sont souvent polarisés sur les scientifiques américains, qui ont été longuement interrogés sur cette période par des historiens, et ces interviews constituent de précieux documents. C'est pourquoi j'ai à cœur de recueillir de même les témoignages de trois physiciens français qui ont joué un rôle essentiel dans le développement de l'optique quantique : Claude Cohen-Tannoudji, Alain Aspect et Philippe Grangier.

Avec l'aide de Claude Cohen-Tannoudji (prix Nobel de Physique 1997), je retracerai l'évolution du programme de recherche d'un laboratoire fondamental en optique quantique : le Laboratoire aujourd'hui nommé Kastler-Brossel, à Paris (Cohen-Tannoudji 2003). En particulier, je chercherai à savoir si ce laboratoire sous l'égide d'Alfred Kastler (prix Nobel de Physique 1966) a pu faciliter la décision de Cohen-Tannoudji d'adopter une vision quantique de la lumière, et réciproquement, je mesurerai l'influence de la vision quantique de Claude Cohen-Tannoudji sur le choix des expériences mises en œuvre.

De plus, je m'intéresserai à l'enseignement de l'optique quantique en France, en analysant en particulier un cours important que donna Cohen-Tannoudji sur ce thème au Collège de France en 1979-1980, dans lequel il synthétise le débat sur la nature de la lumière et remet en perspective l'expérience de Kimble, Dagenais et Mandel (Cohen-Tannoudji 1980). Comment Claude Cohen-Tannoudji a-t-il élaboré ce cours ? Pour le comprendre, je me pencherai également sur d'autres cours qu'il a lui-même suivis, et qui ont d'après lui marqué des jalons dans son parcours intellectuel : celui de Roy Glauber donné à l'École

son caractère et sur l'élaboration de ses expériences (Clauser 2002).

8. Ce point mérite une attention particulière, et c'est pourquoi je souhaiterais interroger son ancien doctorant Jeff Kimble, afin de connaître son point de vue sur le basculement intellectuel de Mandel.

9. Il sera en particulier intéressant d'élucider pourquoi les auteurs de cette expérience ont insisté sur son caractère quantique non pas dans l'article qui la décrit, mais dans un autre article publié l'année suivante.

d'été des Houches de 1964 ([Glauber 1965](#)), ainsi que ceux d'Anatole Abragam et d'Albert Messiah donnés à Saclay dans les années 1960.

Enfin, à quel point ce cours a-t-il donné à Alain Aspect l'idée de l'expérience d'interférences à photon unique, qui sera réalisée en 1985 à l'Institut d'Optique par Philippe Grangier ([Grangier et al. 1986](#)) ? J'étudierai cette question en explorant notamment comment les physiciens sont techniquement parvenus à créer des sources de lumière à photon unique ([Aspect and Grangier 2019](#)). De même que le laser, qui est apparu comme une nouvelle source de lumière bien particulière, je chercherai à établir en quoi l'émergence des sources de lumière à photon unique a ouvert la voie à des expériences qui sont venues tester les principes les plus fondamentaux de la mécanique quantique. J'examinerai alors dans quelle mesure ces développements ont permis d'entériner la nécessité d'adopter la vision quantique de la lumière.

Pour mener à bien ce projet de recherche, j'analyserai différents types d'archives : articles, comptes rendus de conférences, cours d'optique quantique donnés en France, ou encore interviews des principaux acteurs – sans compter celles que je souhaite réaliser par moi-même. Tous ces documents me permettront d'intégrer l'histoire conceptuelle de l'optique quantique dans un environnement bien plus vaste : je mettrai ainsi en valeur l'impact des progrès technologiques sur ce domaine de recherches (comme l'apparition des lasers accordables), la vie de laboratoires importants (comme le Laboratoire Kastler-Brossel à Paris), le rôle des principales institutions (comme l'Université de Rochester), et leurs sources de financements (comme les militaires).

L'ensemble de la thèse contribuera à éclairer tout un pan de l'histoire des sciences, à restituer toute sa complexité, et à donner un sens à des recherches qui se poursuivent encore aujourd'hui. Elle devrait aussi inspirer des réflexions historico-philosophiques plus générales, car elle implique la formation d'un nouveau champ de recherches à la croisée de plusieurs domaines techniques, expérimentaux et théoriques.

Gautier Depambour

Références

- Aspect, A. and Grangier, P. (2019). « The First Single Photon Sources and Single Photon Interference Experiments ». In R.W. Boyd et al., editor, *Quantum Photonics : Pioneering Advances and Emerging Applications*, chapter 1, pages 3–23. Springer Series in Optical Sciences 217.
- Bertolotti, M. (2015). *Masers and Lasers, Second Edition : an Historical Approach*. Taylor & Francis.
- Born, M. and Wolf, E. (1959). *Principles of Optics*. Elsevier, 1st ed.
- Bromberg, J. L. (1991). *The laser in America, 1950-1970*. MIT press.
- Bromberg, J. L. (2006). « Device physics vis-à-vis fundamental physics in Cold War America : the case of quantum optics ». *Isis*, 97(2) :237–259.
- Bromberg, J. L. (2016). « Explaining the laser’s light : classical versus quantum electrodynamics in the 1960’s ». *Archive for History of Exact Sciences*, 70(3) :243–266.
- Clauser, J. F. (1974). « Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect ». *Physical Review D*, 9(4) :853.
- Clauser, J. F. (2002). Interview de John Clauser par Joan Lisa Bromberg les 20, 21 et 23 mai 2002. Documents conservés aux Niels Bohr Library & Archives de l’AIP (American Institute of Physics), 1 Physics Ellipse Dr, College Park, MD 20740, États-Unis. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/25096>.
- Cohen-Tannoudji, C. (1979-1980). Cours au Collège de France intitulé : « Emission et détection de rayonnement : approches semi-classiques et approches quantiques ». <http://www.phys.ens.fr/~cct/college-de-france/1979-80/1979-80.htm>.
- Cohen-Tannoudji, C. (2003). « The Early Days of Quantum Optics in France ». In *Coherence and Quantum Optics VIII*, pages 1–17. Springer.
- Darrigol, O. (2014). « The quantum enigma ». In Michel Janssen and Christoph Lehner, editor, *The Cambridge companion to Einstein*, pages 117–142. Cambridge University Press.
- Forman, P. (1987). « Behind Quantum Electronics : National Security as Basis for Physical Research in the United States, 1940-1960 ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 18(1) :149–229.
- Freire Jr, O. (2006). « Philosophy enters the optics laboratory : Bell’s theorem and its first experimental tests (1965–1982) ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37(4) :577–616.
- Glauber, R. J. (1963). « The quantum theory of optical coherence ». *Physical Review*, 130(6) :2529–2539.
- Glauber, R. J. (1965). « Optical Coherence and Photon Statistics ». In *Quantum Optics and Electronics : Lectures Delivered at Les Houches During the 1964 Session of the Summer School of Theoretical Physics, University of Grenoble*, pages 63–185. Gordon & Breach.
- Glauber, R. J. (1977). Interview de Roy J. Glauber par Katherine Russell Sopka les 09 décembre 1976 et 03 mars 1977. Documents conservés aux Niels Bohr Library & Archives de l’AIP (American Institute of Physics), 1 Physics Ellipse Dr, College Park, MD 20740, États-Unis. Documents consultés avec l’aimable autorisation de la famille Glauber.
- Glauber, R. J. (1987). Interview de Roy J. Glauber par Joan Lisa Bromberg les 21 avril, 12 et 20 mai 1987. Documents conservés aux Niels Bohr Library & Archives de l’AIP (American Institute of Physics), 1 Physics Ellipse Dr, College Park, MD 20740, États-Unis. Documents consultés avec l’aimable autorisation de la famille Glauber.

- Grangier, P., Roger, G., and Aspect, A. (1986). « Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter : a new light on single-photon interferences ». *EPL (Europhysics Letters)*, 1(4) :173–179.
- Grivet and Bloembergen (eds.), editor (1964). *Quantum Electronics : Proceedings of the third international congress (1963)*. Dunod.
- Hanbury Brown, R. (1991). *Boffin : A Personal Story of the Early Days of Radar, Radio Astronomy and Quantum Optics*. Taylor & Francis.
- Hong, C.-K., Ou, Z.-Y., and Mandel, L. (1987). « Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference ». *Physical review letters*, 59(18) :2044–2046.
- Kimble, J. H., Dagenais, M., and Mandel, L. (1977). « Photon antibunching in resonance fluorescence ». *Physical Review Letters*, 39(11) :691.
- Mandel, L. (1984). Interview de Leonard Mandel par Joan Lisa Bromberg le 24 septembre 1984. Documents conservés aux Niels Bohr Library & Archives de l’AIP (American Institute of Physics), 1 Physics Ellipse Dr, College Park, MD 20740, États-Unis.
- Mandel and Wolf (eds.), editor (1973). *Coherence and Quantum Optics : Proceedings of the Third Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics held at the University of Rochester, June 21–23, 1972*. Springer.
- Mandel and Wolf (eds.), editor (1978). *Coherence and Quantum Optics IV : Proceedings of the Fourth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics held at the University of Rochester, June 8–10, 1977*. Springer.
- Mandel and Wolf (eds.), editor (1984). *Coherence and Quantum Optics V : Proceedings of the Fifth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics held at the University of Rochester, June 13–15, 1983*. Springer.
- O’Neill, E. and Bradley, L. (1961). « Coherence Properties of Electromagnetic Radiation ». *Physics Today*, 14 :28.
- Silva, I. and Freire, O. (2013). « The Concept of the Photon in Question : The Controversy Surrounding the HBT Effect circa 1956–1958 ». *Historical studies in the natural sciences*, 43(4) :453–491.
- Townes, C. H. (1999). *How the laser happened - Adventures of a scientist*. Oxford University Press.
- Wolf, E. (1984). Interview d’Emil Wolf par Joan Lisa Bromberg le 23 septembre 1984. Documents conservés aux Niels Bohr Library & Archives de l’AIP (American Institute of Physics), 1 Physics Ellipse Dr, College Park, MD 20740, États-Unis. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/31406>.
- Wolf, E. (2004). "Recollections of Max Born". In Jansson, Tomasz P., editor, *Tribute to Emil Wolf : science and engineering legacy of physical optics*, volume 139, chapter 2, pages 29–49. SPIE Press.