

Université Paris Diderot
Département Histoire et Philosophie des Sciences

Master LOPHISS – SPH
(Logique, Philosophie, Histoire, Sciences Sociales)

Mémoire de Master 2 « Recherche »

La naissance de l'optique quantique 1956 – 1964

présenté par

Gautier DEPAMBOUR

Soutenu le 03 juin 2019

Devant le jury composé de :

Olivier Darrigol (Directeur de recherche au CNRS, directeur du mémoire)
Alain Aspect (Professeur à l'Institut d'Optique)
David Aubin (Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie)

Sommaire

Résumé	4
Abstract	5
Remerciements	6
Chronologie des principaux événements	7
Introduction	8
1 Le concept de photon et les expériences de Hanbury Brown et Twiss	16
1.1 Une brève histoire du concept de photon	16
1.2 Les expériences de Hanbury Brown et Twiss	18
1.2.1 Quelques mots sur Hanbury Brown (1916 - 2002)	19
1.2.2 Les expériences d'interférométrie en astronomie	21
1.2.3 Des quasars aux quanta : la découverte de l'effet Hanbury Brown - Twiss	29
1.3 La controverse autour de l'effet HBT	33
1.3.1 L'expérience de Jànossy	33
1.3.2 L'expérience de Brannen et Ferguson	35
1.3.3 La réponse d'Edward Purcell	36
1.3.4 Le dénouement	42
1.4 Le photon : un concept à risque	45
1.5 Résumé et perspective	46
2 Le concept de cohérence et l'invention du laser	48
2.1 Un peu d'histoire	48
2.1.1 Quelques mot sur Emil Wolf (1922 - 2018)	48
2.1.2 L'évolution de la notion de cohérence	49
2.1.3 Du maser au laser	53
2.2 La première Conférence de Rochester (1960)	56
2.2.1 Organisation de la Conférence	56
2.2.2 Contenu de la Conférence	58

2.2.3	Les réserves de Roy Glauber	60
2.3	Quel serait l'effet HBT pour le laser ?	61
2.3.1	Quelques mots sur Leonard Mandel (1927 - 2001)	61
2.3.2	L'hypothèse de Wolf et Mandel	62
2.4	La Conférence d'Electronique Quantique de Paris (1963)	64
2.4.1	Présentation générale de la Conférence	64
2.4.2	L'exposé de Wolf	65
2.4.3	L'exposé de Mandel	66
3	Roy Glauber et la naissance de l'optique quantique	68
3.1	Quelques mots sur Glauber (1925 - 2018)	69
3.2	Les origines de la théorie de Glauber	70
3.3	1963, <i>annus mirabilis</i> de l'optique quantique	72
3.3.1	Une nouvelle théorie de la photodétection	72
3.3.2	Définition de la cohérence selon Glauber	77
3.3.3	Naissance des états cohérents	79
3.3.4	En guise de résumé des travaux de 1963	83
3.3.5	Début de la controverse semi-classique/tutti quantique	84
3.4	L'Ecole d'été des Houches de 1964	89
3.5	Pourquoi n'y a-t-il pas eu de Glauber avant Glauber ?	93
	Conclusion	95
	Bibliographie	98

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de comprendre comment l'optique quantique, ce domaine de la physique qui décrit le rayonnement et son interaction avec la matière de façon quantique, a pu émerger au début des années 1960. A cette époque, la vision ondulatoire classique de la lumière dominait, et l'électronique quantique était en plein essor du fait de guerres successives et de l'intérêt des militaires américains pour le radar. J'étudierai deux événements scientifiques majeurs : les expériences de Hanbury Brown et Twiss, ainsi que le développement du laser, qui témoignait d'une physique largement axée en Amérique sur les prototypes, et qui a marqué l'apparition d'une nouvelle source de lumière très particulière. Je montrerai que ces deux événements furent chacun à l'origine de deux importantes controverses. La première a concerné les résultats de l'une des expériences de Hanbury Brown et Twiss, celle de 1956, qui a mis en évidence des corrélations entre temps d'arrivée de photons (pourtant supposés indépendants) dans des photodétecteurs séparés dans l'espace – ce qui a amené les physiciens à interroger le concept même de photon. La seconde a porté sur la cohérence exceptionnelle du laser, que des physiciens comme Emil Wolf, Leonard Mandel et Roy Glauber ont cherché à caractériser. Contrairement aux deux premiers, Glauber a eu l'intuition que le laser ne manifesterait pas de corrélation de type Hanbury Brown et Twiss. Ses réflexions à propos de l'effet HBT appliqué au laser l'emmenèrent vers une nouvelle théorie de la cohérence, dans laquelle il donna notamment une description intégralement quantique du processus de photodétection. Il envisagea alors des corrélations de mesures de champ entre n points de l'espace-temps, ce qui l'amena à une nouvelle définition de la cohérence lui permettant de rendre compte à la fois de la lumière issue des sources thermiques et de la lumière laser. De sa théorie émergeaient naturellement les états dits « cohérents », caractéristiques des champs totalement cohérents (comme le laser idéal) dans le sens de la nouvelle définition de la cohérence. Les deux articles de Glauber contenant sa nouvelle théorie, et qui furent publiés en juin et en septembre 1963, marquèrent la naissance de l'optique quantique. Glauber présenta également ses travaux lors d'un congrès international important, la Conférence d'électronique quantique de Paris (février 1963), soutenue financièrement par les militaires. C'est lors de cet événement qu'éclata une sérieuse controverse entre lui ainsi que Wolf et Mandel, tous deux attachés à la description classique du rayonnement – une controverse qui allait s'étendre sur au moins deux décennies.

Mots-clés : optique quantique ; optique classique ; photon ; cohérence ; expériences de Hanbury Brown et Twiss ; interférométrie d'intensité ; radioastronomie ; effet HBT ; maser ; laser ; fonction de corrélation ; état cohérent ; théorie quantique de la cohérence ; Hanbury Brown (Robert) ; Wolf (Emil) ; Mandel (Leonard) ; Glauber (Roy).

Abstract

The aim of this dissertation is to understand how quantum optics, the field of physics that describes radiation and its interaction with matter in a quantum way, emerged in the early 1960s. At that time, the classical undulatory conception of light prevailed and quantum electronics was booming owing to the successive wars and the US military's interest in radar technology. Two major scientific events will be studied: the Hanbury Brown and Twiss experiments and the development of the laser, which not only exemplified a prototype-based physics in the United States of America but also marked the emergence of a very special new light source. It will be shown that these two events were each at the origin of a serious controversy. The first controversy concerned the results of the Hanbury Brown and Twiss experiments of 1956, which revealed correlations between the arrival times of (supposedly independent) photons in photodetectors separated in space –which brought the physicists to examine the very concept of photon. The second controversy is related to the exceptional coherence of the laser, which physicists like Emil Wolf, Leonard Mandel and Roy Glauber sought to characterize. Unlike the first two, Glauber had the intuition that the laser would give no Hanbury Brown and Twiss-type correlation. His reflections about the HBT effect in the case of laser light led him to a new theory of coherence, in which he gave a fully quantum-theoretical description of the photodetection process. He then considered correlations of field measurements at n space-time points, and this led him to a new definition of coherence covering thermal sources as well as laser light. This theory naturally included the "coherent states", for which the field is completely coherent according to the new definition (as it would be in an ideal laser). Glauber's two relevant papers published in June and September 1963 marked the beginning of quantum optics. Glauber also presented his work at a major international congress, the Quantum Electronics Congress in Paris (February 1963), sponsored by the military. During this event, a serious controversy broke out between him and Wolf and Mandel, both attached to the classical description of radiation –a controversy that went on over at least two decades.

Key-words: quantum optics; classical optics; photon; coherence; Hanbury Brown and Twiss experiments; intensity interferometry; radioastronomy; HBT effect; maser; laser; correlation function; coherent state; quantum theory of coherence; Hanbury Brown (Robert); Wolf (Emil); Mandel (Leonard); Glauber (Roy).

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement Olivier Darrigol, qui s'est toujours rendu très disponible pour m'aider et qui m'a apporté de précieux conseils tout au long de mes recherches et de la rédaction de ce mémoire : ce fut un réel plaisir de travailler sous sa direction.

Je remercie vivement Alain Aspect pour son accueil à l'Institut d'Optique et pour toutes nos discussions très instructives sur l'histoire de l'optique quantique. J'ai été très honoré par son intérêt pour mon travail et par son souci de l'enrichir, notamment à travers les échanges passionnants que nous avons eus par mail.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à Claude Cohen-Tannoudji qui m'a accordé de son temps pour me faire partager ses souvenirs : notre rencontre à l'ENS en présence d'Alain Aspect restera pour moi un moment mémorable.

Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance à Christian Bordé et Philippe Grangier, qui m'ont ouvert les portes de leur bureau à l'Observatoire de Paris et à l'Institut d'Optique.

Je tiens aussi à remercier Antoine Browaëys pour la discussion que nous avons eue par Skype, et encore une fois pour son exceptionnel cours d'Optique quantique, que j'ai suivi il y a maintenant plus d'un an et qui m'a apporté de solides bases théoriques.

Un grand merci également à Suzanne et Michel Faye pour leur indéfectible soutien, ainsi qu'à Igor Dotsenko pour ses précisions sur la photodétection et les différents types de source de lumière.

Je remercie sincèrement Jason Harvey, bibliothécaire au Département de Physique et d'Astronomie de l'Université de Rochester (New York), pour son aide et sa gentillesse, ainsi que Valerie Glauber Fleishman et Jeffrey Glauber, la fille et le fils de Roy J. Glauber, qui m'ont autorisé à consulter la grande interview de leur père, d'une très grande richesse, conservée par l'AIP (*American Institute of Physics*).

Enfin, je remercie chaleureusement les membres du jury, Olivier Darrigol, Alain Aspect et David Aubin, pour leur présence à la soutenance et leur intérêt pour mon sujet.

Chronologie des principaux événements

1954

Mise au point du premier maser par Charles Townes
Article de Wolf introduisant la fonction de cohérence mutuelle

1956

Expérience de Hanbury Brown et Twiss en laboratoire dans le domaine optique

1956 – 1958

Controverse autour de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss

1960

Première Conférence à Rochester
Mise au point du premier laser par Theodore Maiman

1961

Article de Mandel et Wolf prédisant des corrélations entre fluctuations d'intensité pour le laser

1963

Parution des deux articles de Glauber donnant les fondements théoriques de l'optique quantique

Troisième Conférence internationale sur l'électronique quantique, à Paris ; début de la controverse entre Glauber et Wolf/Mandel

1964

Ecole d'été des Houches consacrée à l'optique quantique

Introduction

Contexte historique

1963, c'est l'année du premier album des Beatles, du premier single des Rolling Stones, du discours de Martin Luther King contre le racisme intitulé « I have a dream », de l'instauration du « Téléphone rouge » reliant les Etats-Unis et l'URSS, du traité de l'Elysée signé par Charles de Gaulle et Konrad Adenauer, de la mort d'Edith Piaf, et de l'assassinat de John Fitzgerald Kennedy à Dallas. De façon plus confidentielle, c'est aussi l'année où de multiples événements marquèrent les débuts de l'optique quantique.

L'optique quantique est une branche de la physique, à la fois théorique et expérimentale, qui décrit la lumière et ses interactions avec la matière à l'aide de la physique quantique. Son apparition constitua une révolution intellectuelle dans notre compréhension de la lumière, dès lors envisagée via des méthodes inspirées de la théorie quantique des champs.

Rappelons qu'il existe trois façons de représenter les interactions entre la matière et le rayonnement : classique, semi-classique, et quantique. Dans le cadre exclusivement classique, l'atome est considéré comme un dipôle électrique, et la lumière comme une onde électromagnétique. Nous ne nous préoccuperons pas de cette interprétation, dans la mesure où la matière a été définitivement quantifiée avec l'avènement de la mécanique quantique au début du XXe siècle. Dans le cadre semi-classique, la lumière est toujours considérée comme un champ électromagnétique classique mais la matière, elle, est quantifiée. Enfin, dans le cadre quantique, la lumière *et* la matière sont toutes deux envisagées sous un angle quantique¹. Cette représentation intégralement quantique caractérise précisément l'optique quantique².

1. Dans ce mémoire, les termes « classique » et « quantique » se référeront toujours à la lumière, la matière étant d'emblée supposée de nature quantique. De plus, l'adjectif « classique » se rapportera uniquement à la lumière, tandis que l'adjectif « semi-classique » intégrera la lumière *et* son interaction avec la matière.

2. Présentée comme telle, l'expression « optique quantique » n'est pas ambiguë. Néanmoins, la prudence reste de mise, car celle-ci est historiquement apparue avant même que le champ *et* son interaction avec la matière soient traités simultanément de façon quantique, en 1963. Par exemple, elle apparaît dans la première édition de l'ouvrage d'optique classique de Max Born et Emil Wolf *Principles of Optics* (Born and Wolf 1959) pour désigner le titre d'un éventuel prochain livre dans lequel les auteurs espèrent pouvoir revenir au système d'unités CGS. Cet emploi apparaît donc très anecdotique et, surtout, ne fait

Mais revenons quelques années en arrière pour donner d'importants éléments de contexte. A la fin des années 1950, deux grands bouleversements sont survenus en optique. Le premier a consisté en une expérience menée par les physiciens Robert Hanbury Brown et son collègue Richard Q. Twiss, en 1956. Celle-ci a permis la mise en évidence de corrélations alors inexplicables entre des temps d'arrivée de photons issus d'une même source (thermique) au niveau de deux photodétecteurs séparés dans l'espace. En d'autres termes, les photons présentaient une tendance à être détectés en même temps, par paires, à deux endroits distincts : c'est ce qui s'est appelé l'« effet HBT ». Ce phénomène paraissait d'autant plus étrange que deux photons étaient par définition indépendants l'un de l'autre, ce qui interdisait a priori de telles corrélations.

Le deuxième bouleversement est bien plus connu, car il a désormais une influence tout à fait considérable sur la technologie et sur notre vie quotidienne : l'invention du laser, en 1960. C'était six ans après son prédécesseur dans le domaine des micro-ondes, le maser, qui n'aurait peut-être pas vu le jour sans les recherches sur le radar micro-onde dans le domaine militaire, comme le souligne l'historien des sciences Paul Forman :

The Radiation Laboratory at MIT with its nearly 500 physicists took a third of all the money the OSRD³ spent through universities. These physicists-turned-engineers, together with at least an equal number in several of the leading industrial research laboratories, created microwave radar -and took it with them when returning to research after the war. The extremely rapid rise of research and publication in microwave spectroscopy would not have been possible otherwise.⁴

C'est dans ce contexte scientifique, axé sur le développement de prototypes à vocation militaire⁵, qu'est né le laser. Celui-ci apparaissait comme une toute nouvelle source de lumière qui, contrairement aux sources thermiques, était tout à la fois très directionnelle, très monochromatique, et très cohérente – ce qui signifie en particulier qu'il était très

pas référence au traitement quantique du champ. De façon générale, l'expression « optique quantique », peu utilisée avant 1963, n'avait pas le même sens avant et après les travaux de Roy J. Glauber, comme me l'expliquait Alain Aspect : « Je pense qu'il y avait une confusion. Avant Glauber, quand on parlait d'optique quantique, on voulait parler des propriétés quantiques de la matière. Le champ n'était pas quantifié, donc le vocabulaire « optique quantique » était inapproprié. » (Aspect 2019). J'indiquerai plus tard dans le mémoire (dans la partie consacrée à l'École d'été des Houches, au chapitre 3) comment est née l'expression « optique quantique » dans le sens actuel, que j'ai spécifié dans le texte.

3. il s'agit de the *Office of Scientific Research and Development*, une ancienne agence américaine (1941-1946) destinée à organiser la recherche scientifique avec une perspective militaire.

4. « Le Radiation Laboratory au MIT, avec ses presque 500 physiciens, a pris un tiers de l'argent que l'OSRD a dépensé par l'intermédiaire des universités. Ces physiciens-devenus-ingénieurs, accompagnés d'au moins autant de personnes dans plusieurs des principaux laboratoires de recherche industrielle, ont créé le radar micro-onde - et ont pris celui-ci avec eux quand ils se sont reconvertis à la recherche après la guerre. L'accroissement extrêmement rapide des recherches et des publications en spectroscopie micro-onde n'aurait pas été possible d'une autre manière. » (Forman (1987), p. 202).

5. Ce type de recherches en physique s'appelle « device physics ». Voir à ce propos Bromberg (2006).

facile de produire des interférences, même avec de très grandes différences de marche.

Enfin, il convient de souligner un dernier point de contexte, qui s'apparente à un état d'esprit : dans les années 1950, les physiciens qui travaillaient dans le domaine de l'optique adoptaient une vision classique (c'est-à-dire ondulatoire) du champ, car celle-ci leur apparaissait suffisante pour décrire les phénomènes connus. Si la théorie quantique des champs était abondamment utilisée en physique des hautes énergies, qui se trouvait alors en pleine expansion⁶, personne avant le début des années 1960 n'envisageait de l'appliquer dans le domaine de l'optique à basse énergie, et l'optique théorique se plaçait toujours sous l'égide des équations de Maxwell.

Motivation et état de l'art

Dans ce contexte dominé par la description classique de la lumière, il est intéressant d'étudier du point de vue de l'histoire des idées comment ce nouveau domaine de la physique a pu naître dans un environnement qui ne lui était a priori pas favorable. C'est là une belle occasion de comprendre en quoi l'évolution des techniques a eu une influence sur l'évolution des concepts employés pour décrire le rayonnement. Nous verrons que la naissance de l'optique quantique constitue également un bel exemple de transfert de connaissances entre deux domaines différents de la physique : en l'occurrence, elle marque un moment où des méthodes de théorie quantique des champs ont commencé à investir le domaine de l'optique.

Ensuite, il est naturel de s'intéresser aux débuts d'un champ de recherches qui connaît de nos jours un développement considérable, notamment à travers la cryptographie quantique, la téléportation quantique, ou encore l'ordinateur quantique. Les origines de l'optique quantique, datant du début des années 1960, acquièrent donc aujourd'hui une résonance particulière.

Mais ma motivation pour comprendre la naissance de ce domaine aujourd'hui en plein essor a décuplé lorsque j'ai constaté le manque de littérature à ce sujet. Cela m'a paru d'autant plus surprenant qu'il s'agit d'un épisode crucial dans l'histoire de l'optique, qui a radicalement modifié notre conception de la lumière. Le sujet est-il encore trop récent ? Ou trop complexe⁷ ? Toujours est-il que peu d'historiens des sciences en ont traité. Celle qui s'en est le plus rapprochée est assurément Joan Lisa Bromberg (1929 - 2015), historienne américaine de la physique et de la technologie (essentiellement au XXe siècle). Ses principaux articles autour de l'optique quantique sont :

- « Modelling the Hanbury Brown-Twiss Effect ; The Mid-Twentieth century revolution in optics ; A talk for HQ3 » ([Bromberg 2010](#)), centré sur l'impact des expériences de Hanbury Brown et Twiss sur le domaine de l'optique ;

6. A l'image du CERN, dont la Convention fut signée par les douze pays fondateurs en 1954.

7. Il est évident que la difficulté théorique intrinsèque du sujet peut créer un frein. C'est pourquoi je souhaite mettre mes connaissances en optique quantique au service de l'histoire !

- « Explaining the laser’s light : classical versus quantum electrodynamics in the 1960’s » ([Bromberg 2016](#)), polarisé sur les débats autour des propriétés de cohérence du laser ;
- et « Device physics vis-à-vis fundamental physics in Cold War America : the case of quantum optics » ([Bromberg 2006](#)), qui s’intéresse à l’influence du domaine militaire sur le développement de l’optique sur une période qui s’étend des années 1960 aux années 1980.

J’ajouterais à cette liste l’ouvrage de Bromberg intitulé *The laser in America, 1950-1970* ([Bromberg 1991](#)), qui évoque la naissance de l’optique quantique bien que le propos soit majoritairement dédié aux débuts du laser en Amérique. Notons enfin que l’historien des sciences brésilien Olival Freire Jr., spécialiste de l’histoire de la mécanique quantique, a également travaillé sur l’histoire de l’optique quantique, mais plutôt après 1965. Il a néanmoins co-écrit un article sur la période qui nous préoccupe, « The Concept of the Photon in Question : The Controversy Surrounding the HBT Effect circa 1956–1958 » ([Silva and Freire 2013](#)), qui retrace et analyse les débats autour de l’expérience de Hanbury Brown et Twiss en laboratoire (1956) ayant mis en évidence des corrélations entre photons.

On peut constater que ces études se concentrent essentiellement soit sur le développement du laser, soit sur les expériences de Hanbury Brown et Twiss, mais jamais directement sur la naissance de l’optique quantique. De plus, elles ne traitent pas toujours les points de physique en profondeur, et ne proposent aucune considération d’ordre mathématique. C’est pourquoi je souhaite ici aborder ce sujet de front, en n’hésitant pas en particulier à rentrer dans le détail de la physique et à écrire des équations (sans que cela ne devienne pour autant trop technique).

Constitution du corpus

L’avantage de travailler sur un sujet de physique en rapport avec les années 1950-1960 est qu’il est possible de se procurer tous les articles, livres et actes des conférences données à l’époque sans grande difficulté, en ligne comme dans les bibliothèques spécialisées.

La lecture des documents cités ci-dessus permet d’identifier que l’expérience de Hanbury Brown et Twiss (1956), l’invention du laser (1960) et les travaux théoriques de Roy Glauber de 1963⁸ constituent des étapes incontournables dans la genèse de l’optique quantique. De plus, à l’aide de cette littérature secondaire, il apparaît rapidement que les débats concernant l’expérience de Hanbury Brown et Twiss ainsi que les propriétés de cohérence du laser ont fait intervenir deux physiciens américains importants : Emil Wolf et son collègue Leonard Mandel. Ainsi, pour commencer la construction du corpus et mes recherches, j’ai d’abord sélectionné parmi les sources primaires⁹ :

8. Pour ses travaux fondateurs de l’optique quantique de 1963, Roy Glauber reçut le prix Nobel de Physique en 2005.

9. En ce qui concerne les sources primaires, j’ai essentiellement travaillé sur des articles publiés entre

- les trois articles de Hanbury Brown et Twiss sur leurs expériences éponymes, dont fait partie celle de 1956 que j’ai mentionnée ;
- les articles de Wolf et Mandel sur la période étudiée, écrits indépendamment ou à quatre mains ;
- et les deux principaux articles de Glauber de 1963, où celui-ci expose sa théorie quantique de la cohérence.

J’ai ensuite téléchargé un grand nombre de publications reliées d’un point de vue thématique et chronologique, puis je les ai triées par degré de pertinence en fonction du nombre de citations et de l’avancée des recherches.

Dans le reste des sources primaires, je n’ai finalement utilisé qu’un seul livre : *Principles of Optics* (1959). Tous les autres livres que j’ai pu consulter appartiennent à la littérature secondaire. En effet, le premier ouvrage d’optique quantique est – à ma connaissance – celui de John Klauder et George Sudarshan, qui n’a été écrit qu’en 1967 et publié l’année suivante (voir [Klauder and Sudarshan \(1968\)](#)). De tels livres d’optique quantique théorique contiennent fréquemment une introduction historique, mais celle-ci apparaît comme un « passage obligé » et demeure superficielle. Ainsi, je n’ai pas retenu ce type d’ouvrage qui synthétise des idées sans nécessairement montrer leur genèse et leur évolution.

En revanche, je me suis penché de près sur deux livres reproduisant les actes de deux conférences qui, comme je le montrerai dans le courant du mémoire, ont joué un rôle essentiel dans la naissance de l’optique quantique :

- les *Proceedings* de la Conférence d’Electronique quantique à Paris de 1963 ;
- et les *Proceedings* de l’Ecole d’été des Houches de 1964, qui contiennent en particulier un cours important de Glauber (voir [Glauber \(1965\)](#)).

Pour ce qui est des sources secondaires, outre celles que j’ai citées dans la section précédente, j’ai essentiellement recherché des articles et des ouvrages sur :

- l’évolution du concept de quantum de lumière, en particulier [Darrigol \(2014\)](#) ;
- l’évolution du concept de cohérence, en particulier [Brosseau \(2010\)](#) ;

J’ai également consulté des biographies¹⁰ et des vidéos de conférences disponibles en ligne, dont la conférence donnée par Glauber à l’occasion de son prix Nobel en 2005 ([Glauber 2005b](#)).

Enfin, une part importante de mon corpus est occupée par des interviews. J’ai constaté que le site de l’AIP (*American Institute of Physics*) regorgeait d’interviews d’éminents physiciens, comme celle d’Emil Wolf qui m’a apporté de précieuses informations¹¹ ([Wolf 1984](#)). Je me suis donc naturellement demandé s’il existait une interview équivalente de

1954 et 1964.

10. Notamment pour Hanbury Brown ([Davis and Lovell 2003](#)), Mandel ([Scully et al. 2005](#)) et Glauber ([Glauber 2005a](#)).

11. En particulier, comme nous le verrons, sur la Conférence internationale de Rochester de 1960, sur le laser et le thème de la cohérence, ainsi que sur le ressenti de Wolf vis-à-vis des critiques de Glauber à l’encontre de ses travaux.

Glauber. C'était bien le cas, mais celle-ci n'était pas disponible, car ni Glauber (décédé le 26 décembre 2018) ni ses héritiers n'avaient donné l'autorisation de rendre le document public¹². Après lui en avoir fait la demande, Valerie Glauber m'octroya une autorisation spéciale pour consulter cette interview¹³ qui, à l'heure actuelle, demeure inaccessible en ligne. Ce texte fut d'un intérêt crucial pour ce mémoire, car il m'a permis d'avoir accès à toute la réflexion de Glauber qui a précédé ses articles fondateurs de 1963. On y découvre en particulier comment Glauber s'est familiarisé avec les états du champ dits « cohérents », qui permettent de décrire la lumière d'un laser, et qui demeurent aujourd'hui primordiaux en optique quantique.

Mais je ne me suis pas limité aux interviews du passé : j'ai moi-même eu à cœur d'aller interroger de grands représentants actuels de l'optique quantique. J'ai ainsi eu la chance de faire la connaissance de Claude Cohen-Tannoudji à l'ENS¹⁴ (Cohen-Tannoudji 2019) qui a bien connu cette période des années 1960 et peut aujourd'hui en témoigner. J'ai également eu l'honneur de rencontrer Alain Aspect (Aspect 2019) ainsi que Philippe Grangier (Grangier 2019), qui m'ont tous deux fait part de leurs souvenirs et qui ont partagé avec moi leur impressionnante culture. J'ai pris grand plaisir à mener ces interviews, qui m'ont apporté de précieux renseignements aussi bien historiques que théoriques.

Problématique et plan du mémoire

L'émergence d'un nouveau domaine de la physique est la conjonction de facteurs variés, à la fois théoriques, expérimentaux, sociaux et institutionnels. Comment l'optique quantique¹⁵ est-elle née ? L'objectif de ce mémoire sera de traiter cette problématique dans toute sa richesse : principaux concepts impliqués dans cette naissance, avancées expérimentales majeures, importance de l'optique classique dans les années 1950, éléments biographiques des principaux acteurs, influence de la théorie quantique des champs, rapport au domaine militaire, et rôle des grandes conférences internationales de l'époque.

12. J'ai alors décidé de contacter le fils et la fille de Glauber par tous les moyens possibles : d'abord par Facebook et par des formulaires de contact sur les sites de leurs entreprises respectives, puis par des e-mails envoyés au hasard avec des adresses plausibles – sans succès. J'ai finalement trouvé les bonnes adresses personnelles de Jeffrey Glauber et de Valerie Glauber Fleishman en m'inscrivant sur le site *Contactout*. Cette fois ma demande fut bien réceptionnée.

13. Celle-ci se divise en deux grandes parties : l'une réalisée par l'historienne Katherine Russell Sopka en 1976-1977 (Glauber 1977), l'autre par Joan Lisa Bromberg en 1987 (Glauber 1987).

14. Je remercie vivement Alain Aspect d'avoir organisé ce rendez-vous !

15. J'insiste ici sur le fait que ce mémoire traite de la naissance de l'optique quantique *théorique*, entre 1956 et 1964. A moins que l'on considère les expériences de Hanbury Brown et Twiss comme appartenant au domaine de l'optique quantique, ce qui se trouve chronologiquement injustifié, les premières expériences d'optique quantique sont nées par définition après la mise en place des fondations théoriques, donc après 1963. En particulier, on peut affirmer que le laser a permis la réalisation d'expériences d'optique quantique en donnant notamment la possibilité de créer des paires de photons intriqués... mais il aura fallu attendre pour cela le perfectionnement de l'optique dite « non-linéaire » au début des années 1970.

Un accent particulier sera mis sur un problème que les articles de littérature secondaire ne pointent pas très clairement, et qui apparaît crucial pour comprendre l'origine de l'optique quantique : l'expérience de Hanbury Brown et Twiss et l'invention du laser ont-elles joué des rôles indépendants, ou bien se sont-elles intégrées dans une même réflexion théorique ?

Cette question pouvait suggérer de mettre en valeur au niveau du plan les expériences de Hanbury Brown et Twiss et le laser. Mais ne fallait-il pas plutôt envisager une histoire des idées, centrées sur l'évolution des concepts ? Après mûre réflexion, j'ai finalement décidé de ne pas séparer dans le plan que j'adopterais les composantes conceptuelles et expérimentales qui ont contribué à la naissance de l'optique quantique, car celles-ci n'ont cessé d'évoluer de pair. J'ai ainsi identifié deux concepts essentiels dans l'histoire qui va suivre, celui de photon et celui de cohérence, et j'ai choisi de traiter l'évolution du concept de photon en même temps que les expériences de Hanbury Brown et Twiss, ainsi que l'évolution du concept de cohérence en même temps que le laser – ce que je justifierai progressivement.

Dans le premier chapitre, j'exposerai la genèse de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss de 1956 et j'expliquerai en quoi celle-ci faisait intervenir le concept de photon, dont j'aurai au préalable rappelé l'évolution depuis son introduction par Einstein au début du siècle. Nous verrons que les résultats expérimentaux se sont mêlés aux aspects conceptuels et ont donné lieu à une controverse qui dura deux ans.

Dans le deuxième chapitre, je proposerai une brève histoire du concept de cohérence en mettant en valeur la contribution d'Emil Wolf, avant d'expliquer comment est né le laser et de montrer le rôle qu'a joué cette nouvelle source de lumière dans la naissance de l'optique quantique¹⁶. Ce rôle est bien sûr d'ordre théorique, puisque les physiciens théoriciens ont cherché à caractériser la cohérence du laser, mais aussi d'ordre socio-institutionnel, puisque le laser a engendré l'organisation de grandes conférences internationales qui contribuèrent à diffuser des idées nouvelles. Je soulignerai également l'importance des militaires, en expliquant pourquoi ils s'intéressaient de près au laser dont ils soutinrent financièrement le développement¹⁷.

Enfin, dans le dernier chapitre, je tâcherai de montrer comment Roy Glauber s'est ins-

16. Le laser faisait partie intégrante de l'électronique quantique, un champ de recherches alors axé sur le développement du maser et du laser, sur la spectroscopie micro-onde et les techniques de résonance magnétique. Le laser témoigne donc de l'apport de l'électronique quantique à l'optique quantique.

17. Au-delà du financement, Paul Forman soutient que les programmes de recherche scientifique en Amérique après la Seconde guerre mondiale étaient contrôlés par les militaires : « My thesis is that American physics, accelerating its historic quantitative growth, underwent a qualitative change in its purposes and character, an enlistment and integration of the bulk of its practitioners and its practice in the nation's pursuit of security through ever more advanced military technologies. » : « Ma thèse est que la physique américaine, tout en accélérant son expansion historique de façon quantitative, a subi un changement qualitatif dans ces objectifs et dans son caractère, un enrôlement ainsi qu'une intégration de la plupart de ses praticiens et de ses pratiques au service de la recherche de la nation pour la sécurité, à travers des technologies militaires toujours plus avancées. » (Forman (1987), p.150).

piré à la fois de l'effet HBT, de l'invention du laser et de son propre parcours scientifique pour établir les fondements théoriques de l'optique quantique, en renouvelant en profondeur les concepts de photon et de cohérence. Je soulignerai alors que l'apparition de sa théorie, intégralement quantique, fut à l'origine d'une longue controverse avec Emil Wolf et Leonard Mandel, qui demeurèrent tous deux fidèles à une interprétation semi-classique des phénomènes d'optique.

Je précise pour terminer que les dates figurant dans le titre du mémoire, 1956 - 1964, font référence respectivement à l'expérience de Hanbury Brown et Twiss et au cours de Glauber donné à l'Ecole des Houches, dans lequel il exposa en détail sa théorie. Ces deux événements délimitent, selon moi, la période qui a vu naître l'optique quantique, dont je vais maintenant retracer l'histoire.

Chapitre 1

Le concept de photon et les expériences de Hanbury Brown et Twiss

1.1 Une brève histoire du concept de photon

Planck et Einstein

Même si la conception corpusculaire de la lumière existait depuis bien plus longtemps, l'hypothèse des quanta lumineux n'a émergé qu'au début du XXe siècle. Le siècle précédent avait imposé l'idée que la lumière était de nature ondulatoire, notamment grâce aux travaux de Thomas Young, Augustin Fresnel et James Clerk Maxwell. Néanmoins, le problème du rayonnement du corps noir allait contribuer à introduire dans la physique l'hypothèse des quanta, avec les travaux de Planck puis d'Einstein¹.

Afin de rendre compte mathématiquement du rayonnement du corps noir, Planck modélisa celui-ci par un ensemble d'oscillateurs appelés « résonateurs », qui pouvaient échanger de l'énergie avec le champ électromagnétique. Planck s'intéressa alors à la situation d'équilibre entre les résonateurs et le rayonnement. Afin de connaître l'énergie moyenne d'un résonateur, il réalisa un calcul d'entropie inspiré des travaux de Boltzmann. Dans la perspective d'établir une relation entre l'entropie d'un résonateur et la probabilité des états possibles, il se vit contraint de faire intervenir des paquets d'énergie discrets, multiples d'une quantité fondamentale qu'il nomma h . Planck, qui ne comprenait pas lui-même la signification physique de tels éléments d'énergie, raconta dans une lettre postérieure qu'il s'agissait pour lui d'une simple hypothèse de calcul :

Briefly summarized, what I did can be described as simply as an act of desperation. [...] Boltzmann had explained how thermodynamic equilibrium is established by means of a statistical equilibrium, and if such an approach is applied to the equilibrium between matter and radiation, one finds that the continuous loss of energy into radiation can be prevented by assuming that

1. Pour plus de détails, voir [Kuhn \(1987\)](#) et [Darrigol \(2014\)](#).

energy is forced at the outset to remain together in certain quanta. This was purely a formal assumption and I really did not give it much thought except that no matter what the cost, I must bring about a positive result.²

Il faut remarquer que, malgré la grande originalité que représente l'introduction d'énergies discrètes en physique, le raisonnement de Planck demeure purement classique. La rupture est donc véritablement intervenue avec Einstein, qui a pleinement pris conscience de l'incompatibilité de la physique dite classique avec le rayonnement du corps noir. Cela le conduisit à postuler l'existence physique de quanta de lumière, ou « LichtQuanten »³. Il s'agit d'une hypothèse d'ordre ontologique, et non simplement mathématique : c'est pourquoi Einstein est souvent crédité de la découverte du caractère corpusculaire de la lumière. Grâce aux quanta de lumière, il donna notamment une explication de l'effet photoélectrique, ce qui lui valut le prix Nobel de Physique en 1921. Cependant, entre 1905 et les années 1920, faute de preuves expérimentales, cette hypothèse révolutionnaire ne fut pas reçue positivement par la majorité des physiciens. En particulier, l'effet photoélectrique n'était pas considéré comme une preuve de l'existence du quantum de lumière. Jugé trop en rupture avec l'électrodynamisme de Maxwell, celui-ci suscita même la défiance parmi d'éminents physiciens comme Planck, von Laue, Brillouin, Bohr, Lorentz, ou encore Sommerfeld.

Le quantum de lumière à l'épreuve de l'expérience

Une première tentative de preuve expérimentale de la nature corpusculaire de la lumière fut entreprise par le physicien britannique Geoffrey Taylor en 1909. Son expérience se fondait sur les travaux de J.J. Thomson⁴, qui avait établi une théorie dans laquelle l'énergie lumineuse ne serait pas répartie uniformément au niveau du front de l'onde, mais au contraire suivant certaines quantités d'énergie d'autant plus éloignées spatialement les unes des autres que l'intensité de la lumière était faible. De cette théorie émanait une conséquence potentiellement observable : « Sir J.J. Thomson [...] suggested that if the intensity of light in a diffraction pattern were so greatly reduced that only a few of these indivisible units of energy should occur on a Huygens zone at once the ordinary

2. « En résumé, ce que j'ai fait peut être simplement décrit comme un acte de désespoir. Boltzmann avait expliqué comment l'équilibre thermodynamique est établi au moyen d'un équilibre statistique, et si l'on applique une telle vision à l'équilibre entre la matière et le rayonnement, il s'avère qu'on peut s'affranchir de la perte continue d'énergie dans le rayonnement en supposant que l'énergie est d'emblée contrainte de rester confinée dans certains quanta. C'était une hypothèse purement formelle, et je n'y ai vraiment pas prêté tant d'attention si ce n'est que, quel qu'en soit le prix, je devais en sortir un résultat positif. » (Max Planck, dans une lettre à R.W. Wood datée du 7 octobre 1931, reproduite dans [Kragh \(2002\)](#), p.62

3. Voir [Einstein \(1905\)](#), p.144

4. Il s'agit bien de Joseph John Thomson, qui découvrit expérimentalement l'électron en 1897, et non William Thomson, qui furent tous deux contemporains.

phenomena of diffraction would be modified. »⁵. Seulement, dans son expérience, Taylor n’observa pas de modification du motif de diffraction même avec de très faibles intensités lumineuses. Ainsi, sans remettre en cause l’hypothèse d’Einstein, l’expérience de Taylor se solda par un résultat négatif, et ne fut pas particulièrement commentée.

Il fallut attendre les années 1920 pour que l’hypothèse des quanta soit prise au sérieux, grâce à une série d’expériences qui vinrent la corroborer. En particulier, l’expérience de Maurice de Broglie sur l’absorption des rayons X par des électrons (1921), celle de Walther Bothe et Hans Geiger, ainsi que celle d’Arthur Compton sur la diffraction des rayons X (1922), constituèrent de forts arguments en faveur des quanta lumineux⁶. Leur existence n’était alors plus mise en doute, même si Schrödinger, Wentzel et Beck rendirent compte peu après de l’effet photoélectrique et de la diffusion Compton sans faire appel à eux⁷.

Néanmoins, dans le domaine de l’optique à basse énergie, l’électrodynamisme de Maxwell suffisait amplement. Ainsi, dans les années 1950, les opticiens se contentaient d’une description classique du champ électromagnétique, sans avoir recours à l’hypothèse des quanta lumineux qui n’avait aucune conséquence observable. C’est dans ce contexte que sont intervenues les expériences de Hanbury Brown et Twiss qui, en interrogeant la pertinence du concept de photon en optique, allaient engendrer des remous.

1.2 Les expériences de Hanbury Brown et Twiss

L’histoire qui nous préoccupe va nous fournir un exemple saisissant d’interdisciplinarité entre la physique quantique et l’astronomie, avec les expériences de Hanbury Brown et Twiss dans les années 1950. Leur objectif initial était d’observer le rayonnement des mystérieuses étoiles radio, avant de basculer vers l’optique de laboratoire et l’étude de la corrélation de paires de photons. D’aucuns considèrent ces progrès en astrophysique comme les débuts de l’optique quantique, comme Marlan O. Scully et Suhail Zubairy : « The intensity correlation stellar interferometer of Hanbury Brown and Twiss was a driving force in ushering in the modern era of quantum optics »⁸. Les expériences de Hanbury Brown et Twiss ont non seulement ravivé le domaine de l’optique expérimentale, délaissé depuis plusieurs décennies, mais ont également constitué avec l’invention du laser la porte d’entrée vers l’optique quantique – en témoigne le titre même de l’ouvrage autobiographique de Hanbury Brown, *A personal story of the early days of radar, radio astronomy and quantum optics* (Hanbury Brown 1991), qui suggère par l’ordre des termes

5. « M. J.J. Thomson a émis l’hypothèse que, si l’intensité de la lumière dans un motif de diffraction était drastiquement réduite, de telle sorte que seuls quelques uns de ces indivisibles quantités d’énergie puissent parvenir simultanément dans une zone de Huygens, le phénomène ordinaire de diffraction s’en retrouverait modifié. » (Taylor (1909), p.114)

6. Voir le chapitre V de l’ouvrage Wheaton (1991).

7. Voir Schrödinger (1927), Wentzel (1926) et Beck (1927).

8. « L’interféromètre stellaire à corrélation d’intensité de Hanbury Brown et Twiss fut une force motrice dans l’inauguration de l’ère moderne de l’optique quantique. » (Scully and Zubairy (1999), p.97)

un lien d'ordre causal entre le développement de la radioastronomie et la naissance de l'optique quantique.

Je m'appuierai ici en particulier sur trois articles emblématiques des travaux de Hanbury Brown et Twiss au milieu des années 1950 ; ceux-ci rendent compte de la démarche qu'ils adoptèrent pour mener leurs travaux en radioastronomie :

- « A new type of interferometer for use in radio astronomy » ([Hanbury Brown and Twiss 1954](#)), qui présente une nouvelle méthode d'interférométrie fondée sur des corrélations dans des fluctuations d'intensité ;
- « Correlation between photons in two coherent beams of light » ([Hanbury Brown and Twiss 1956a](#)), qui témoigne de la découverte de corrélations entre temps d'arrivée de photons dans deux photodétecteurs distincts – l'effet « HBT » – lors d'une expérience en laboratoire effectuée l'année précédente ;
- et « A test of a new type of stellar interferometer on Sirius » ([Hanbury Brown and Twiss 1956b](#)), qui traduit l'application de l'interférométrie d'intensité à la détermination du diamètre angulaire d'une étoile *visible* très brillante, en l'occurrence Sirius.

L'objectif de cette partie est de montrer comment une nouvelle méthode d'interférométrie initialement développée pour l'astronomie s'est tournée vers le domaine de l'optique, avec pour conséquence une controverse acharnée centrée sur le concept de photon. Mais avant d'en venir aux expériences proprement dites, je souhaiterais présenter brièvement la vie de Hanbury Brown⁹, afin de comprendre la genèse de celles-ci.

1.2.1 Quelques mots sur Hanbury Brown (1916 - 2002)

Né en 1916 en Inde, Hanbury Brown passa sa jeunesse en Angleterre, où il fit des études de lettres classiques avant de se tourner vers les sciences. Il intégra le Brighton Technical College et obtint un diplôme d'ingénieur qui lui ouvrit les portes de la recherche dans le domaine des ondes radio, auquel il allait consacrer sa vie. Il débuta sa carrière à Orford Ness, à l'est de l'Angleterre, au sein d'un petit groupe qui mettait au point les radars – un champ de recherches en plein essor compte-tenu de l'imminence de la guerre.

Les premiers succès furent au rendez-vous. En août 1937, lorsqu'un avion fut pour la première fois équipé d'un radar, celui-ci parvint à détecter des bateaux dans la mer du Nord malgré des conditions météorologiques défavorables ; l'année suivante, un sous-marin fut également observé avec cette technique.

Au début de la guerre, Hanbury Brown fit partie d'un petit groupe qui avait pour mission d'installer des radars sur des chasseurs nocturnes ; mais cette opération fut un échec, car le système ne permit pas de repérer les avions de la Luftwaffe lors du bombardement de Londres pendant le Blitz, en automne 1940. Puis, après un grave manque d'oxygène survenu lors d'un test à haute altitude qui lui valut trois mois d'hôpital, et

9. On trouvera une plus longue biographie de Hanbury Brown dans [Davis and Lovell \(2003\)](#).

jusqu'à la fin de la guerre, Hanbury Brown œuvra à la réalisation d'un transpondeur – un système fondé sur les ondes radio permettant de repérer la position des avions – qui fut utilisé par le SOE¹⁰ et lors du Débarquement.

Après la guerre, précisément en 1949, Hanbury Brown eut l'opportunité d'intégrer en tant que post-doctorant l'Observatoire de Jodrell Bank, à l'Université de Manchester, spécialisé en radioastronomie. C'est là qu'il effectua au cours des années 1950 ses expériences les plus importantes (sur lesquelles je vais bientôt revenir en détail), fondée sur la méthode d'interférométrie d'intensité qu'il a lui-même inventée.

A la fin des années 1950, cette méthode ayant fait ses preuves, Hanbury Brown chercha des financements pour construire un interféromètre plus grand que celui installé à Manchester, tout en élaborant un programme de mesure des diamètres angulaires de dizaines d'étoiles. Un partenariat vit alors le jour entre les universités de Manchester et de Sidney afin de construire le nouvel instrument à Narrabri, à 550 km de la capitale australienne. A partir de 1962, Hanbury Brown participa directement sur place au montage du dispositif. Il rencontra de nombreux écueils, jusqu'aux plus improbables : « Colourful parrots swung from the catenary cables between the carriages and a central mast and chewed through the signal-carrying coaxial cables so that they had to be provided with a parrot-proof wrapping. Venomous black snakes coiled themselves amongst coils of black coaxial cables of comparable thickness ! »¹¹

Mais l'expérience et les qualités d'expérimentateur de Hanbury Brown lui permirent de surmonter toutes les difficultés, et l'interféromètre fut opérationnel dès 1963. L'année suivante, Hanbury Brown s'installa de façon permanente en Australie, où il poursuivit son programme de mesures jusqu'à son terme, en 1972 ; au total, il détermina le diamètre angulaire de 32 étoiles. Quelques recherches (notamment sur les rayons gamma) furent encore menées par la suite, mais les coûts de fonctionnement de l'interféromètre, trop élevés, conduisirent à son démantèlement en 1978. Dans le même temps, Hanbury Brown s'engagea dans l'élaboration d'un interféromètre de type Michelson – des progrès considérables ayant été réalisés dans ce domaine. Il suivit le projet de près, même s'il revint en Angleterre passer les dernières années de sa vie. Il s'est éteint le 16 janvier 2002.

Le plus important à retenir de cette courte biographie est le fait que Hanbury Brown n'est pas issu du domaine de l'optique. Gardons cette idée en tête, car elle explique peut-être pourquoi il s'attachera – comme nous le verrons – à défendre les résultats de ses expériences sans remettre celles-ci en cause, malgré les virulentes critiques qui furent proférées à son encontre.

10. Le SOE, *Special Operations Executive*, est un groupe d'intervention fondé par Churchill en 1940 appartenant aux services secrets britanniques, parallèlement au MI6.

11. « Des perroquets colorés se déplaçaient sur les câbles caténaux entre les chariots et le mât central, lacérant les câbles coaxiaux porteurs de signaux, de telle sorte que ces câbles ont dû être recouverts d'un matériau de protection à l'épreuve des perroquets. Des serpents noirs, vénéreux s'étaient enroulés autour des bobines de câbles coaxiaux noirs également et d'épaisseur comparable ! » (Davis and Lovell (2003), p.97)

1.2.2 Les expériences d'interférométrie en astronomie

Interférométrie de Michelson

Pour comprendre le contexte des expériences de Hanbury Brown et Twiss, je vais commencer par donner ici quelques éléments historiques concernant l'interférométrie de type Michelson appliquée à l'astronomie¹². Déjà dans la deuxième moitié du XIXe siècle, Hippolyte Fizeau émit l'idée qu'il serait possible de mesurer le diamètre angulaire des étoiles par interférométrie. Il envisageait pour cela de disposer deux fentes entre l'étoile étudiée et un télescope, afin d'obtenir des franges d'interférences par analogie avec l'expérience des fentes de Young. Il faudrait alors, pour trouver le diamètre angulaire, observer la visibilité des franges jusqu'à leur disparition, en fonction de l'écartement entre les fentes.

Albert Michelson fut le premier à appliquer cette méthode avec succès. En 1890, il parvint en effet à mesurer le diamètre angulaire des quatre satellites de Jupiter¹³. Il observa bien la disparition des franges à intervalles réguliers à mesure qu'il écartait les fentes. Or, en supposant l'astre sphérique et uniforme, l'écart angulaire θ entre les franges était directement lié à la distance entre les fentes par la relation $\theta = \frac{1.22\lambda}{d}$, avec λ la longueur d'onde de la lumière incidente et d la distance entre les deux fentes. Cela donnait donc une relation entre la visibilité des franges, la distance entre les fentes et le diamètre angulaire des satellites.

Il fallut attendre les années 1920 pour que Michelson et Francis Pease décident de construire un interféromètre plus grand afin d'étudier non plus des satellites, mais des étoiles. Le nouveau dispositif était constitué de quatre miroirs alignés : les deux aux extrémités, de position variable, jouaient le rôle des anciennes fentes. Ils renvoyaient la lumière vers les deux autres miroirs intercalés entre eux, immobiles, et qui réfléchissaient eux-mêmes les deux faisceaux vers un grand télescope. Ensuite, il était possible d'étudier au microscope les franges d'interférences obtenues. Au début des années 1920, Michelson et Pease réussirent à déterminer le diamètre angulaire de quelques étoiles, en accord avec les prédictions théoriques. Forts de ce succès, ils conçurent un interféromètre encore plus grand, dont la construction s'acheva en 1929. Celui-ci était destiné à étudier des étoiles moins brillantes et de plus petit diamètre angulaire ; néanmoins, à cause des perturbations atmosphériques¹⁴, seul le diamètre angulaire d'une étoile de la constellation d'Andromède a pu être mesuré.

L'interférométrie de type Michelson commençait ainsi à atteindre ses limites dans le cas des étoiles visibles de faible intensité et de petit diamètre angulaire. Comme nous le verrons, l'étape suivante sera franchie par Hanbury Brown et Twiss, qui inventèrent une

12. Pour plus de détails, voir [Vaughan \(1967\)](#)

13. Voir [Michelson \(1891\)](#)

14. La variation aléatoire de l'indice de réfraction de l'atmosphère entraîne des fluctuations dans la trajectoire des rayons et introduit des déphasages incontrôlables entre les bras de l'interféromètre. L'effet est particulièrement sensible dans le domaine optique. Il faudra attendre l'invention du laser et les progrès de l'optique adaptative dans les années 1970 pour y remédier.

nouvelle méthode d'interférométrie pour pallier les difficultés liées à l'interféromètre de Michelson. Mais avant d'en venir aux étoiles visibles, Hanbury Brown s'était concentré sur les sources radio.

Le mystère des "étoiles radio"

Les premières détections d'ondes radio furent réalisées dans les années 1930 par le physicien américain Karl Jansky, marquant ainsi les débuts de la radioastronomie :

Electromagnetic waves of an unknown origin were detected during a series of experiments on atmospherics at high frequencies. [...] These facts lead to the conclusion that the direction of arrival of these waves is fixed in space; i.e., that the waves come from some source outside the solar system.¹⁵

Mais ce n'est qu'après la guerre Seconde Guerre mondiale que ce domaine prit de l'ampleur. Lorsque Hanbury Brown intégra l'Observatoire de Jodrell Bank en 1949, il fit la rencontre d'un étudiant-chercheur, Cyril Hazard, avec qui il entreprit de transformer une très grande antenne de 218 pieds de diamètre¹⁶ en un radiotélescope, à l'époque le plus grand jamais utilisé. Une fois que le télescope fut prêt, les deux astrophysiciens établirent une cartographie radio du ciel. Ils remarquèrent en particulier une forte concentration d'émission radio dans toute la région de la Voie lactée – ce qui posait immédiatement la question de l'origine d'une telle émission. Mais ce n'est pas ce qui attira le plus leur attention : « But [the radio map] showed something else much more exciting : scattered all over the map were bright points of radio emission which didn't line up with the visible stars – the so-called 'radio stars'. »¹⁷

Ils décidèrent dans un premier temps d'observer la galaxie d'Andromède, afin de savoir si d'autres galaxies émettaient des ondes radio comme la Voie lactée : les mesures confirmèrent que l'intensité des émissions radio d'Andromède étaient équivalentes à celles de notre propre galaxie. Puis, ils orientèrent leur télescope vers la supernova déjà observée par Tycho Brahé en 1572, et identifèrent un rayonnement radio émanant de celle-ci. Toutes ces observations témoignaient de l'universalité d'un phénomène qui demeurait sans explication.

Pour percer ce mystère de l'astrophysique, alors qu'une centaine de sources radio étaient connues, il devenait urgent d'améliorer la résolution des dispositifs d'observation

15. « Des ondes électromagnétiques d'origine inconnue ont été détectées durant une série d'expériences sur les parasites de hautes fréquences. Ces observations mènent à la conclusion que la direction des ondes incidentes est fixée dans l'espace, donc que celles-ci proviennent d'une certaine source en dehors du Système solaire. » (Jansky (1933), p.1387)

16. Soit environ 66 mètres.

17. « Mais la carte radio montrait quelque chose de bien plus excitant : il y avait, disséminés sur l'ensemble de la carte, des points brillants issus de l'émission radio qui ne s'alignaient pas avec les étoiles visibles – c'était les soi-disant « étoiles radio ». » (Hanbury Brown (1991), p.99-100)

afin de connaître leur diamètre angulaire¹⁸. Cela devait permettre de mieux les caractériser et, en particulier, de savoir si celles-ci pouvaient être identifiées à des objets célestes visibles connus. C'est pourquoi Hanbury Brown envisagea dans un premier temps de réaliser des mesures d'interférométrie de type Michelson, à l'aide de deux antennes, afin de déterminer si ces sources radio étaient plutôt de la taille d'une étoile ou d'une galaxie :

The obvious way of measuring the angular size of a radio source was to build a simple radio interferometer, an instrument which compares the phase and amplitude of the 'signals' received from the source by two antennae whose separation can be varied. When the two antennae are close together the 'signals' which they receive are identical and are said to be 'mutually coherent'. But as their separation is increased the two 'signals' become progressively different until they have nothing in common ; they are then said to be 'mutually incoherent', and from a measurement of the antenna spacing at which that happens it is simple to calculate the angular diameter of the source.¹⁹

Le principe de l'interféromètre de Michelson allait donc peut-être permettre de mesurer les diamètres angulaires des sources radio. D'un point de vue théorique, la détermination de ceux-ci était directement liée à la perte de cohérence entre les deux faisceaux lumineux atteignant les deux antennes.

Mais un tel interféromètre de Michelson n'était pas sans poser de grandes difficultés en pratique. Le pouvoir de résolution de l'appareil étant proportionnel à la longueur d'onde du rayonnement recueilli et inversement proportionnel à la distance entre les deux antennes, l'améliorer nécessitait soit de se placer à des longueurs d'ondes plus courtes, soit d'agrandir la distance entre les antennes. Mais diminuer la longueur d'onde étudiée impliquait dans le même temps une réduction de l'intensité du signal, ce qui soulevait d'importants problèmes techniques et paraissait inenvisageable. L'autre solution consistait donc à adapter l'écartement entre les deux antennes en fonction de la résolution souhaitée. Mais Hanbury Brown calcula que si les sources étaient trop petites – par exemple, si elles faisaient la taille d'une étoile – la perte de cohérence devait se produire pour un écartement entre les deux antennes de plusieurs milliers de kilomètres. Or sur des distances supérieures à 50 km, l'apparition de perturbations sur la phase au niveau du

18. Les observations précédentes n'étaient en effet pas parvenues à résoudre les sources radio, même si elles avaient déjà permis d'affecter une borne supérieure de quelques minutes d'arc à leurs diamètres angulaires.

19. « La méthode la plus évidente pour mesurer la taille angulaire d'une source radio était de construire un simple interféromètre radio : un instrument qui compare la phase et l'amplitude des « signaux » en provenance de la source reçus par les deux antennes, dont on peut modifier l'écartement. Quand les deux antennes sont proches l'une de l'autre, les « signaux » qu'elles reçoivent sont identiques : on dit qu'ils sont « mutuellement cohérents ». Mais si l'on augmente l'écartement, les deux « signaux » deviennent de plus en plus différents jusqu'à ce qu'ils n'aient plus rien en commun : on dit alors qu'ils sont « mutuellement incohérents », et en mesurant l'espacement entre les antennes quand cela se produit, on peut simplement calculer le diamètre angulaire de la source. » (Hanbury Brown (1991), p.104)

câble ou de la liaison radio entre les deux antennes allaient probablement compromettre la comparaison des deux signaux. Il est vrai qu'à l'époque, rien ne pouvait indiquer que les sources radio seraient effectivement petites, et que leur observation nécessiterait de telles distances. Notons à ce propos que le terme d'« étoile radio » pour les qualifier était impropre, puisqu'il suggérait sans aucune garantie qu'elles possédaient la taille d'une étoile. Cette dénomination a-t-elle joué un rôle dans les choix de Hanbury Brown ? Toujours est-il que celui-ci, craignant un trop grand écartement des antennes et par suite un manque de résultats, ne tenta pas la mesure du diamètre angulaire des sources radio par interférométrie de Michelson, et se mit à chercher une méthode qui imposerait moins de contraintes. Après plusieurs semaines d'intense réflexion, il trouva la solution. Mais plus qu'une solution à un problème qui le préoccupait depuis longtemps, c'était une idée véritablement révolutionnaire, qui allait contre toute attente aboutir à une expérience de comptage de photons en laboratoire.

L'interféromètre d'intensité

What I discovered is that if the radiation received at two places is mutually coherent, then the fluctuations in the *intensity* of the signals received at those two places is [*sic*] also coherent.²⁰

Hanbury Brown émettait ainsi l'hypothèse que les corrélations d'intensité valaient aussi bien pour le signal que pour le bruit, ici caractérisé par les fluctuations d'intensité du signal. Comme je vais le montrer dans un instant, on peut prouver mathématiquement le lien entre ces corrélations et la cohérence mutuelle des signaux : celles-ci allaient donc pouvoir être utilisées pour mesurer le diamètre angulaire des sources radio, sans se préoccuper de la phase et de l'amplitude. L'idée d'« interféromètre d'intensité », que Hanbury Brown nomma lui-même ainsi, venait d'émerger.

Le principe fondamental de cet interféromètre consistait à éliminer les hautes fréquences dans les signaux, à l'aide de filtres rattachés aux antennes, afin de ne mesurer que des fluctuations d'intensité dans les basses fréquences et ainsi de ne pas avoir des temps de corrélation trop courts. Il s'agissait alors de calculer le produit des deux signaux obtenus, qui faisait bien apparaître un terme d'interférence, et qui était réalisé en pratique par un corrélateur suivi d'un intégrateur.

Certes, cette nouvelle méthode ne pouvait s'appliquer qu'à des sources suffisamment brillantes pour que les signaux filtrés soient exploitables, mais si cette condition était remplie, elle permettait de s'affranchir des perturbations liées à l'atmosphère²¹ et à la

20. « J'ai découvert que si la radiation reçue à deux endroits est mutuellement cohérente, alors les fluctuations dans l'*intensité* des signaux reçus à ces deux endroits sont également cohérentes. » (Hanbury Brown (1991), p.105)

21. Dans leur article détaillant le principe de l'interféromètre d'intensité, Hanbury Brown et Twiss montrent que cette nouvelle méthode permet de négliger les perturbations sur l'onde incidente engendrées par la traversée de l'ionosphère. Voir Hanbury Brown and Twiss (1954), p.678-680.

liaison entre les deux antennes :

Indeed it should be possible to eliminate the transmission link altogether and to record the low-frequency outputs of the two receivers on, say, magnetic tape. The records could be compared subsequently in a correlator and it seems that by the use of this technique a baseline of indefinite length could be used.²²

Regardons de plus près la description mathématique de l'interféromètre d'intensité donnée par Hanbury Brown lui-même²³. L'objectif est ici de souligner que la lumière est traitée de façon tout à fait classique, dont l'intensité est proportionnelle au carré du champ électrique. Considérons deux points P_1 et P_2 distincts et indépendants de la surface de l'étoile. Compte-tenu que la lumière est filtrée à l'aide d'un filtre passe-bande, Hanbury Brown ne considère qu'une seule composante de la décomposition en série de Fourier pour chaque onde issue des deux points, à savoir ω_1 et ω_2 . Il suppose de plus que l'intensité du courant en sortie des détecteurs A et B est proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente, soit pour le détecteur A :

$$i_A = K_A (E_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + E_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2))^2$$

où K_A est une constante de proportionnalité, E_1 et E_2 les amplitudes des champs électriques issus des deux points, et ϕ_1 et ϕ_2 des termes de phase. L'expression de l'intensité du courant en sortie de l'autre détecteur est équivalente, à ceci près qu'il faut ajouter des termes de différences de marche liée à l'écartement entre les antennes :

$$i_B = K_B \left(E_1 \sin \left(\omega_1 \left(t + \frac{d_1}{c} \right) + \phi_1 \right) + E_2 \sin \left(\omega_2 \left(t + \frac{d_2}{c} \right) + \phi_2 \right) \right)^2$$

Le développement de ces deux expressions fait intervenir des termes en $\cos(\omega_1 + \omega_2)$, que Hanbury décide d'éliminer parce que la fréquence $\omega_1 + \omega_2$ ne passe pas à travers le filtre passe-bande. Il reste alors :

$$i_A = K_A E_1 E_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2))$$

et

$$i_B = K_B E_1 E_2 \cos \left((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2) + \frac{\omega_1 d_1}{c} - \frac{\omega_2 d_2}{c} \right)$$

22. « En effet, il devrait être tout à fait possible de s'affranchir du lien de transmission et d'enregistrer les sorties basses fréquences des deux antennes sur une bande magnétique, par exemple. Les enregistrements pourraient être comparés ultérieurement dans un corrélateur et il semble que, grâce à cette technique, il serait possible d'utiliser une ligne de base de longueur indéfinie. » (Hanbury Brown and Twiss (1954), p.681)

23. Je reproduis ici le calcul effectué par Hanbury Brown dans Hanbury Brown (1974) : il témoigne en particulier du fait que, même dix ans après les travaux de Glauber, Hanbury Brown continuait de donner une interprétation semi-classique de son interféromètre.

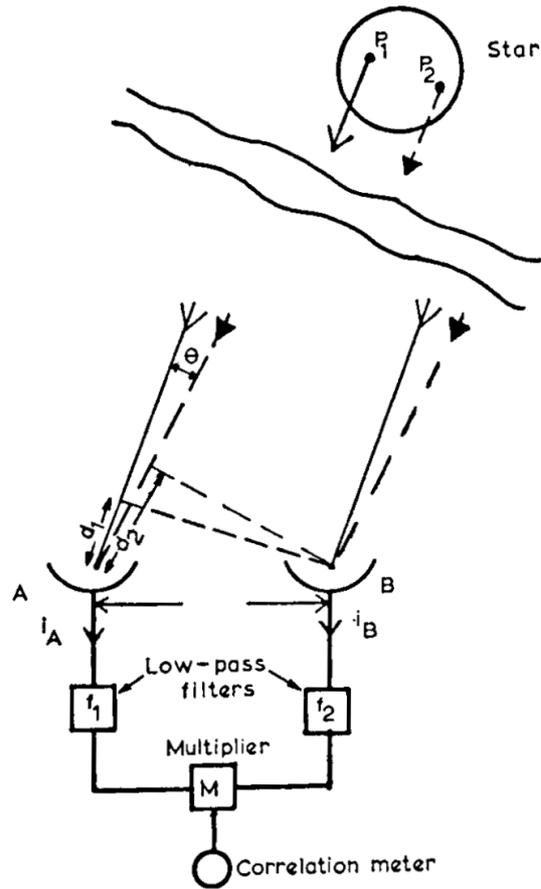


FIGURE 1.1: Schéma d'un interféromètre d'intensité pour la mesure du diamètre angulaire des étoiles radio. θ est l'angle formé par les faisceaux lumineux en provenance de deux points P_1 et P_2 distincts de la source. i_A et i_B sont les deux courants en sortie des antennes A et B, respectivement. Image extraite de [Hanbury Brown \(1974\)](#), p.27

Pour simplifier, Hanbury Brown suppose ensuite que la différence entre ω_1 et ω_2 est négligeable dans les termes spatiaux, donc que $\frac{\omega_1 d_1}{c} - \frac{\omega_2 d_2}{c} \approx \frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)$. En posant $\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$ et $\phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi$, la corrélation entre les deux signaux vaut donc :

$$c(d) = i_A i_B = K_A K_B E_1^2 E_2^2 \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \left[\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \cos\left(\frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)\right) - \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi) \sin\left(\frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)\right) \right],$$

c'est-à-dire en développant :

$$c(d) = K_A K_B E_1^2 E_2^2 \cos\left(\frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)\right) \cos^2(\Delta\omega t + \Delta\phi) - \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi) \sin\left(\frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)\right).$$

Or :

$$\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \sin(\Delta\omega t + \Delta\phi) = \frac{1}{2} \sin(2\Delta\omega t + 2\Delta\phi),$$

donc la moyenne temporelle de cette expression est nulle. De plus, la moyenne temporelle de $\cos^2(\Delta\omega t + \Delta\phi)$ vaut $1/2$. Il en résulte que la corrélation entre les deux intensités moyennée dans le temps est :

$$c(d) = \frac{1}{2} K_A K_B E_1^2 E_2^2 \cos\left(\frac{\omega}{c}(d_1 - d_2)\right).$$

Or $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ étant la longueur d'onde associée au rayonnement incident, et $d_1 - d_2 = d\theta$, où d est la distance entre les deux antennes, et θ l'angle entre les deux faisceaux de lumière incidents (voir figure 1.1). Le produit des deux intensités moyenné dans le temps, représentant la corrélation entre les deux signaux, vaut donc :

$$c(d) = \frac{1}{2} K_A K_B E_1^2 E_2^2 \cos\left(\frac{2\pi d\theta}{\lambda}\right)$$

Hanbury fait enfin remarquer que la corrélation totale s'obtient en intégrant cette dernière relation sur toutes les fréquences possibles, ainsi que sur toutes les paires de points P_1 et P_2 possibles de la source. Le calcul, reproduit dans [Hanbury Brown and Twiss \(1957\)](#), est nettement plus délicat. Il a été réalisé en collaboration avec l'astrophysicien britannique Richard Twiss, à qui Hanbury Brown avait fait appel notamment pour justifier d'un point de vue mathématique la possibilité de mesurer des signaux en provenance d'étoiles radio de faible amplitude. Comme Hanbury Brown, Twiss avait fait des recherches sur le radar pendant la guerre. Il possédait en plus une solide formation en mathématiques : il avait notamment passé avec succès le Tripos de Mathématiques, célèbre examen de l'université de Cambridge réputé pour sa difficulté, comme d'illustres prédécesseurs tels que Maxwell, Rayleigh, J.J. Thomson ou encore Lord Kelvin.

L'étude mathématique de l'interféromètre d'intensité mena à la conclusion que la mesure de la corrélation des fluctuations d'intensité des signaux en fonction de la distance

d entre les deux antennes pouvait permettre de remonter au diamètre angulaire des étoiles radio, du moins pour les plus brillantes d'entre elles. A l'été 1952, il fut possible de réaliser des mesures sur deux constellations, celle du Cygne et celle de Cassiopée, dont le rayonnement radio était déjà connu²⁴. L'une des antennes se trouvait naturellement à l'Observatoire de Jodrell Bank, tandis que l'autre, plus petite, pouvait être déplacée. Ainsi, l'équipe d'astrophysiciens put emmener l'antenne mobile de ferme en ferme, et réaliser des mesures en accroissant petit à petit l'écart avec celle restée à l'observatoire. Le corrélateur, quant à lui, se trouvait auprès d'une antenne : le signal en provenance de l'autre antenne était donc transmis via une liaison radio, accusant ainsi un certain retard qui devait être pris en compte. Finalement, il n'aura fallu qu'une distance entre les deux antennes de seulement quelques kilomètres²⁵ pour mesurer le diamètre angulaire des deux constellations : de 35" à 2'10" selon la direction de mesure pour la constellation du Cygne (de forme asymétrique), et 3.5 minutes d'arc pour celle de Cassiopée (de forme presque circulaire)²⁶. Ces résultats n'ont pas manqué de surprendre Hanbury Brown : « Whatever they might be, it was now quite certain that these two 'radio stars' were not stars! »²⁷. Finalement, les mesures auraient certainement pu être réalisées avec un interféromètre de type Michelson, car l'écartement des antennes n'aurait pas été déraisonnable. Telle est l'ironie du sort : s'il avait choisi de réaliser ses mesures avec un interféromètre de type Michelson, il aurait certainement obtenu les mêmes résultats. Cependant, il n'aurait peut-être pas inventé l'interféromètre d'intensité, et lui-même reconnaît a posteriori qu'il n'y avait pas de regret à avoir :

I must say I was disappointed that our elaborate preparations for very long baselines had proved to be completely unnecessary as I had been looking forward to operating an interferometer accross the Atlantic. [...] However the development of the intensity interferometry was not wasted.²⁸

Et pour cause : la méthode allait bientôt être transférée au domaine des ondes visibles, et conduire à des expériences qui devaient apporter un nouveau regard sur la lumière et, comme nous allons le voir, contribuer largement à la naissance de l'optique quantique. Ainsi, rétrospectivement, on peut dire que cette naissance a été conditionnée par un choix

24. Voir [Hanbury Brown et al. \(1952\)](#).

25. Sur le moment, Hanbury le regretta dans la mesure où l'étude aurait pu se faire facilement avec les méthodes classiques faisant intervenir l'amplitude et la phase des signaux, sans avoir à utiliser l'interféromètre d'intensité : « We have built a steam-roller to crack a nut! » (« On a pris un bazooka pour tuer une mouche! » ; cité par [Silva and Freire \(2013\)](#), p.12)

26. Données issues de [Hanbury Brown et al. \(1952\)](#).

27. « Quelle que soit leur nature, il est maintenant presque certain que ces deux « étoiles radio » ne sont pas des étoiles! » ([Hanbury Brown \(1991\)](#), p.107)

28. « Je dois dire que j'ai été déçu que nos minutieux préparatifs pour avoir de très longues lignes de base se soient avérées complètement inutiles, car j'avais hâte de mettre en route un interféromètre traversant l'Atlantique. [...] Néanmoins, le développement de l'interféromètre d'intensité n'a pas été vain. » ([Hanbury Brown \(1991\)](#), p.108)

de Hanbury Brown – celui de privilégier l’interféromètre d’intensité au détriment d’un Michelson – qui, sans connaissance préalable de la taille des « étoiles radio », se trouvait être assez arbitraire !

Une fois que les mesures furent faites sur ces deux constellations, Hanbury Brown élaborait un vaste programme de recherche pour étudier les sources radio, qu’elles se situent à l’intérieur ou à l’extérieur des galaxies. Une nouvelle surprise l’attendait ainsi que son équipe : certaines des nouvelles sources observées se trouvaient être bien plus petites que des galaxies, alors que l’intensité de leur émission radio était comparable à celle provenant de la constellation du Cygne, identifiée par un autre observatoire comme émanant de deux galaxies en collision. Les astrophysiciens comprirent qu’ils venaient de découvrir des objets célestes très particuliers, des sources radio à la fois très intenses et extrêmement lointaines (cette dernière information ayant été apportée par l’étude du redshift). Ces objets d’un type nouveau furent nommés « quasars », abréviation de « quasi-stellar ».

Tous ces succès confirmèrent l’efficacité de l’interférométrie d’intensité dans le domaine des ondes radio. Hanbury Brown et Twiss se demandèrent alors si le principe de cette méthode ne pourrait pas être étendu aux étoiles visibles. Cette idée allait les conduire à la découverte de l’effet qui porte désormais leur nom.

1.2.3 Des quasars aux quanta : la découverte de l’effet Hanbury Brown - Twiss

Utiliser l’interférométrie d’intensité pour l’étude des étoiles visibles présentait un avantage de taille : cette technique n’était en effet pas sensible aux milieux turbulents, dont l’atmosphère terrestre, qui empêchait jusqu’alors de déterminer le diamètre apparent des étoiles avec précision – un problème qui se posait déjà lors de l’apparition des premiers télescopes, au XVII^e siècle. Avec un interféromètre optique, pour mesurer le diamètre apparent de l’étoile la plus brillante connue, Sirius, il aurait fallu séparer les deux antennes d’environ dix mètres ; ce qui n’était pas si simple, non seulement à cause des turbulences liées à l’atmosphère terrestre, mais aussi à cause de l’extrême précision requise par un tel dispositif (de l’ordre de quelques micromètres). L’interféromètre d’intensité avait l’avantage de résoudre les deux problèmes à la fois : la précision ne devait être que de quelques centimètres, et les effets de la turbulence atmosphérique pouvaient être négligés.

Twiss établit les bases mathématiques de l’interféromètre d’intensité dédié à la lumière visible, et remarqua que les télescopes devaient être très larges pour que le système puisse fonctionner. C’est alors que lui et Hanbury Brown eurent une idée qui allait permettre au projet de se réaliser :

It took six months for the penny to drop and for us to realise that although we would need very large telescopes they could be very crude by normal astronomical standards. Their function would simply be to collect light from the star like rain in a bucket and pour it on to a detector ; there was no need

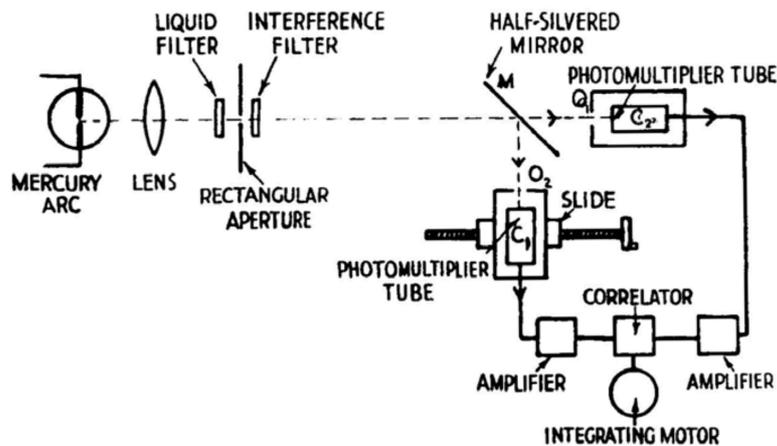


FIGURE 1.2: Schéma de l'expérience d'interférométrie d'intensité de Hanbury Brown et Twiss dans le domaine optique, réalisée en laboratoire. Image extraite de [Hanbury Brown and Twiss \(1956a\)](#), p.15.

to form a conventional image of the star.²⁹

Il s'agit là encore d'un moment charnière dans notre histoire, car si Hanbury Brown n'avait pas eu cette idée – à savoir qu'il n'y a pas besoin d'avoir une image complète de l'étoile pour déterminer son diamètre angulaire – l'interférométrie d'intensité n'aurait peut-être jamais vu le jour dans le domaine du visible.

Mais avant de mettre en œuvre cette méthode pour l'observation des étoiles, Hanbury Brown et Twiss devaient s'assurer que l'émission photoélectrique, qui convertit la lumière incidente en courant électrique et qui caractérise un photodétecteur, conserverait les corrélations. C'est pourquoi ils décidèrent dans un premier de temps de tester leurs idées en laboratoire³⁰. Je voudrais ici souligner que cette expérience, bien qu'elle s'inscrivît dans la continuité des expériences « grandeur nature » précédentes, a marqué une véritable rupture dans l'histoire de l'optique, en interrogeant le concept de photon ainsi que la nécessité d'interpréter ou non les corrélations observées en termes corpusculaires. En effet, l'utilisation de photomultiplicateurs à la place d'antennes appelait à interpréter les corrélations à l'aide des photons, intimement liés à l'effet photoélectrique. C'est ce qui transparaît immédiatement dans le titre de l'article décrivant cette expérience : « Correlation between photons in two coherent beams of light ».

L'objectif était donc de confirmer – ou d'infirmer – l'existence de corrélations dans les temps d'arrivée de paires de photons issus d'une même source – en l'occurrence, une

29. « Il a fallu six mois pour éclairer notre propre lanterne et réaliser que, même si nous avons besoin de très grands télescopes, ceux-ci pouvaient être très grossiers au regard des normes astronomiques habituelles. Leur fonction serait simplement de collecter de la lumière de l'étoile, comme de la pluie dans un seau, et de la transmettre à un détecteur ; il n'était pas nécessaire de former une image conventionnelle de l'étoile. » ([Hanbury Brown \(1991\)](#), p. 119)

30. Voir [Hanbury Brown and Twiss \(1956a\)](#).

lampe à mercure sous haute pression. La lumière émise par le mercure était focalisée par une lentille puis filtrée afin d'être rendue presque monochromatique, avant d'être divisée par une lame semi-réfléchissante en deux faisceaux, chacun aboutissant à deux photocathodes de deux photomultiplicateurs³¹ (voir figure 1.2). Les fluctuations des signaux produits par ces derniers étaient alors amplifiées puis multipliées à l'aide d'un corrélateur et d'un intégrateur (cette dernière étape d'intégration devant durer au moins une heure, afin d'éliminer les bruits parasites). Le montage apparaît comme une transposition de l'expérience précédente du domaine radio au visible, en modélisant en quelque sorte l'étoile par la lampe à mercure. De plus, l'un des photomultiplicateurs pouvait être translaté perpendiculairement à l'axe du faisceau incident lui correspondant, afin d'investiguer la cohérence spatiale des deux faisceaux. Ainsi, si les temps d'arrivée des photons étaient effectivement corrélés, le taux de corrélation devait être maximal lorsque les photomultiplicateurs étaient superposés l'un à l'autre suivant une symétrie par rapport au plan de la lame séparatrice.

Les résultats furent sans équivoque : lorsque les photomultiplicateurs étaient dans la configuration « superposés » par rapport à la lame séparatrice, il y avait bien des corrélations entre les temps d'arrivée des photons³². C'est la mise en évidence de ce qu'on appelle désormais l'« effet HBT ». De plus, à mesure que le photomultiplicateur mobile était déplacé par rapport au centre de l'axe, les corrélations s'atténaient, jusqu'à finalement disparaître. Hanbury Brown et Twiss concluaient ainsi :

This experiment shows beyond question that the photons in two coherent beams of light are correlated, and that this correlation is preserved in the process of photoelectric emission. Furthermore, the quantitative results are in fair agreement with those predicted by classical electromagnetic wave theory and the correspondence principle.³³

Il y a quelque chose de tout à fait surprenant dans cette citation. Cette expérience de Hanbury Brown et Twiss a provoqué – comme nous allons le voir – de longs débats sur la nature du photon, et pourtant, ceux-ci précisent bien que leurs résultats sont en accord avec la théorie classique ! En effet, dans le calcul des prédictions effectué dans le même article, la lumière est décrite par une onde électromagnétique, et le lien avec la photodétection ne repose que sur une hypothèse (semi-classique), qui est que la probabilité d'émission d'un électron est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde incidente. Dès lors, comment expliquer des réactions aussi vives, puisque tout semble conforme à la théorie classique ?

31. Voir [Hanbury Brown and Twiss \(1956a\)](#), p.2.

32. Bien que ces corrélations fussent plus faibles que celles prédites par la théorie, ce que les expérimentateurs mirent au compte de l'imperfection des instruments d'optique.

33. « Cette expérience montre indiscutablement que les photons de deux faisceaux de lumière cohérents sont corrélés, et que cette corrélation est préservée par le processus d'émission photoélectrique. De plus, les résultats quantitatifs sont en bon accord avec ceux prédits par la théorie classique des ondes électromagnétiques et le principe de correspondance. » ([Hanbury Brown and Twiss \(1956a\)](#), p.19)

La réponse est nichée dans l'interprétation des résultats de l'expérience. Les auteurs, me semble-t-il, se cantonnent dans leur conclusion à un cadre mathématique : ceux-ci ne font qu'insister sur l'accord numérique entre leurs données expérimentales et les prédictions calculées. L'article s'achève sur l'idée que la méthode devrait pouvoir s'appliquer aux mesures de diamètres angulaires visibles, ce qui est tout à fait logique compte-tenu que l'expérience a été menée dans cette perspective, mais sans interroger les conséquences des résultats obtenus sur le plan conceptuel. En effet, l'expérience n'a pas seulement prouvé l'efficacité d'une nouvelle méthode d'interférométrie. Elle a aussi permis, si l'on interprète le photomultiplicateur comme un compteur de photon, de mettre en évidence l'existence de corrélations entre temps d'arrivée de photons dans deux détecteurs différents. Mis à part dans le titre de leur article, les auteurs n'insistent pas sur ce point et ne cherchent pas à donner une explication de telles corrélations. Pourtant, c'est précisément cette découverte qui fut largement controversée. En effet, ce n'était pas seulement un phénomène étrange : c'était un phénomène a priori interdit, en vertu de cette citation de Paul Dirac aux allures de sentence, abondamment reprise par les détracteurs de Hanbury Brown et Twiss :

Each photon then interferes only with itself. Interference between two different photons never occurs.³⁴

Pourquoi les auteurs ne semblent-ils pas avoir prêté attention à ce problème ? Ne l'ont-ils pas entrevu en rédigeant leur article ? Se sont-ils contentés d'une conclusion propre à leurs objectifs initiaux afin de ne pas entrer dans une interprétation trop spéculative ? Toujours est-il que la découverte de l'« effet HBT » engendra un débat houleux qui allait bientôt apporter un nouveau regard sur le concept de photon.

Mesure du diamètre angulaire de Sirius

Avant d'en venir à ce débat, je souhaiterais refermer en bonne et due forme cette section consacrée à l'interférométrie d'intensité en mentionnant que le diamètre angulaire d'une étoile visible a bien été mesuré grâce à cette méthode³⁵, dans la foulée de l'expérience en laboratoire que je viens de décrire.

Afin de limiter la taille des deux miroirs qui collectaient la lumière et la redirigeaient vers leurs deux photodétecteurs respectifs, Hanbury Brown et Twiss choisirent l'étoile la plus brillante connue : Sirius, qui est l'étoile A de la constellation du Grand Chien. Ils s'assurèrent d'une part qu'ils prenaient bien en compte la contribution à l'intensité du courant liée au reste du ciel, et d'autre part que l'appareillage ne produisait pas de corrélations parasites (ce qu'ils vérifièrent en « remplaçant Sirius » par des lampes). Ces

34. « Chaque photon ne peut interférer qu'avec lui-même. Des interférences entre deux photons différents ne se produisent jamais. » (Dirac (1958), p.9). Dans un contexte de fentes de Young, comme c'était le cas chez Dirac, cette phrase est tout à fait justifiée.

35. Voir Hanbury Brown and Twiss (1956b).

précautions étant prises, ils effectuèrent des mesures en faisant varier l'espacement entre les deux miroirs de 2,5 m à 9,2 m, pendant plusieurs heures réparties sur environ cinq mois ! Les efforts de Hanbury Brown et Twiss furent récompensés, puisqu'ils observèrent que le coefficient de corrélation lié aux fluctuations des signaux en sortie des photodétecteurs décroissait en fonction de la distance séparant les deux télescopes. De même que pour l'expérience réalisée en laboratoire, les résultats étaient en adéquation avec les prédictions théoriques : ils mesurèrent pour Sirius un diamètre angulaire de $0.0068'' \pm 0.0005''$ alors que la théorie astrophysique prévoyait $0.0063''$ (sous certaines hypothèses, comme la circularité de l'étoile). Ainsi, même si la méthode ne pouvait s'appliquer qu'à des étoiles brillantes – à moins d'élargir les miroirs ou d'améliorer l'efficacité des photomultiplicateurs – le test était concluant et promettait un avenir radieux pour l'interféromètre d'intensité.

Ce succès venait donc renforcer les conclusions de l'expérience en laboratoire, puisque celles-ci avaient trouvé dans la mesure du diamètre angulaire de Sirius une application immédiate. L'histoire se poursuivra avec la construction de l'interféromètre de Narrabri, que j'ai mentionné plus haut... mais c'est ici que nous allons bifurquer vers l'optique quantique.

1.3 La controverse autour de l'effet HBT

1.3.1 L'expérience de Jànossy

Les expériences de Hanbury Brown et Twiss ont suscité une vive polémique, car de nombreux physiciens étaient convaincus que, si leurs résultats étaient justes, il faudrait revoir toute la théorie du photon. La controverse éclata lorsque deux physiciens de l'Université de Western Ontario à Londres, Eric Brannen et Harry Ferguson, publièrent les résultats de leur propre expérience, en contradiction avec ceux de Hanbury Brown et Twiss.

Mais avant d'en venir à eux, il faut mentionner l'existence d'une expérience antérieure³⁶(1955) qui les a inspirés. Une équipe du Centre de Recherche de l'Institut de Physique de Budapest menée par Lajos Jànossy décida de vérifier que des photons appartenant à deux faisceaux de lumière cohérente se trouvent chacun dans l'un de ces faisceaux, et non dans les deux à la fois – ce qui correspondait à leur propre interprétation de la mécanique quantique³⁷. Pour cela, ils utilisèrent une lame semi-réfléchissante

36. Il s'agit de l'expérience décrite dans [Ádám et al. \(1955\)](#).

37. Plus tard, Glauber s'en moquera : « There were people who claimed that the quantum theory was nonsense, and that part of the photon was going one way, another part of the photon was going the other way, and they were parts of a single photon, [that] is what was being detected. All of that turns out happily to be nonsense, and there were many people disturbed by the result, particularly a Hungarian, Jànossy, who had been trying for years to do experiments that would disprove the Copenhagen interpretation of quantum mechanics for photons. » : « Il y avait des gens qui affirmaient que la théorie quantique était

derrière laquelle se trouvaient deux photodétecteurs ainsi qu'un compteur de coïncidences, et comparèrent deux taux de coïncidences :

- celui obtenu avec 1 source de lumière cohérente en présence de la lame séparatrice ;
- et celui obtenu avec 2 sources de lumière incohérentes *sans la lame séparatrice*.

Or, les auteurs firent la distinction entre les « coïncidences systématiques » (liées à la source de lumière cohérente) et les « coïncidences aléatoires » (liées aux deux sources incohérentes). Alors, d'après leurs calculs statistiques, le nombre de coïncidences systématiques K_s – dont ils cherchaient à prouver ou à réfuter l'existence – devait être égal à $K_k - K_i$, où K_k et K_i sont les nombres de coïncidences respectivement dans le cas avec la source de lumière cohérente (où les coïncidences aléatoires s'ajoutent aux coïncidences systématiques), et dans le cas avec les deux sources de lumière incohérentes (où il n'y a que des coïncidences aléatoires). Rapidement, ils constatèrent que K_k et K_i étaient du même ordre de grandeur, bien que légèrement différents : mais cela était-il significatif ? Pour le déterminer, ils prirent en compte les fluctuations statistiques de ces quantités et montrèrent que, moyennant ces fluctuations, il n'apparaissait pas de coïncidences systématiques avec l'utilisation de la lumière cohérente. Selon eux, ce résultat était en parfait accord avec la mécanique quantique :

Wir haben also mit den obigen Messungen gezeigt, dass in Einklang mit den Voraussagen der Quantentheorie die in zwei kohärenten Lichtstrahlen auftretenden Photonen voneinander unabhängig sind oder zumindest, dass der allergrösste Teil dieser Photonen unabhängig ist.³⁸

Cette expérience me semble importante pour deux raisons : d'abord, si l'on en croit [Silva and Freire \(2013\)](#) p. 471, il est très probable que Hanbury Brown et Twiss en aient eu connaissance. Si tel est vraiment le cas, on ne peut donc qu'être impressionné par la capacité de Hanbury Brown et Twiss à accepter et à défendre les résultats de leur propre expérience en laboratoire, alors qu'ils devaient savoir qu'elle entraînait en contradiction non seulement avec les résultats d'une autre expérience, mais aussi avec une certaine interprétation de la mécanique quantique. Ainsi, dans ce contexte, on peut supposer que s'ils avaient tous deux fait leur carrière auparavant dans le domaine de l'optique, ils n'auraient peut-être pas donné autant de crédit à leur expérience, et n'auraient peut-être alors pas découvert l'effet qui porte leur nom. Mais plus encore, cette expérience

absurde, et qu'une partie du photon allait d'un côté, tandis que l'autre partie du photon allait de l'autre côté. Ces parties étaient des parties d'un seul photon, et ce sont elles qui étaient détectées. Tout cela s'est avéré être un joyeux délire, et il y avait beaucoup de gens perturbés par ces résultats : en particulier un Hongrois, Jánossy, qui avait tenté pendant des années de faire des expériences qui mettraient en défaut l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique pour les photons » ([Glauber 1987](#))

38. « Ainsi, avec les mesures ci-dessus, nous avons montré conformément aux prédictions de la mécanique quantique que les photons se manifestant dans deux faisceaux de lumière cohérente sont indépendants les uns des autres, ou du moins la plus grande partie de ces photons. » ([Ádám et al. \(1955\)](#), p.412-413)

a également constitué un prélude à celle de Brannen et Ferguson, qui a déclenché les hostilités, et que je vais maintenant présenter.

1.3.2 L'expérience de Brannen et Ferguson

Sans surprise, dès le début de leur article de 1956³⁹, Brannen et Ferguson mirent en exergue la contradiction entre les résultats de Hanbury Brown et Twiss, et ceux de Jànossy. Leur entreprise était double : d'abord, expliquer pourquoi Hanbury Brown et Twiss s'étaient selon eux égarés. D'emblée, ils les attaquaient frontalement : « We also feel that the Brown and Twiss experiment does not sufficiently reject the possibility that the correlation they observed in the 'photocathodes superimposed' position was due to rapid intensity fluctuations in the source. »⁴⁰. Mais l'objectif principal était surtout de montrer, à l'instar de Jànossy, la non-existence de corrélations entre les temps d'arrivée des photons.

Pour ce faire, Brannen et Ferguson montèrent une expérience similaire à celle de Hanbury Brown et Twiss, avec un arc de mercure sous haute pression générant une lumière rendue quasiment monochromatique par un filtre⁴¹, puis focalisée avec une lentille. En revanche, leur méthode de détection n'était pas tout à fait la même. Avec leurs photodétecteurs, au lieu de multiplier les fluctuations d'intensité (correspondant à un grand nombre de photons) de signaux intégrés dans le temps, ils comparaient des pulses produits par la détection de photons pendant un certain intervalle de temps, ce qui leur donnait un accès plus direct au comportement des photons individuels. Mais ce n'est pas tout : leur système leur permettait également d'introduire des retards dans les canaux de détection, afin d'étudier la cohérence temporelle de la lumière incidente, ainsi que de modifier la position d'un photodétecteur perpendiculairement au faisceau, de sorte à ce que les deux photodétecteurs puissent chacun « regarder » le même endroit ou deux endroits différents de la source.

Brannen et Ferguson suggéraient que les fluctuations d'intensité étaient incohérentes d'un point à l'autre de la source lumineuse, et par conséquent que si les deux photomultiplicateurs avaient été dirigés de façon à recueillir des photons en provenance de différents endroits de la source, aucune corrélation n'aurait été observée.

Brannen et Ferguson firent alors des mesures de corrélation dans tous les cas possibles : en introduisant des retards dans la détection ou pas, en faisant varier la position du photodétecteur mobile afin de balayer la source ou pas, en faisant varier l'intensité de la source ou pas... Jamais ils n'observèrent de variation significative du taux de coïn-

39. Voir [Brannen and Ferguson \(1956\)](#).

40. « Nous avons également l'impression que l'expérience de Brown et Twiss ne rejette pas suffisamment la possibilité que les corrélations qu'ils ont observées dans la configuration où les photocathodes sont « superposées » soient provoquées par de rapides fluctuations d'intensité au sein de la source » ([Brannen and Ferguson \(1956\)](#), p. 481)

41. Ils sélectionnèrent la même raie que Hanbury Brown et Twiss, à 435,8 nm.

cidences, et conclurent qu'il n'y avait aucune corrélation entre les temps d'arrivée des photons.

Certes, l'histoire montrera que ce résultat était erroné, et donnera raison à Hanbury Brown et Twiss. Néanmoins, on peut reconnaître la grande subtilité de la méthode de Brannen et Ferguson, qui sont parvenus à jouer sur un grand nombre de paramètres, et ainsi à réaliser des mesures très variées qui semblaient rendre la non-corrélation des photons d'autant plus incontestable. C'est probablement l'une des raisons pour lesquelles cette expérience a semé le trouble et engagé la polémique.

Hanbury Brown fut certainement l'un des premiers à réagir. Avant même la publication de l'article de Brannen et Ferguson en septembre 1956, voici ce qu'il écrivit en juin de la même année dans une lettre adressée à Brannen :

I would welcome the publication of your experimental results, but I would reluctantly advise that you should not draw the conclusion that they disprove the correlation observed by us. . . I, personally, would welcome seeing a paper published which says that my own work is wrong. . . ⁴²

Le débat sur la validité des résultats de Hanbury Brown et Twiss et sur la fiabilité des expériences de Brannen et Ferguson était lancé.

1.3.3 La réponse d'Edward Purcell

Quelques mois plus tard, en décembre, le physicien américain Edward Purcell – qui jouissait d'un certain prestige après avoir obtenu le prix Nobel quatre ans plus tôt – tenta de départager les deux camps en faveur de Hanbury Brown et Twiss, dans un article ⁴³ très court mais très dense ⁴⁴. En effet, Purcell s'engageait à justifier que non seulement Brannen et Ferguson ne pouvaient pas voir de corrélations avec leur montage, mais également que les résultats de Hanbury Brown et Twiss n'impliquaient pas de refonte de la mécanique quantique, bien au contraire : « The Brown-Twiss effect, far from requiring a revision of quantum mechanics, is an instructive illustration of its elementary principles.

42. « Bien que je me réjouisse de la publication des résultats de vos expériences, je vous conseille malgré tout de ne pas en tirer de conclusions qui réfuteraient la corrélation que nous avons observée... » (R. Hanbury Brown à E. Brannen, 5 juin 1956, dans les archives de Jodrell Bank, cité par [Silva and Freire \(2013\)](#) p. 468)

43. Voir [Purcell \(1956\)](#).

44. Avant même l'article de Purcell, Wolf avait préparé le terrain en démontrant à partir d'une théorie de la cohérence partielle que « the fluctuations in the instantaneous intensities at two arbitrary points in a stationary optical field are in general correlated » ([Wolf \(1957\)](#), p. 351 : « Dans un champ optique stationnaire, les fluctuations des intensités instantanées en deux points arbitraires sont en général corrélées »). Il faisait toutefois remarquer à la fin de cet article que, du fait de leur temps de résolution fini, les photodétecteurs mesuraient plutôt des intensités moyennées sur de courtes durées, et non des intensités instantanées.

» ⁴⁵. Etudions d'abord la démonstration de Purcell, avant de la commenter.

Détail de la démonstration de Purcell

Avant de considérer l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, Purcell fait une expérience de pensée en se plaçant dans le cas simple et idéal d'un faisceau de lumière presque monochromatique, suivi d'un photomultiplicateur idéal. Il s'intéresse alors aux éventuelles fluctuations dans le temps du taux de détection des photons de ce photomultiplicateur. En supposant que l'intensité de la source demeure constante, observera-t-on de telles fluctuations? La réponse apportée par Purcell est claire :

Now it will be found, even with the steadiest source possible, that the fluctuations in the counting-rate are slightly greater than one would expect in a random sequence of independent events occurring at the same average rate. There is a tendency for the counts to "clump". From the quantum point of view this is not surprising. It is typical of fluctuations in a system of bosons. ⁴⁶

Pour démontrer l'existence de ces fluctuations, Purcell suppose d'une part que la source s'étend sur une petite gamme de fréquences autour d'une fréquence ν_0 , et d'autre part que le champ électrique, qui est constant sur toute l'étendue du photomultiplicateur à un instant donné, peut varier dans le temps. Il affirme alors que les corrélations d'intensité du champ au niveau du photomultiplicateur entre deux instants t et $t + \tau$ est lié à la densité spectrale de la source suivant la relation ⁴⁷ :

$$\overline{I(t)I(t + \tau)} = \bar{I}^2(1 + |\rho|^2),$$

où ρ est la transformée de Fourier inverse de g ⁴⁸, et où les barres horizontales indiquent une moyenne temporelle sur plusieurs intervalles de temps de période τ .

Purcell fait ensuite l'hypothèse que la probabilité qu'un photon soit détecté pendant un temps dt est proportionnelle au carré du champ électrique et à un paramètre α constant qui dépend de l'expérience, c'est-à-dire :

$$P(\text{détection entre } t \text{ et } t + dt) \propto \alpha I dt.$$

45. « L'effet Brown - Twiss, loin d'appeler à une refonte de la mécanique quantique, est une illustration édifiante de ses principes élémentaires. » (Purcell (1956), p.1449)

46. « On trouvera alors que, même avec la source la plus stable possible, les fluctuations dans le taux de comptage sont légèrement plus grandes que celles attendues pour une série aléatoire d'événements indépendants se produisant au même taux moyen. Les clics ont tendance à « se regrouper ». D'un point de vue quantique, cela n'est pas surprenant. C'est typique des fluctuations dans un système de bosons. » (Purcell (1956), p.1449).

47. Dans l'article original, Purcell note P le carré du champ électrique au niveau du photomultiplicateur, et non I .

48. La transformée de Fourier inverse permet ici de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel.

Purcell déduit des deux relations précédentes⁴⁹ que les fluctuations du nombre de photons n_T détectés pendant une période T ⁵⁰ moyennées sur un grand nombre de périodes vérifient la relation :

$$\overline{n_T^2} - \overline{n_T}^2 = \overline{n_T}(1 + \alpha I \tau_0),$$

où $\tau_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} |\rho|^2 d\tau$, et avec $T \gg \tau_0$. Le temps τ_0 apparaît donc ici comme un temps de corrélation qui dépend directement de la forme de la distribution spectrale⁵¹.

Purcell s'attache alors à donner une explication à ces fluctuations en termes de photons, en invoquant leur caractère bosonique. En effet, le fait que les photons soient des bosons permet d'envisager la superposition des trains d'ondes qui leur sont associés puisque, n'étant pas soumis au principe d'exclusion, ils peuvent tous se trouver dans le même état quantique⁵². Ils pouvaient alors interférer, et par conséquent conduire à la détection simultanée de deux photons, ou « [...] four photons, or none, or something in between »⁵³.

Purcell en vient alors à l'expérience de type Hanbury Brown et Twiss, avec une lame séparatrice et deux photomultiplicateurs. Il considère désormais les nombres de photons détectés par chaque photomultiplicateur pendant une durée T fixée, respectivement notés n_1 et n_2 ⁵⁴. En reprenant la dernière relation obtenue pour chacun des photomultiplicateurs, Purcell obtient que les fluctuations de n_1 et n_2 (pris séparément) vérifient :

$$\overline{\Delta n_i^2} = \overline{n_i^2} - \overline{n_i}^2 = \overline{n_i} \left(1 + \frac{1}{2} \overline{n_i} \frac{\tau_0}{T} \right)$$

où $i = \{1, 2\}$. Il ne reste plus qu'à calculer le produit de Δn_1 et Δn_2 , qui représente la *corrélation* entre les fluctuations d'intensité relatives aux deux photomultiplicateurs. Si Purcell n'a jusqu'ici pas justifié mathématiquement ses dérivations, cette fois, le calcul est explicite. En connectant les deux photomultiplicateurs, l'expérience devient équivalente à l'expérience de pensée précédente avec un seul photomultiplicateur, qui compterait alors $n = n_1 + n_2$ photons pendant la durée T . Les fluctuations de n moyennées sur un grand nombre de périodes valent donc :

$$\overline{\Delta n^2} = \overline{n^2} - \overline{n}^2 = \overline{n} \left(1 + \frac{1}{2} \overline{n} \frac{\tau_0}{T} \right).$$

49. Il n'explique cependant pas la démonstration.

50. Purcell fixe donc le τ précédent à une durée T .

51. Purcell précise que, si la distribution spectrale est une courbe lorentzienne de largeur $\Delta\nu$, alors $\tau_0 = (\pi\Delta\nu)^{-1}$.

52. Purcell fait remarquer que si l'expérience était faite avec des électrons, qui sont des fermions, le résultat aurait été différent.

53. « quatre photons, ou aucun, ou un nombre intermédiaire » (Purcell (1956), p.1449)

54. Le T est omis dans cette notation, mais il faut bien garder à l'esprit que ces nombres de photons correspondent à des mesures réalisées pendant une durée T .

Purcell remarque alors que, par linéarité :

$$\overline{\Delta n^2} = \overline{(\Delta n_1 + \Delta n_2)^2} = \overline{n_1} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{T} \right) + \overline{n_2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{T} \right) + \overline{2\Delta n_1 \Delta n_2}.$$

Par identification, on obtient :

$$\overline{n} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{T} \right) = \overline{n_1} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{T} \right) + \overline{n_2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{T} \right) + \overline{2\Delta n_1 \Delta n_2}.$$

En développant puis en simplifiant, j'obtiens :

$$\overline{\Delta n_1 \Delta n_2} = \frac{1}{2} \overline{n_1} \cdot \overline{n_2} \frac{\tau_0}{T}$$

alors que Purcell aboutit dans son article à :

$$\overline{\Delta n_1 \Delta n_2} = \frac{1}{2} \overline{n_1}^2 \frac{\tau_0}{T}.$$

Cela semble étrange compte-tenu que le problème est symétrique par rapport aux deux photomultiplicateurs. Moyennant cette différence, Purcell déclare avoir retrouvé ici grâce à sa méthode les corrélations observées dans les expériences de Hanbury Brown et Twiss.

L'article s'achève comme annoncé sur une critique de l'expérience de Brannen et Ferguson. L'argument principal consiste à affirmer que Hanbury Brown et Twiss disposaient d'appareils dotés d'une bien meilleure sensibilité que ceux de Brannen et Ferguson, ce qui leur a permis d'obtenir une résolution en temps suffisamment petite pour pouvoir observer les corrélations. Pour le montrer, Purcell prend comme temps d'observation la résolution temporelle T de l'expérience de Brannen et Ferguson, c'est-à-dire environ 10^{-8} s. Selon son modèle, le rapport entre le taux de coïncidences en présence de corrélations et ce même taux sans corrélations est $(1 + \frac{\tau_0}{2T})$, où $\tau_0 = \frac{1}{\Delta\nu_0}$ sachant que $\Delta\nu_0$ est la largeur de la distribution spectrale de la source. En fonction des informations données par Brannen et Ferguson dans leur article, Purcell estime cette largeur $\Delta\nu_0$ à 1 angström pour la raie à 435,8 nm, soit : $\tau_0 = 10^{-11}$ s. En conséquence :

$$\frac{\tau_0}{2T} = \frac{10^{-11}}{2 \cdot 10^{-8}} = 0.0005$$

Compte-tenu que l'incertitude statistique sur ce rapport dans l'expérience de Brannen et Ferguson était de l'ordre de 0.01, Purcell conclut que ceux-ci n'ont pas pu voir de coïncidences systématiques avec leur matériel. En conservant le même dispositif, donc en particulier sans rendre la bande spectrale plus étroite, il aurait fallu détecter des coïncidences sur plusieurs années afin de commencer à observer un effet de type Hanbury Brown et Twiss! Ainsi Purcell donne encore plus de crédit à ces derniers, en doublant son explication théorique des corrélations entre temps d'arrivée des photons dans les photodétecteurs d'une fine analyse de l'expérience de Brannen et Ferguson, et en remettant sérieusement en cause leurs résultats.

J'ajoute que le modèle de Purcell a reçu un soutien expérimental avec l'expérience de Rebka et Pound menée à l'Université d'Harvard (Rebka and Pound 1957). Leur expérience, similaire à celle de Hanbury Brown et Twiss à ceci près qu'ils remplacèrent la lumière continue par des pulses générés dans un tube à décharges de mercure, a permis de confirmer la formule de Purcell qu'ils avaient explicitement cherché à vérifier.

Commentaires

Cet article de Purcell manifeste une tension permanente entre les intuitions de celui-ci, qui sont d'ordre quantiques, et ses calculs, qui demeurent classiques. Le cœur de son interprétation de l'effet HBT (quantique) réside dans l'idée que la lumière est de nature corpusculaire, et que les photons sont des *bosons*, ce pourquoi ils présentent un aspect grégaire. Il justifie ceci en remplaçant les photons par des paquets d'ondes, et en affirmant que ces derniers – à cause du caractère bosonique des photons – peuvent se superposer et interférer, ce qui conduit à des détections de photons qui ne se répartissent pas purement aléatoirement dans le temps.

Pourtant, malgré cette interprétation à consonance quantique, les calculs de Purcell sont presque intégralement classiques. Il n'y a qu'une seule exception : lorsqu'il suppose que la probabilité d'émission d'un photoélectron dans un photomultiplicateur (correspondant à la détection d'un photon) est proportionnelle à l'intensité du champ – à supposer que chaque éjection d'un électron se produit lors de l'impact d'un photon unique. Pour le reste, tout est classique : Purcell associe d'emblée la lumière à champ électrique, donc à une onde, et définit l'intensité comme le carré de ce champ. De plus, les paquets d'ondes dont parle Purcell ne possèdent pas d'aspect quantique ; en particulier, il n'évoque jamais une quelconque amplitude de probabilité de présence. Enfin, dans son raisonnement, il s'avère que les fluctuations d'intensité proviennent de la largeur $\Delta\nu$ de la distribution spectrale de la source, et non de propriétés intrinsèques à la lumière. Même le caractère bosonique des photons ne sert qu'à justifier la superposition cohérente de trains d'onde, qui est un phénomène classique. Ainsi, la dérivation de la formule donnant les fluctuations moyennées dans le temps du nombre de photons pendant une durée T est presque exclusivement classique. Puisque les calculs suivants (décrivant l'expérience de Hanbury Brown et Twiss) dépendent de cette formule, ceux-ci sont également classiques. Il en résulte que, dans l'ensemble, malgré des arguments et des intuitions de nature quantique, la démonstration de Purcell reste essentiellement classique.

L'interprétation de Richard Sillitto

En réaction à l'article de Purcell, le physicien Richard Sillitto justifia l'existence des corrélations observées dans les expériences de Hanbury Brown et Twiss⁵⁵ en affirmant que ce ne sont pas tant les photons ou les trains d'onde qui interfèrent que les amplitudes

55. Apportant ainsi à son tour un certain soutien aux résultats de Hanbury Brown et Twiss.

de probabilité de présence qui leur sont associées. Cela le conduit à critiquer fermement l'idée de Purcell (mentionnée plus haut) selon laquelle des interférences entre deux paquets d'onde peuvent donner lieu à la détection de deux photons, ou quatre, ou aucun, ou encore un autre nombre. Pour Sillitto, la superposition cohérente de deux paquets d'onde ne peut pas conduire à autre chose qu'à la détection de deux photons :

During the time that photon wave-packets overlap, the state of the two-photon system must be symmetrical in the two photons because of Bose statistics. This means that we cannot say which photon gives rise to which electron, and interference may arise between those parts of the probability amplitude which are associated with the two possible permutations in the couplings of emitted electrons with absorbed photons. ⁵⁶

Ainsi, les interférences entre amplitudes de probabilité de présence conservent le nombre de photons, tout en ayant sur les temps de détection des photons un effet qui justifie les corrélations observées par Hanbury Brown et Twiss : « [...] the interference between photons produces a distortion of the distribution in time of the events by which photons are detected. » ⁵⁷. La proposition de Sillitto me paraissait digne d'être mentionnée car elle fait davantage appel à la mécanique quantique, en rattachant l'interprétation des corrélations à des interférences entre amplitudes de probabilité.

Retour à la controverse avec Brannen et Ferguson

Avec leurs articles respectifs, Purcell et Sillitto apportèrent un soutien de poids aux résultats de Hanbury Brown et Twiss ⁵⁸. Il ne faut cependant pas croire qu'ils mirent fin à la controverse ; au contraire, l'article de Purcell en particulier raviva les tensions. En effet, pour Brannen et Ferguson, la démonstration de Purcell n'était pas acceptable car l'intensité de la source utilisée par Hanbury Brown et Twiss était selon eux trop faible pour que des paires de photons puissent se former au niveau de la source et atteindre la lame semi-réfléchissante. Ainsi, Brannen et Ferguson pensaient que les résultats de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, s'ils étaient justes, impliqueraient une division inacceptable du photon entre les différents bras de l'interféromètre, car cela entrerait en

56. « Tant que les deux paquets d'onde photonique se recouvrent, l'état du système à deux photons doit être symétrique par rapport aux deux photons, du fait de la statistique de Bose. Cela signifie qu'on ne peut pas dire quel photon donne naissance à quel électron, et les interférences doivent se produire entre les parties des amplitudes de probabilité qui sont associées aux deux permutations possibles dans les couplages entre les électrons émis et les photons absorbés » (Sillitto (1957), p.1227)

57. « [...] les interférences entre photons produisent une déformation de la distribution en temps des événements correspondant à la détection de ces photons. » (Sillitto (1957), p.1227)

58. Les travaux de Purcell furent prolongés en 1957 par Leonard Mandel (Mandel 1958), qui montra que si chaque photon est décrit par une distribution gaussienne de largeur $\Delta\nu_0$, et si l'intervalle de temps de la détection T est tel que $T \ll \frac{1}{\Delta\nu_0}$, alors le nombre de photons détectés suit une loi statistique de Bose-Einstein.

pleine contradiction avec sa définition même⁵⁹. C'est ce que souligne Joan Lisa Bromberg : « To some physicists, a correlation between photons parceled out in this way seemed to contradict the basic principle that a photon is indivisible and should go one way or the other. »⁶⁰.

1.3.4 Le dénouement

Je ne rentrerai ici pas plus dans le détail des très intenses discussions autour des résultats de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, dont on trouvera une synthèse détaillée dans [Silva and Freire \(2013\)](#). J'ajouterais simplement en guise de conclusion de cet exposé que le débat s'est achevé en 1958, lorsque Brannen et Ferguson ont réitéré leurs expériences et ont finalement observé eux aussi des corrélations⁶¹. Quant à leur critique de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, leur erreur avait été de croire qu'elle faisait intervenir des photons uniques. Il faut souligner ici l'attitude louable de Brannen, qui fit amende honorable dans une lettre adressée à Hanbury Brown :

[It] seems to be well established now that our initial criticisms were unfounded. We thought (rashly it seems) that you were considering the “splitting of individual photons”, if you will pardon the phraseology, and our initial experiments were designed to test such a conjecture, which everyone would agree was contrary to quantum mechanics. . . [A]s your calculations showed, our first experiments could not show such an effect whereas yours could.⁶²

59. Le refus des résultats de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss constitua la principale motivation de Brannen et Ferguson à mener leur expérience de 1956 : « It would appear to the authors [...] that if such a correlation did exist, it would call for a major revision of some fundamental concepts in quantum mechanics. This was, of course, the reason why these experiments were performed. » : « Il apparaît aux auteurs que si une telle corrélation existait, cela amènerait à une refonte majeure de certains concepts fondamentaux en mécanique quantique. C'est la raison pour laquelle ces expériences ont été menées. » (note ajoutée à la toute fin de [Brannen and Ferguson \(1956\)](#), p.482.

60. « Pour certains physiciens, une corrélation entre photons divisés de la sorte semblait contredire le principe de base selon lequel un photon est indivisible et devrait aller d'un côté ou de l'autre. » (citation issue de [Bromberg \(2010\)](#), p.2

61. On se souvient que, dans le modèle de Purcell, le nombre de coïncidences systématiques était proportionnel à $\frac{\tau_0}{2T}$ avec $\tau_0 = \frac{1}{\Delta\nu_0}$. Purcell avait estimé $\Delta\nu_0$ à 1 angström. En lisant le papier de Brannen et Ferguson de 1958, on se rend compte que la principale amélioration par rapport à leur expérience de 1956 ne concernait pas la résolution temporelle de leur détection, qui est passée de 10^{-8} s à 8.10^{-9} s, mais la largeur de la bande spectrale, qui serait passée de 1 angström (selon l'estimation de Purcell) à 0.006 angström.

62. « Il semble être maintenant bien établi que nos critiques initiales n'étaient pas fondées. Nous avons pensé (manifestement sans réfléchir) que vous considériez le « découpage de photons individuels », si vous voulez bien me pardonner l'expression, et nos premières expériences étaient conçues pour tester une telle hypothèse, que tout le monde s'accorderait à dire contraire à la mécanique quantique... Comme l'ont montré vos calculs, nos premières expériences ne pouvaient pas mettre en évidence un tel effet, alors que la vôtre le pouvait. » (cité par [Silva and Freire \(2013\)](#), p.487)

Brannen met ici en lumière ce qui semble être l'un des deux aspects les plus importants du débat. En effet, en résumé, je dirais que le débat s'est articulé autour de deux problèmes fondamentaux :

- En admettant l'indivisibilité du photon, comment peut-on expliquer les corrélations observées si l'intensité de la source est trop faible ?
- Une lumière provenant de deux sources incohérentes peut-elle induire des coïncidences systématiques dans deux photodétecteurs ?

L'expérience a montré que les photons ne pouvaient plus être décrits comme des entités indépendantes les unes des autres, et que ceux-ci possédaient effectivement une tendance à arriver par paires dans des photodétecteurs séparés dans l'espace. Mais le principal enseignement demeure certainement l'idée que la lumière est beaucoup plus étrange que ce qu'on pouvait croire jusqu'alors. Bien sûr, la notion de dualité onde-corpuscule existait depuis longtemps, mais elle était encore assez abstraite. Les expériences de Hanbury Brown témoignent d'une *prise de conscience expérimentale de la dualité onde-corpuscule* : en effet, bien que fondées sur la même méthode d'interférométrie d'intensité, les deux expériences ont montré que les appareils de mesure utilisés (antennes pour l'une, photomultiplicateurs pour l'autre) conditionnent la représentation de la lumière :

If one used a linear multiplier to register the correlations between intensity fluctuations, the wave picture of light would be present. If, instead of using a linear multiplier, one used a coincidence counter able to detect individual events, the corpuscular picture would come to the fore.⁶³

De plus, la controverse autour des expériences de Hanbury Brown et Twiss témoignait des limites du concept de photon, qu'il fallait réviser. Hanbury Brown lui-même attribua la cause du débat à une mécompréhension de la lumière et en particulier du photon, à l'origine des tensions et des réticences exacerbées :

To me the most interesting thing about all this fuss was that so many physicists had failed to grasp how profoundly mysterious light really is, and were reluctant to accept the practical consequences of the fact that modern physics doesn't claim to tell us what things are like 'in themselves' but only how they 'behave'. The most common objection to our work was that the time of arrival of one photon at a detector cannot conceivably be correlated with that of another because individual photons are emitted at random times and must therefore arrive at random times. If our system was really going to work, one would have to imagine photons hanging about waiting for each other in space!⁶⁴

63. « Si l'on utilisait un multiplicateur linéaire pour enregistrer les corrélations entre les intensités des fluctuations, la représentation ondulatoire de la lumière serait présente. Si à la place d'un multiplicateur linéaire on utilisait un compteur de coïncidences capable de détecter des événements individuels, la représentation corpusculaire viendrait au premier plan. » (Silva and Freire (2013), p.483)

64. « A mon avis, ce qu'il y a eu de plus intéressant dans toute cette agitation, c'est que de si nombreux

Pourtant, les corrélations existaient bel et bien. Mais comment les interpréter ? Affirmer que les photons étaient des particules indépendantes les unes des autres n'était pas suffisant pour rendre compte des corrélations. Par analogie avec la conception ondulatoire de la lumière, se pourrait-il qu'il y ait des « interférences de photons » responsables des corrélations, sans que cela n'aille à l'encontre de la théorie de Dirac ? Selon Glauber, c'est là qu'a résidé le malentendu : ce ne sont pas des photons qui interfèrent, mais des *amplitudes de probabilités* :

There was a world of confusion, and if I can say just one of the things that tended to clear up that confusion, it is not literally the quanta that are doing the interfering, it's the amplitude of the quanta doing different things. The things that interfere are the probability amplitudes, for example, that one quantum goes this way, and the probability amplitude that that quantum goes the other way. In the case of two quantum measurements, there's a more complicated set of amplitudes for what the different quanta can do, but still it is the amplitude for a two quanta phenomenon of one variety interfering with the amplitude for a two quanta phenomenon of the other variety. And in that way, interferences can involve as many quanta as you like. It's the amplitudes, not the quanta. ⁶⁵

Je noterai pour terminer que cette interprétation ici formulée par Glauber a trouvé un fort écho chez Claude Cohen-Tannoudji, qui a largement contribué à la diffuser grâce à son cours donné en 1979-1980 au Collège de France ([Cohen-Tannoudji 1980](#)). Philippe Grangier m'en a ainsi témoigné : « Moi, je suis arrivé à un moment où Claude Cohen-Tannoudji avait tout défriché dans son cours, et que tout devenait clair comme de l'eau de roche. On interprète en termes d'interférences d'amplitudes de probabilité. J'avais du mal à me replacer dans la tête de ceux qui ne comprenaient pas ! » ([Grangier 2019](#)).

physiciens n'ont pas su saisir à quel point la lumière est profondément mystérieuse, et qu'ils n'étaient pas prêts à accepter les conséquences pratiques du fait que la physique moderne ne prétend pas nous dire ce que les choses sont « en tant que telles », mais seulement comment elles se « comportent ». L'objection la plus courante contre nos travaux était que le temps d'arrivée d'un photon ne peut certainement pas être corrélé avec celui d'un autre photon, car les photons individuels sont émis à des temps aléatoires, et qu'ils doivent par conséquent arriver à des temps aléatoires. Si notre système devait fonctionner, il faudrait imaginer les photons traîner en s'attendant les uns les autres dans l'espace ! » ([Hanbury Brown \(1991\)](#), p.121)

65. « C'était un monde de confusion, et si je peux simplement citer l'une des choses qui a contribué à estomper cette confusion, ce ne sont pas à proprement parler les quanta qui produisent les interférences, mais l'amplitude de ces quanta faisant différentes choses. Ce qui interfère, ce sont par exemple l'amplitude de probabilité que ce quantum-ci aille par-ci, avec l'amplitude de probabilité que ce quantum-là aille par-là. Lorsqu'on fait deux mesures de quanta, il y a un ensemble d'amplitudes plus complexes sur ce que les différents quanta peuvent faire ; il n'en reste pas moins que c'est l'amplitude d'un certain phénomène à deux quanta qui interfère avec l'amplitude d'un autre phénomène à deux quanta. Et de cette façon, les interférences peuvent mettre en jeu autant de quanta que vous voulez. Ce sont les amplitudes, pas les quanta. » ([Glauber 1987](#))

Mais Glauber, qui connaissait bien l'électrodynamique quantique, ne s'est pas contenté de donner une interprétation des expériences de Hanbury Brown et Twiss en termes d'amplitudes de probabilités. Comme nous le verrons bientôt, il a résolument voulu comprendre les corrélations observées dans un cadre intégralement quantique, et c'est pourquoi il est permis de dire que Hanbury Brown et Twiss, en découvrant l'effet qui porte leur nom, ont apporté une contribution essentielle à la naissance de l'optique quantique.

1.4 Le photon : un concept à risque

En guise de conclusion à cette partie consacrée aux expériences de Hanbury Brown et Twiss, qui ont ravivé le débat sur la nature de la lumière, je souhaiterais souligner que le concept de photon est lui-même assez imprécis, voire polysémique, et que son emploi peut ainsi s'avérer dangereux et générer des malentendus. Par exemple, est-il consubstantiel à l'idée d'un corpuscule de lumière indivisible ? Ou ne désigne-t-il qu'une portion élémentaire d'énergie lumineuse associée à la quantification du champ ?

On ne s'étonnera pas de ces fluctuations sémantiques au moment de remarquer que le terme « photon », à son origine, ne désignait pas une particule associée à la lumière. En effet, le mot apparaît en 1926⁶⁶ sous la plume du chimiste américain Gilbert Lewis, qui ne revendiquait pas avoir dénommé le quantum d'énergie introduit par Einstein. En revanche, Lewis a défini le photon comme « un nouveau type d'atome », émis ou absorbé par un atome traditionnel, et transportant une certaine énergie. Dans la mesure où, selon lui, cette énergie restait la plupart du temps confinée dans l'atome, il n'y avait pas lieu de désigner le photon comme un constituant fondamental de la lumière : « It would seem inappropriate to speak of one of these hypothetical entities as a particle of light, a corpuscle of light, a light quantum »⁶⁷.

Pourtant, cette terminologie a perduré, et son sens a évolué puisqu'elle désigne désormais communément la particule associée au rayonnement. Le concept de photon demeure entaché de l'idée de corpuscule indivisible qui, comme nous le verrons prochainement, entrera en nette contradiction avec l'expérience et alimentera des débats houleux dans les années 1950. C'est pourquoi le physicien Willis Lamb a milité dès 1960 – manifestement sans succès – pour bannir le terme « photon » du langage scientifique. « Only a comedy of errors and historical accidents led to its popularity among physicists and optical scientists. »⁶⁸ Selon lui, les présupposés qui gangrènent ce mot depuis son introduction

66. Ce n'est en réalité pas la première occurrence du mot « photon » dans la littérature scientifique. En effet, quatre autres physiciens l'avaient déjà indépendamment introduit avant Lewis, de façon plus confidentielle. Parmi eux figure le psychophysicologue américain Leonard Troland, qui l'utilisa dès 1916 pour désigner une unité caractérisant l'illumination de la rétine – à l'instar du photon de Lewis, il ne s'agissait donc pas du quantum de lumière d'Einstein ! Pour plus de détails, voir [Kragh \(2014\)](#).

67. « Il semblerait inapproprié de parler de l'une de ces entités hypothétiques comme d'une particule de lumière, ou un corpuscule de lumière, ou un quantum de lumière » ([Lewis \(1926\)](#), p.874)

68. « Ce n'est qu'une comédie pleine d'erreurs et de hasards de l'histoire qui a conduit à sa popularité

par Lewis sont pernicious, d'autant plus que la limite classique de la théorie quantique du rayonnement établie par Dirac en 1927 est représentée par les équations de Maxwell, ce qui ne fait aucunement appel à une quelconque notion de particule. Certainement conscient qu'il n'obtiendrait pas l'éviction pure et simple du mot « photon » du langage scientifique, Lamb proposa en 1960 de réguler son emploi par l'attribution sélective d'un « permis photon »⁶⁹ :

At the first of the 1960's Rochester Coherence Conferences, I suggested that a license be required for use of the word "photon", and offered to give such a license to properly qualified people. My records show that nobody working in Rochester, and very few other people elsewhere, ever took out a license to use the word "photon".⁷⁰

Force est de constater que cette recommandation de Lamb n'a pas été suivie, et que le mot « photon » demeure toujours largement employé de nos jours !

1.5 Résumé et perspective

La découverte de l'effet HBT résulte d'un étonnant concours de circonstances. D'abord, elle trouve son origine dans le champ de la radioastronomie, a priori très éloignée du domaine de l'optique de laboratoire, dont Hanbury Brown n'était de surcroît pas issu. Ensuite, elle a été conditionnée par un choix qui s'apparentait à un pari : celui d'utiliser l'interférométrie d'intensité afin de ne pas tenter la mesure du diamètre angulaire d'étoiles radio avec un interféromètre de type Michelson. Elle a également dépendu d'une intuition, à savoir qu'il serait possible d'appliquer cette nouvelle méthode aux étoiles visibles, dans la mesure où il ne serait pas nécessaire d'en former une image complète. Enfin, l'expérience en laboratoire a été motivée par la volonté des expérimentateurs de savoir si l'effet photoélectrique conserverait d'éventuelles corrélations entre photons, ce qui a bien été confirmé.

parmi les physiciens et les spécialistes de l'optique. » (Lamb (1995), p.80). Je ne sais pas Lamb y a pensé, mais cette phrase au tout début de son article me semble faire écho à la célèbre réplique de Macbeth dans la pièce éponyme de Shakespeare : « C'est une histoire dite par un idiot, pleine de bruit et de fureur, et qui ne signifie rien. »

69. Alain Aspect me racontait qu'à l'occasion d'une conférence donnée en l'honneur des 80 ans de Lamb, il demanda à ce dernier s'il lui accordait un « permis photon » : « Il me l'a implicitement donné. Je lui avais demandé de façon impertinente, et il s'était marré ! Cela veut dire que Lamb n'était pas totalement hostile au photon, mais il disait qu'il fallait l'utiliser seulement si on comprenait ce qu'on faisait. » (Aspect 2019)

70. « A la première conférence de Rochester sur la cohérence, dans les années 1960, j'ai suggéré qu'un permis soit exigé pour l'utilisation du mot « photon », et j'ai proposé d'offrir un tel permis aux personnes vraiment qualifiées. Mes dossiers montrent qu'aucun de ceux qui travaillaient à Rochester, et seulement très peu d'autres personnes ailleurs, ont obtenu un permis pour utiliser le mot « photon ». » (Lamb (1995), p.80)

Choqués par ces résultats qui leur paraissaient en désaccord avec la mécanique quantique, et plus précisément avec la citation de Dirac stipulant qu'un photon ne peut interférer qu'avec lui-même, Brannen et Ferguson se sont élevés contre l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, et ont provoqué de multiples réactions. Mais là est le paradoxe : bien que la notion de photon ait occupé une place centrale dans la controverse, celle-ci demeura confinée dans un cadre semi-classique. Voilà qui est étrange : tout le monde parlait de photon, et personne ne quantifiait le rayonnement ! Ainsi, les tentatives d'interprétation du photon en des termes semi-classiques ont peut-être créé la confusion.

Mais en ce qui concerne la description de la lumière, le photon n'est pas le seul concept à avoir été longuement discuté dans les années 1950. En effet, en parallèle des expériences de Hanbury Brown et Twiss, le développement du maser puis du laser s'est accompagné d'une profonde réflexion sur un autre concept fondamental de l'optique : celui de cohérence.

Chapitre 2

Le concept de cohérence et l'invention du laser

2.1 Un peu d'histoire

Au début du chapitre précédent, j'ai brossé l'histoire du photon, qui se rattache plutôt à une vision quantique et corpusculaire de la lumière. Désormais, je vais me pencher sur l'histoire d'une autre notion, cette fois plutôt liée à l'aspect ondulatoire de la lumière : celle de cohérence, qui caractérise en particulier la capacité d'une onde lumineuse à interférer. Mais pour commencer, je vais présenter le physicien Emil Wolf, qui a considérablement travaillé sur cette notion et qui sera abondamment cité dans ce chapitre.

2.1.1 Quelques mot sur Emil Wolf (1922 - 2018)

Emil Wolf¹ est né en 1922 à Prague, en République Tchèque. Suite à l'invasion allemande, il dut fuir en Italie et en France, avant de s'établir au Royaume-Uni pendant la Seconde Guerre Mondiale. Il intégra l'Université de Bristol et obtint en 1948 un doctorat de mathématiques, pour lesquelles il entretiendra toujours une certaine passion. Après un post-doc à l'Université de Cambridge, il passa trois ans à l'Université d'Edinburgh où il collabora avec Max Born grâce à l'entremise de Dennis Gabor, l'inventeur de l'holographie. Born et Wolf écrivirent un traité d'optique de référence, *Principles of Optics*, qui était lui-même inspiré d'un traité antérieur de Max Born intitulé *Optik* (première édition en 1933). L'une des contributions essentielles de Wolf fut le chapitre consacré à la notion de cohérence, qu'il a beaucoup étudiée. L'ouvrage fut publié pour la première fois en 1959, et réédité par la suite à six reprises jusqu'à la fin du siècle. Brian Thompson remarque que la façon dont le livre est désigné traduit le prestige de ses auteurs : « It is a great tribute to the authors of this monumental book that it is usually referred to as

1. On trouvera des éléments biographiques plus détaillés dans [Thompson \(2004\)](#), ainsi que sur le site internet de l'*Optical American Society*.

“Born and Wolf” rather than by its title! »². Notons enfin que le « Born et Wolf », bien que couvrant largement le champ de l’optique, demeure un traité d’optique *classique*³, à laquelle il donna de solides fondements.

De 1954 à 1958, Wolf devint chercheur à l’Université de Manchester, où il réalisa des expériences d’interférences et de diffraction, et en 1959 il traversa l’Atlantique afin de rejoindre l’Institut d’Optique de l’Université de Rochester, à New York, où il passa l’essentiel de sa carrière. Il s’associa avec Robert Hopkins afin d’organiser les « Conférences de Rochester sur la Cohérence et l’Optique quantique », qui eurent lieu tous les cinq ou six ans à partir de 1960⁴.

Il reçut de nombreuses récompenses dans le domaine de l’optique et fut pendant l’année 1978 Président de l’*Optical American Society* qui, en remerciement pour ses multiples contributions, lui conféra également le titre de Membre Honoraire en 1987.

Il s’est éteint le 2 juin 2018, à l’âge de 96 ans.

2.1.2 L’évolution de la notion de cohérence

De Max Laue à Frits Zernike et Pieter van Cittert

Venons-en maintenant à l’histoire de la notion de cohérence. Bien que les expériences d’interférences de Thomas Young et la théorie d’Augustin Fresnel aient contribué à répandre la conception ondulatoire de la lumière au début du XIXe siècle⁵, l’étude systématique de la cohérence fit son apparition bien plus tardivement. En effet, après Emile Verdet en 1865, l’un des premiers à s’intéresser de près à celle-ci fut le physicien allemand Max Laue⁶, un élève de Planck connu pour avoir découvert la diffraction des rayons X par des cristaux (ce qui lui valut le prix Nobel en 1914). Quelques années auparavant, dans un article de 1906, il avait mis en évidence les insuffisances de la thermodynamique du rayonnement, incompatible avec certains phénomènes d’interférence (Laue 1906). Cela le conduisit à étudier la cohérence dans la situation où deux rayons interfèrent pour en

2. « C’est un grand hommage pour les auteurs que ce livre monumental soit couramment désigné par « Born et Wolf » plutôt que par son titre! » (Thompson (2004), p.14)

3. Il est important de le souligner, car Wolf restera toute sa vie attaché à la vision classique de l’optique, et s’opposera vivement à la théorie de Glauber.

4. A Rochester, il entretint en particulier une étroite collaboration avec Leonard Mandel. Il s’intéressa lors de ses recherches aux propriétés de cohérence (notamment de cohérence partielle) et de polarisation des champs, aux phénomènes de diffraction et de diffusion, à la spectroscopie, au laser, à l’holographie. . . Il a en particulier prédit un effet de décalage vers le rouge ou vers le bleu, distinct de l’effet Doppler, qui a été observé et qui porte désormais son nom. Outre le « Born et Wolf », Wolf fut l’auteur de près de 400 articles, ainsi que d’autres ouvrages importants comme *Optical Coherence and Quantum Optics* (1995) avec Leonard Mandel et *Theory of Coherence and Polarization of Light* (2007).

5. Le passage de la conception corpusculaire à la conception ondulatoire de la lumière au début du XIXe siècle fait l’objet du chapitre 5 de l’ouvrage d’Olivier Darrigol consacré à l’histoire de l’optique : Darrigol (2012).

6. Voir Brosseau (2010), p.173.

produire deux autres.

Bisher hat die Thermodynamik der Strahlung die Interferenzerscheinungen nicht in den Kreis ihrer Betrachtungen aufgenommen [...]. Der Begriff der Kohärenz ist ihr ganz fremd; sie charakterisiert ein Strahlenbündel allein durch seine Intensität und durch die geometrischen Bestimmungsstücke [...]. Andererseits ist es leicht einzusehen, dass es auch für die Thermodynamik nicht gleichwertig ist, ob zusammentreffende Strahlen kohärent sind oder nicht. Hier liegt eine Lücke der Theorie [...].⁷

Les travaux précurseurs de von Laue n'ont pas été immédiatement repris, et le concept de cohérence ne s'est véritablement développé qu'avec les travaux des physiciens néerlandais Pieter van Cittert et Frits Zernike, dans les années 1930⁸. Zernike proposa en effet une méthode pour mesurer le degré de cohérence d'une onde lumineuse, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir des franges d'interférence en considérant deux points du champ, à l'aide de mesures d'intensité. Il a notamment introduit la notion de « degré de cohérence » γ , qui est définie comme « le maximum de visibilité des franges d'interférences qu'on peut obtenir à partir de deux points d'un champ » (voir [Zernike \(1938\)](#), p.785).

De plus, lui et van Cittert formulèrent indépendamment (et sous des conditions différentes) un théorème qui porte leur nom, et qui stipule qu'une source de lumière spatialement incohérente peut créer un champ cohérent à grande distance : « Even though the two small sources S_1 and S_2 are statistically independent, they will give rise to correlations in the field which they produce and the correlations are evidently generated by the process of propagation. »⁹. Cela vient du fait qu'à grande distance, il devient impossible de distinguer la contribution de chaque source au front d'onde, qui apparaît dès lors cohérent. Notons en particulier que Hanbury Brown et Twiss ont utilisé ce théorème afin de mesurer par interférométrie d'intensité le diamètre angulaire des sources radio.

7. « Jusqu'à présent, la thermodynamique du rayonnement n'a jamais intégré les phénomènes d'interférences dans son champ d'études [...]. La notion de cohérence lui est complètement étrangère; elle ne caractérise un faisceau que par son intensité et par des éléments géométriques [...]. D'autre part, il est facile de comprendre que deux faisceaux qui se rencontrent ne sont pas équivalents du point de vue de la thermodynamique selon s'ils sont cohérents ou non. Il y a là une lacune de la théorie [...]. » ([Laue \(1906\)](#), p. 365)

8. On pourra également noter entre temps la contribution de Norbert Wiener, qui introduisit en 1928 les matrices de cohérence (voir [Wiener \(1928\)](#)). Celles-ci pouvaient s'appliquer aussi bien à la théorie quantique qu'à celle de la lumière polarisée. En effet, les matrices de corrélations permettent de comparer entre eux les coefficients d'un même vecteur. Or, la polarisation d'une lumière peut être décrite par le vecteur champ électrique, qui évolue dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, et qui varie en fonction du temps. La matrice de cohérence est alors la matrice des coordonnées de ce vecteur projeté sur des axes cartésiens.

9. « Même si deux petites sources S_1 and S_2 sont statistiquement indépendantes, elles donneront lieu à des corrélations générées par le processus de propagation. » ([Wolf \(2007\)](#), p. 38)

Emil Wolf

La dernière contribution essentielle que je souhaite ici mentionner est celle d'Emil Wolf. En 1954, dans [Wolf \(1954\)](#), Wolf proposa d'adapter le formalisme de l'optique pour le faire correspondre à des quantités mesurables en pratique, c'est-à-dire à des intensités, et non pas à des composantes du champ.

Dans cet article important, étant donné une onde plane quasi-monochromatique ainsi que deux axes cartésiens x et y définis dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde, Wolf instaura les quatre *fonctions de corrélation* suivantes, qui constituaient les coefficients d'une matrice de corrélation ϵ de taille 2×2 :

$$\epsilon_{ij}(\mathbf{x}, t) = \langle E_i(\mathbf{x}, t) E_j^*(\mathbf{x}, t) \rangle ,$$

où E_i et E_j sont les composantes complexes du champ selon les axes i et j (qui peuvent être tour à tour x ou y), où \mathbf{x} est un point de ce champ dans l'espace, et où les crochets désignent une moyenne temporelle. La connaissance du champ \vec{E} était dès lors équivalente à celle des fonctions ϵ_{ij} , c'est-à-dire à celle de l'ensemble $\{\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}\}$. En posant :

$$\gamma = \gamma_{xy} = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}} \sqrt{\epsilon_{yy}}},$$

Wolf retrouva le degré de cohérence γ introduit par Zernike en 1938. Si $\gamma = 0$, le champ est totalement incohérent ; si $|\gamma| = 1$, il est totalement cohérent ; et si $0 < |\gamma| < 1$, il est partiellement cohérent.

L'étape suivante consista à généraliser ces fonctions de corrélations pour deux points quelconques d'une onde stationnaire dans l'espace et dans le temps. La matrice de corrélation ϵ était désormais de taille 3×3 , avec :

$$\epsilon_{ij}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \tau) = \langle E_i(\mathbf{x}_1, t + \tau) E_j^*(\mathbf{x}_2, t) \rangle .$$

Wolf précisa que chacune de ces fonctions, de même que chaque composante du champ, vérifiait deux équations de propagation de la forme :

$$\Delta_1 \epsilon_{ij} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial \tau^2}, \Delta_2 \epsilon_{ij} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial \tau^2},$$

où les laplaciens correspondaient à des dérivées d'ordre 2 respectivement par rapport aux points \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 . Le fait que des fonctions de corrélation puissent vérifier des équations de propagation n'apparaissait pas comme un résultat évident. C'est ce que dénote l'anecdote suivante, qui relate la difficulté de Wolf à convaincre Born de la pertinence de cette idée :

It was not always easy for Born's collaborators to convince him quickly of new discoveries. Let me illustrate this by an example from my own experience. In the early 1950s I became very interested in problems of partial coherence. One day I found a result in this area of optics that seemed to me remarkable.

I phoned Born from my home one morning, told him I had an exciting new result, and asked him for an appointment to discuss it. We arranged to have lunch together that day.

When I came to his office just before lunch, Born wanted to know straight away what the excitement was all about. I told him I had found that not only an optical field, but also its coherence properties, characterized by an appropriate correlation function (now known as the mutual coherence function), are propagated in the form of waves. Born looked at me rather skeptically, put his arm on my shoulder and said, “Wolf, you have always been such a sensible fellow, but now you have become completely crazy!” Actually after a few days he accepted my result, and I suspect he then no longer doubted my sanity.¹⁰

Wolf conclut son article en formulant une hypothèse : « The matrices here introduced may be expected to play a role in Electromagnetic field theory which is somewhat analogous to that which the Density matrix of von Neumann plays in Quantum Mechanics. »¹¹. Il jeta ainsi les bases d’une nouvelle théorie de la cohérence, qu’il continua de développer dans [Wolf \(1959\)](#), où il établit un lien entre polarisation partielle et cohérence partielle, alors que les deux propriétés avaient été jusqu’alors traitées séparément.

La grande avancée suivante fut apportée par Glauber, qui élargit considérablement la notion de cohérence. Ce sera l’objet du chapitre 3 ; auparavant, je vais brièvement rappeler comment est né le laser, afin de comprendre comment cette nouvelle source a permis de faire évoluer la notion de cohérence.

10. « Il n’est pas toujours facile pour les collaborateurs de Born de convaincre rapidement ce dernier à propos de nouvelles découvertes. Permettez-moi d’illustrer cela avec un exemple tiré de mon expérience personnelle. Au début des années 1950, je me suis intéressé de près aux problèmes liés à la cohérence partielle. Un jour, j’ai trouvé dans ce domaine de l’optique un résultat qui m’a paru remarquable. J’ai téléphoné à Born un matin depuis ma maison : je lui ai dit que j’avais un nouveau résultat excitant, et je lui ai demandé un rendez-vous pour en discuter. Nous avons convenu de manger ensemble le même jour.

Quand je suis arrivé à son bureau juste avant le déjeuner, Born voulait savoir sur-le-champ la raison de toute cette excitation. Je lui ai dit que j’avais trouvé que non seulement le champ optique, mais également ses propriétés de cohérence caractérisées par une fonction de corrélation appropriée (maintenant connue sous le nom de fonction de cohérence mutuelle), se propagent sous forme d’ondes. Born m’a regardé d’un œil sceptique, a posé son bras sur mon épaule, et m’a dit : « Wolf, tu as toujours été un collègue si raisonnable, et maintenant tu es devenu complètement fou ! ». En fait, il accepta mon résultat quelques jours plus tard, et je soupçonne qu’il n’a ensuite plus jamais douté de ma santé mentale. » ([Wolf \(2004\)](#), p.38)

11. « On pourrait s’attendre à ce que les matrices ici introduites jouent un rôle dans la théorie du champ électromagnétique en quelque sorte similaire à celui que joue la matrice densité de von Neumann en mécanique quantique. » ([Wolf \(1954\)](#), p. 887)

2.1.3 Du maser au laser

Je me contenterai ici de donner les grandes étapes du développement du maser et du laser. Pour une histoire plus détaillée sur la période étudiée, voir par exemple :

- pour le maser : Bertolotti (2015), chapitre 4; Bromberg (1991), chapitre 2; Townes (1999), chapitres 5 & 6; ainsi que Forman (1992);
- pour le laser : Bertolotti (2015), chapitre 5 & 6; Bromberg (1991), chapitre 3 & 4; Schawlow and Townes (1958), ainsi que pour les différents types de laser : Siegman (1986).

L'invention du maser

Il arrive qu'un problème nous tараude pendant longtemps, et qu'on ait la sensation que plus on se concentre pour chercher la solution, moins on a de chance de la trouver. Or, parfois, celle-ci apparaît dans une illumination à un moment incongru, sans que l'on s'y attende, alors que notre esprit vaque à d'autres préoccupations. C'est ce qui est arrivé en 1951 au physicien américain Charles H. Townes, l'inventeur du maser.

Depuis un certain temps, Townes cherchait un outil pour faire de la spectroscopie moléculaire dans le domaine des micro-ondes, sans succès. Il travaillait à l'Université de Columbia, où fut lancée en 1950 le premier programme de recherche sur les ondes millimétriques et submillimétriques, et présidait un comité chargé d'explorer les possibilités de génération de ces ondes. Mais Townes et ses collaborateurs rencontraient un obstacle qu'ils ne parvenaient pas à franchir : même si des atomes pouvaient effectivement émettre un rayonnement micro-onde, celui-ci était limité en intensité par la thermodynamique¹².

Alors que le comité se réunissait à Washington le temps d'une journée d'avril 1951, contrarié par le manque de résultats, Townes se leva tôt le matin et partit s'asseoir sur un banc public dans un parc pour réfléchir, afin de ne pas déranger son colocataire. Lorsque soudain, sans prévenir...

L'évidence me sauta aux yeux : les molécules et les atomes ne sont pas tenus d'obéir à la thermodynamique. Il est en effet possible d'en avoir plus dans l'état excité que dans l'état fondamental. (Bretenaker and Treps (2016), p.12)

Dans un éclair, Townes venait de comprendre qu'il devait être possible de réaliser des inversions de populations, donc de séparer des atomes dans l'état fondamental de ceux dans l'état excité, d'enfermer ces derniers dans un résonateur macroscopique, et de générer un phénomène d'amplification d'une micro-onde à partir d'émissions stimulées. Townes griffonna quelques calculs sur un papier et vérifia aussitôt la viabilité de son idée. Le principe du maser, acronyme de *microwave amplification by stimulated emission of radiation*, venait de naître, et en avril 1954, Townes parvint avec son étudiant Jim Gordon à fabriquer

12. Les lois statistiques de la thermodynamique fixent en effet les populations des énergies à l'équilibre ou hors équilibre, ce qui limite l'intensité du rayonnement émis.

le premier maser à ammoniac avec une puissance continue en sortie¹³. Bien que celle-ci fût encore faible, ce succès permit d'obtenir un rayonnement d'une monochromaticité jusqu'alors jamais atteinte, ce qui renforça l'intérêt porté pour le maser et mena à l'essor de nombreuses recherches dans d'autres laboratoires, dont celles concernant le maser à l'état solide.

De même que Born eut du mal à accepter le fait que les fonctions de corrélation vérifiaient des équations de propagation, d'autres éminents physiciens ne crurent pas immédiatement au maser, qu'ils considéraient incompatible avec le principe d'incertitude de Heisenberg¹⁴. C'est le cas de Niels Bohr, comme le raconte Townes lui-même :

En Europe je rencontrai Niels Bohr et, au cours d'une promenade, il me demanda sur quoi je travaillais. Je lui parlais du maser à ammoniaque et de la fréquence d'oscillation très pure ainsi produite. « Non, cela ne peut être vrai », dit-il. « Vous devez vous méprendre ». Je lui expliquais que oui, nous avions fait des mesures et que c'était vrai. Mais quand nous nous quittâmes il ne me croyait toujours pas. Il devait avoir en tête le principe d'incertitude et ne pas considérer la moyenne sur un grand nombre de molécules. C'est étonnant de voir que même les plus grands ont parfois des idées arrêtées qui nuisent à l'émergence des nouvelles. ([Bretenaker and Treps \(2016\)](#), p.13)

Townes eut également l'occasion de parler de ses recherches sur le maser avec John von Neumann, lors d'un cocktail à Princeton. Celui-ci eut dans un premier temps la même réaction que Niels Bohr, mais il changea rapidement d'avis. C'est ce que Townes raconte :

After I told him about the maser and the purity of its frequency, he declared,

13. Signalons également que les Russes, notamment Alexander Prokhorov et Nikolay Basov de l'Université de Moscou, travaillaient également sur le maser à la même époque. Townes revendique néanmoins la priorité : « Il apparut plus tard que Basov et Prokhorov, en Union Soviétique, travaillaient sur une idée assez similaire. Mais nous ne nous sommes rencontrés qu'après la mise au point de notre système (le leur ne fonctionnait pas encore). » ([Bretenaker and Treps \(2016\)](#), p.12). Des recherches plus approfondies seraient bienvenues pour comprendre le rôle exact des physiciens russes dans le développement du maser puis du laser.

14. Dans son livre consacré à l'émergence du laser, Townes explique pourquoi le principe d'incertitude ne s'applique pas dans le cas du maser : « The maser does not inform one about the energy or frequency of any specific, clearly identified molecule. When a molecule is stimulated to radiate (in contrast with being left to radiate spontaneously) it must produce exactly the same frequency as the stimulating radiation. In addition, the radiation in a maser oscillator represents the average of a large number of molecules working together. Each individual molecule remains anonymous, not accurately measured or tracked. The maser's precision arises from principles that mollify the apparent demands of the uncertainty principle. » : « Le maser ne renseigne pas sur l'énergie ou la fréquence d'une molécule spécifique bien identifiée. Quand l'émission d'une molécule est stimulée (contrairement à quand on la laisse émettre spontanément), elle doit produire exactement la même fréquence que celle de l'onde excitatrice. De plus, le rayonnement dans un oscillateur maser représente la moyenne d'un grand nombre de molécules qui émettent ensemble. Chaque molécule individuelle demeure anonyme, et n'est pas mesurée ou suivie avec précision. La précision du maser émerge de principes qui atténuent les exigences apparentes du principe d'incertitude. » ([Townes \(1999\)](#), p.70)

“That can’t be right!”. [...] Von Neumann, after our first chat at that party in Princeton, wandered off and had another drink. In about 15 minutes, he was back. “Yes, you’re right,” he snapped.¹⁵

Débutées en 1951, les recherches sur le maser furent encouragées financièrement par les militaires, qui y voyaient une perspective pour réduire la taille des missiles téléguidés et des radars installés dans des tanks ou dans des sous-marins. De surcroît, en pleine Guerre froide, il était important de rivaliser avec l’URSS dans les domaines de la science et de la technologie¹⁶. A cette époque où se déroulait également la Guerre de Corée, le marché de l’électronique était en plein essor, avec par exemple le développement des missiles téléguidés. Comme l’explique Paul Forman : « Between 1950 and 1960 annual factory sales of consumer electronics products showed no growth at all, while sales of electronics products to the military services increased 650%-in constant, uninflated dollars. The first big surge came with the Korean war. »¹⁷. Dans ce contexte, le maser – composant essentiel des radars à longue portée – constituait un champ de recherches attractif à la pointe de l’électronique.

Le développement du laser

Voici un parallélisme notable : de même que Hanbury Brown et Twiss eurent la volonté de transposer leur méthode d’interférométrie de la radioastronomie au domaine de l’optique, le passage du maser au laser reposait sur l’intention de reproduire l’amplification des ondes micro-ondes avec des ondes visibles. Le succès du maser incita une douzaine d’équipes à se lancer dans la course pour mettre au point le premier laser, qui apparaissait également comme un champ de recherches prometteur. Les aspects théoriques du laser furent traités en 1958 par Townes et son post-doctorant Arthur Schawlow ([Schawlow and Townes 1958](#)), qui obtiendront tous deux le prix Nobel respectivement en 1964 et en 1981.

La course au laser fut remportée par le physicien américain membre de la *Hughes Aircraft Company*, Theodore Maiman, le 16 mai 1960 : il réalisa un laser solide à l’aide d’un cristal de rubis, en accord avec les considérations théoriques de Townes et Schawlow. Par pompage optique¹⁸ effectué grâce à des flashes lumineux, des atomes du cristal étaient excités dans une large bande d’énergie, puis se retrouvaient dans un même état excité suite

15. « Après lui avoir fait part du maser et de la pureté de sa fréquence, il déclara : « Cela ne peut être vrai ! ». [...] Von Neumann, après notre premier échange à cette fête à Princeton, erra et prit un autre verre. Environ 15 minutes plus tard, il était de retour. « Oui, vous avez raison », dit-il d’un ton brusque. » ([Townes \(1999\)](#), p.69 et 71)

16. Voir pour une histoire complète du maser et du laser en Amérique : [Bromberg \(1991\)](#).

17. « Entre 1950 et 1960, les ventes d’usine annuelles de produits électroniques grand public n’ont montré aucune augmentation, alors que les ventes de produits électroniques aux services militaires ont augmenté de 650% - sans prendre en compte l’inflation. Le premier raz-de-marée est venu avec la Guerre de Corée. » ([Forman \(1987\)](#), p.160).

18. Le pompage optique a été largement développé au Laboratoire de spectroscopie hertzienne à Paris, notamment par Alfred Kastler et Jean Brossel, dans les années 1950.

à des transferts non-radiatifs provoqués par des réarrangements du réseau cristallin (voir [Cagnac \(2010\)](#)). Les désexcitations des atomes à partir de ce même niveau créaient alors la lumière laser, ici de façon pulsée. Les travaux de Maiman ne furent pas immédiatement reconnus, puisque son article de juin 1960 concernant le laser à rubis fut refusé par les *Physical Review Letters*. Mais le 7 juillet exactement, ce fut la consécration : le *New York Times* annonça sur sa première page que la première amplification laser avait été réalisée par Maiman, même si ce n'était qu'un début : « Achievement of the first true amplification of light was claimed here yesterday by a Hughes Aircraft Company scientist. [...] Dr. Maiman reported a power gain of five for the amplifier signal over the input. Amplification by a factor of more than 100 is believed to be necessary for applying the laser. »¹⁹. Environ un mois plus tard, un court papier où Maiman présenta ses résultats fut publié dans *Nature* ([Maiman et al. 1960](#)).

Peu après le laser pulsé de Maiman, le premier laser continu à gaz (He-Ne) ne tarda pas à faire son apparition avec Ali Javan, en décembre 1960 (voir [Javan et al. \(1961\)](#)). Je noterai pour terminer que les lasers à gaz ont permis d'apprécier d'un point de vue expérimental les propriétés de cohérence exceptionnelles de la lumière laser. Par exemple, en 1963, deux physiciens français sont parvenus à obtenir des franges d'interférence avec un interféromètre de Michelson alimenté par une source laser pour une différence de marche atteignant cent mètres entre les deux miroirs ([Grudzinski and Paillette 1963](#)) !

A partir de 1960, le développement du laser ne cessa de croître et de stimuler l'intérêt des physiciens et des militaires. Il suscita aussi l'organisation de grandes conférences internationales ; l'une d'entre elles fut organisée avant même l'annonce de la mise au point du premier laser. Il s'agit de la Conférence de Rochester de 1960, essentiellement consacrée à la notion de cohérence, et que je vais maintenant présenter.

2.2 La première Conférence de Rochester (1960)

2.2.1 Organisation de la Conférence

L'objectif du « maser optique » était de produire une lumière dans le domaine optique avec les mêmes propriétés de cohérence que le maser. Ainsi, le concept de cohérence constituait un pont entre théoriciens et expérimentateurs soucieux de faire marcher leur laser ; c'est pourquoi le département de physique de *the Air Force Office of Scientific Research* encouragea la tenue d'une grande conférence sur ce thème²⁰. Cette conférence devait notamment permettre d'attirer l'attention des opticiens sur la cohérence du laser,

19. « La mise au point de la première vraie amplification de la lumière a été ici déclarée hier par un scientifique de la Hughes Aircraft Company. [...] Le Dr. Maiman a annoncé un gain en puissance d'un facteur 5 entre le signal amplifié et l'entrée. On pense qu'il est nécessaire d'avoir une amplification d'un facteur 100 afin de mettre en pratique le laser. » ([Osmundsen \(1960\)](#), p.1 & 7)

20. voir [Bromberg \(1991\)](#), p.106

qui n'était toujours pas bien comprise. En effet, le concept de cohérence demeurait encore assez limité : il était adapté pour décrire des processus d'interférences avec des ondes monochromatiques, mais pas des phénomènes d'amplification liés à l'émission stimulée de différents atomes, comme c'était le cas pour le laser. Wolf en fit lui-même état :

The subject of coherence was, at the time of my collaboration with Max Born, in its infancy. I became aware of it when I was working on the chapter concerning interference for our book. The theory of interference, as described in optics textbooks of that time, dealt mainly with monochromatic waves, not with wavefields that randomly fluctuate. These more complicated waves, which, in general, are partially coherent, can be adequately described only in statistical terms. While attempting to develop in our book a more satisfactory treatment of interference by using elementary statistical concepts, I was able to introduce a more realistic treatment of interference. It was a very fortunate coincidence that only a year after our book was published, the first lasers were developed, which triggered great interest in questions concerning coherence of light.²¹

L'organisation de la conférence fut confiée au directeur du prestigieux Institut d'Optique de l'Université de Rochester, Robert Hopkins. Afin de l'épauler dans cette tâche, il fit justement appel à Emil Wolf, déjà reconnu grâce à sa collaboration avec Born comme un spécialiste de la théorie de la cohérence – rappelons que la première édition des *Principles of Optics* est parue en 1959, donc juste avant la conférence de Rochester²². Les

21. « Du temps de ma collaboration avec Max Born, le sujet de la cohérence en était encore à ses balbutiements. Je m'en suis rendu compte quand je travaillais pour notre livre sur le chapitre concernant les interférences. La théorie de l'interférence, telle qu'elle était décrite dans les livres d'optique de l'époque, traitait principalement d'ondes monochromatiques, pas de champs qui fluctuent aléatoirement. Ces ondes plus compliquées qui, en général, sont partiellement cohérentes, ne peuvent être correctement décrites qu'en termes statistiques. Tandis que j'essayais de développer dans notre livre un traitement des interférences plus satisfaisant en utilisant des concepts statistiques élémentaires, j'étais en mesure d'introduire un traitement plus réaliste des interférences. Ce fut une heureuse coïncidence que, seulement un an après la publication de notre livre, les premiers lasers se soient développés. Ceux-ci déclenchèrent un vif intérêt pour les questions concernant la cohérence de la lumière. » (Wolf (2004), p.29).

22. Le fait que Wolf se soit penché sur le problème de la cohérence et qu'il ait écrit un chapitre entier à ce sujet dans *Principles of Optics*, alors que Born ne s'en préoccupait pas, apparut finalement comme une aubaine au regard des développements autour du laser et de l'intérêt porté pour la notion de cohérence lors de la Conférence de Rochester. Wolf raconte cette anecdote faisant à nouveau intervenir Born, et qui montre bien à quel point il s'intéressait à la cohérence à l'inverse de son mentor : « In 1957 I was a Visiting Scientist at the Courant Institute of New York University, still working on our book. One day I received a letter from Born asking me why the book was not yet finished. I replied that practically the whole manuscript was completed, except for a chapter on partial coherence on which I was still working. Born wrote back almost at once, saying something like, "Who apart from you is interested in partial coherence? Leave that chapter out and send the rest of the manuscript to the printers." Actually I completed that chapter shortly afterward and it was included in the book. It so happened that within about two years after the publication of our book (in 1959) the laser was invented and optical physicists

deux hommes se rencontrèrent en juillet 1958 à Manchester. Juste auparavant, dans une lettre, Hopkins avait également proposé à Wolf un poste à l'Université de Rochester, et ce dernier accepta l'offre, d'autant plus qu'il était selon lui très difficile d'obtenir un poste universitaire en Angleterre²³. Hopkins souhaitait que la Conférence se déroule en 1959, mais Wolf était encore retenu en Europe pour d'autres affaires. Ils se mirent donc d'accord pour que la Conférence se tienne en 1960. Wolf arriva à Rochester en juillet 1959, et commença avec Hopkins à former un comité pour organiser la conférence. Ils n'eurent pas de difficultés à trouver des financements, puisque *the Air Force Office of Scientific Research*, mais aussi *the Optical Society of America* et l'Université de Rochester elle-même soutinrent conjointement le projet. La Conférence eut finalement lieu du 27 au 29 juin 1960, moins de deux semaines avant l'annonce de la mise au point du premier laser par Maiman dans le *New York Times* – un joli hasard du calendrier !

2.2.2 Contenu de la Conférence

Selon Jason Harvey, bibliothécaire au Département de Physique et d'Astronomie de l'Université de Rochester, il n'existerait pas d'actes publiés de la conférence de 1960²⁴. En revanche, on peut connaître globalement les participants et le contenu de leurs interventions grâce à un article de Wolf (Wolf 2010) ainsi qu'à un rapport publié dans *Physics Today* en juin 1961 (O'Neill and Bradley 1961), soit un an après la conférence. L'événement fut d'une ampleur relativement faible, avec 36 communications et environ 200 participants venus de 7 pays différents²⁵ ; mais il y eut de nombreux invités de marque. La session d'ouverture fut animée par Ugo Fano, qui mit l'accent sur le manque de clarté et la polysémie du mot « cohérence », employé par beaucoup de monde dans des contextes différents. Hanbury Brown évoqua les expériences qu'il avait menées avec Twiss. Leonard Mandel – qui se trouvait encore à l'époque à l'Université de Londres – démontra théori-

and engineers then became greatly interested in questions of coherence. Our book was the first that dealt in depth with this subject, and Born was then as pleased as I was that the chapter was included. » : « En 1957, j'étais un scientifique visiteur à l'Institut Courant de l'Université de New York, et je travaillais toujours sur notre livre. Un jour j'ai reçu une lettre de Born me demandant pourquoi le livre n'était pas encore fini. Je lui ai répondu que l'ensemble du manuscrit était pratiquement terminé, mis à part un chapitre sur la cohérence partielle sur lequel j'étais encore en train de travailler. Born me répondit presque immédiatement en me disant quelque chose comme « Qui à part vous s'intéresse à la cohérence partielle ? Laissez ce chapitre de côté et envoyez le reste du manuscrit aux imprimeurs. ». En fait j'ai terminé ce chapitre peu de temps après, et celui-ci a été inclus dans le livre. Il s'est avéré que dans les deux ans environ qui ont suivi la publication de notre livre (en 1959), le laser a été inventé, et les physiciens opticiens ainsi que les ingénieurs accordèrent alors un grand intérêt aux questions de cohérence. Notre livre était le premier qui traitait en profondeur ce sujet, et Born fut à ce moment aussi heureux que moi de voir que le chapitre avait été inclus. » (Wolf (2004), p.45-46)

23. voir Wolf (1984).

24. Pourtant, dans Glauber (1987), Glauber affirme avoir consulté les *Proceedings* de cette conférence de Rochester, comme j'en ferai mention un peu plus loin.

25. voir Wolf (2010), p.4.

quement qu'il était possible sous certaines conditions d'obtenir des effets d'interférences à partir de deux faisceaux incohérents²⁶. Oliver Heavens, qui parlait à la Conférence au nom de Townes, fit part des dernières avancées sur le laser et rappela les difficultés liées à l'inversion de population dans le domaine optique. Il y eut également une présentation par Elias Snitzer consacrée aux fibres optiques et à la propagation dans les guides d'onde diélectriques.

Mais je voudrais insister plus particulièrement sur trois moments de cette Conférence. D'abord, comme j'ai souligné l'importance de Wolf dans l'histoire de la cohérence, il faut noter que celui-ci présenta lui-même sa fonction de cohérence mutuelle Γ déjà définie dans son article *Optics in terms of observable quantities* (1954), qui était une fonction de corrélation complexe d'ordre 2, et qui avait la dimension d'une intensité. Il faut également mentionner que la cohérence vue par Purcell comme des corrélations entre bosons nourrissait encore les discussions : Robert Dicke (de l'Université de Princeton) donna en effet une interprétation de l'effet HBT différente de celle de Purcell, lui aussi présent à la Conférence :

[Dicke] began by remarking that those coherence effects which have been explained on the basis of correlations between bosons, must also be susceptible to explanation in terms of emission probabilities from the source. In particular, the experiment of Hanbury Brown and Twiss can be explained by showing that if a source has already emitted a photon in a given direction, it is more likely to emit a second photon in the same direction.²⁷

Enfin, Theodore Forrester vint présenter l'expérience qu'il mena avec Richard Gudmunsen et Philip Johnson à l'Université de Californie du Sud (Los Angeles), et dont les résultats furent publiés en 1955 dans les *Physical Review Letters* (voir [Forrester et al. \(1955\)](#)). Les trois physiciens avaient observé des battements entre deux raies Zeeman d'une lampe à mercure, qui jouaient le rôle de deux sources indépendantes donc incohérentes entre elles. Pour cela, bien qu'ils aient utilisé des techniques différentes, ils mesurèrent comme dans l'expérience de Hanbury Brown et Twiss des corrélations entre fluctuations d'intensité : un effet qu'ils nommèrent « photoelectric mixing ». Pourtant, leur propre expérience semble avoir moins été discutée. Il faudrait mener de plus amples investigations pour comprendre le rôle exact qu'a joué cette expérience dans les discussions autour de la notion de cohérence et la raison pour laquelle l'Histoire semble avoir privilégié les expériences de Hanbury Brown et Twiss au détriment de celle-ci. Peut-être

26. Mandel réalisa en 1967 une expérience d'interférences en superposant deux faisceaux lasers indépendants; voir [Pfleeger and Mandel \(1967\)](#).

27. « [Dicke] a commencé par remarquer que ces effets de cohérence qui avaient été expliqués sur la base de corrélations entre bosons devaient également être susceptibles d'être expliqués en termes de probabilités d'émission de la source. En particulier, l'expérience de Hanbury Brown et Twiss pouvait s'expliquer en montrant que si la source avait déjà émis un photon dans une direction donnée, il était plus probable qu'un second photon soit émis dans la même direction. » ([O'Neill and Bradley \(1961\)](#), p.33)

aurait-elle moins diffusée ? Si l'on en croit Wolf, qui a pris connaissance de l'expérience de Forrester-Gudmunsen-Johnson à la Conférence de Rochester, celle-ci aurait gagné en intérêt grâce à celle de Hanbury Brown et Twiss :

In my opinion, [Forrester's papers] weren't written as clearly as many other papers, and in my opinion, [...] they would probably not have attracted very much attention at all if it were not for the Hanbery-Brown Twiss effect, which turned out to be relevant, also, the Hanbery-Brown Twiss effect because it generated a tremendous amount of interest, a lot of controversies, and so it was soon found Forrester's experiments somehow were related, and they essentially showed very similar features essentially, possibility of correlation experiments from incoherent sources, but in my opinion they were never as clearly understood as the Hanbery-Brown Twiss papers.²⁸

2.2.3 Les réserves de Roy Glauber

Un dernier point à propos de cette Conférence mérite d'être soulevé. Son objectif principal était de discuter et de clarifier la notion de cohérence, devenue incontournable car elle se trouvait à la charnière des expériences de Hanbury Brown et Twiss, qui alimentaient toujours les débats, et du laser, qui constituait une source de lumière inédite. Mais comment faire pour relier la notion de phase, étroitement liée à celle de cohérence, aux statistiques de photons propres à l'effet HBT ? Autrement dit, y avait-il un sens à parler de « phase du photon » ? Le physicien américain Roy Glauber, qui n'avait pas assisté à la Conférence mais qui avait lu des *Proceedings* auxquels il affirme avoir eu accès, a pointé cet écueil :

When the Conference *Proceedings* appeared, and I must say, I thought they were rather absolute rubbish. Again, you had people talking about, using the word photon, but not having any idea what they were talking about. To the extent that they were doing classical calculations, or what they called quasi-classical calculations, they usually made good sense. They weren't always correct. They weren't always appropriate. But once those particular people started talking about photons, they would talk nonsense. Because the people who characteristically talked about photons had no idea of the complementarity between photon numbers and phase. And that's the trap.²⁹

28. « A mon avis, [les papiers de Forrester] n'étaient pas écrits aussi clairement que bien d'autres papiers, et à mon avis, [...] ils n'auraient probablement pas attiré d'attention du tout s'il n'y avait pas eu l'effet HBT, parce que celui-ci s'est révélé pertinent, et aussi parce que l'effet HBT a généré un énorme intérêt et de nombreuses controverses. Et donc, on a compris que les expériences de Forrester y étaient liées d'une certaine façon, et qu'elles montraient des caractéristiques fondamentalement similaires et la possibilité d'avoir des expériences de corrélations à partir de sources incohérentes. Mais à mon avis, elles n'ont jamais été aussi bien comprises que les papiers de Hanbury Brown et Twiss. » (Wolf 1984)

29. « Je dois dire que, quand les *Proceedings* de la Conférence sont apparus, j'ai pensé que c'était

Au moment de la Conférence, comme nous le verrons bientôt plus en détail, Glauber travaillait déjà activement sur la question de savoir ce que donnerait un effet HBT pour le laser. Il semble donc que la lecture des *Proceedings* ait renforcé sa conviction que les états de photons³⁰, pour lesquels il semblait difficile de définir une phase, ne permettraient pas de rendre compte de ce phénomène.

Mais pendant ses recherches, Glauber n'a pas seulement été marqué par les comptes rendus de la Conférence de Rochester. Il a surtout été choqué un an plus tard par un article dans lequel Wolf et Mandel ont tâché de caractériser la cohérence du laser ([Mandel and Wolf 1961](#)). Je propose donc désormais d'étudier cet article, en précédant le tout d'une courte biographie de Mandel.

2.3 Quel serait l'effet HBT pour le laser ?

2.3.1 Quelques mots sur Leonard Mandel (1927 - 2001)

Leonard Mandel³¹ naquit à Berlin en 1927, où il mena de brillantes études avant de devoir émigrer avec ses parents en Angleterre, à cause de la montée du nazisme et de l'antisémitisme. La guerre l'y rattrapa néanmoins : il connut les nuits passées sur les quais du métro londonien, lorsque les Allemands frappèrent la ville par des attaques aériennes durant le *Blitz*.

Il suivit au Pays de Galles et en Angleterre une formation d'excellence, durant laquelle il découvrit la physique : une passion qui ne devait plus le quitter, et à laquelle il allait consacrer sa vie. Ne possédant pas la nationalité anglaise, il ne put prétendre à certaines bourses, et fut recalé à Cambridge ; il postula alors pour l'Université de Londres, où il fut reçu. Il y commença sa carrière par un doctorat de physique dans le domaine des rayons cosmiques.

Après un passage par la société de produits chimiques Imperial Chemical Industries (ICI), où il s'intéressa en particulier aux limitations dues au bruit dans les tubes Geiger, il devint professeur à l'Imperial College de Londres.

C'est aussi à l'Imperial College que Mandel commença à travailler avec Emil Wolf, avec qui il allait continuer d'entretenir une longue et étroite collaboration. Wolf, qui déménagea

plutôt un gros tas de débris. Là encore, vous aviez des gens qui parlaient du photon et qui utilisaient le mot, mais sans savoir aucune idée de ce dont ils parlaient. Quand ils faisaient des calculs classiques, en tous cas ce qu'ils appellent des calculs classiques, cela avait généralement du sens. Ils n'étaient pas toujours corrects. Ils n'étaient pas toujours adaptés. Mais dès que ces gens commençaient à parler de photons, cela devenait absurde. Parce que typiquement, les gens qui parlaient du photon n'avaient aucune idée de la complémentarité entre le nombre de photons et la phase. Et c'est là qu'est le piège. » ([Glauber 1987](#))

30. Les états de photons $|n\rangle$, « ou états de Fock », sont les états quantiques décrivant un champ avec un nombre fixé n de photons.

31. Robert J. Scully, Marlan O. Scully et Jeff Kimble ont écrit ensemble une biographie de Mandel : voir [Scully et al. \(2005\)](#).

aux Etats-Unis pour travailler à l'Université de Rochester, à New-York, insista pour que Mandel l'y rejoigne – ce qu'il fit en 1964. Il y demeura professeur jusqu'à la fin de ses jours, et assista Wolf en particulier dans l'organisation des Conférences de Rochester à partir de celle de 1966. On comprend mieux la grande proximité à tous points de vue entre Wolf et Mandel en lisant ce témoignage de Wolf sur son collègue : « During my much longer association [compared to Born] with Len Mandel which extended over several decades, there was not a single occasion, as far as I can remember, when we had any disagreement, neither about science, nor about much trickier subjects such as departmental and national politics. »³².

Salué pour sa gentillesse, sa dévotion envers ses étudiants, la qualité de son enseignement et sa personnalité avenante, Mandel s'est éteint en 2001 après une carrière largement consacrée à l'optique quantique, à laquelle il apporta des contributions majeures aussi bien théoriques qu'expérimentales.

2.3.2 L'hypothèse de Wolf et Mandel

Après l'apparition du premier laser, il devenait crucial de caractériser sa cohérence d'un point de vue théorique, donc de donner le comportement de la fonction de corrélation. C'est en tâchant d'apporter une solution à ce problème que Mandel et Wolf commirent une célèbre erreur de raisonnement à l'origine d'une cinglante controverse avec Glauber.

Inspirés par les récents résultats obtenus par Hanbury Brown et Twiss, Mandel et Wolf se demandèrent comment exprimer les corrélations entre fluctuations d'intensité en sortie de deux photodétecteurs soumis à une onde plane (Mandel and Wolf 1961), en adoptant une approche à la fois simple et générale, et en utilisant le formalisme des fonctions de corrélation introduites par Wolf peu auparavant. Les auteurs espéraient ainsi donner une expression de la corrélation permettant de décrire à la fois les expériences de Hanbury Brown et Twiss et le laser.

Ils obtinrent effectivement une formule générale, fondée sur un nombre très restreint d'hypothèses, comme Mandel et Wolf le notaient eux-mêmes : « In deriving the main formula, no restrictive assumptions have been made about the light beyond those implied in the assumption that the underlying random process is stationary and Gaussian to second order. »³³. Mais peut-on vraiment affirmer que les fluctuations de la lumière laser suivent une statistique gaussienne ?

Dans le cas de l'expérience en laboratoire de Hanbury Brown et Twiss, la fonction

32. Durant ma bien plus longue collaboration avec Len Mandel [comparé à Born], qui s'est étendue sur plusieurs décennies, il n'y a pas eu un seul moment, de ce dont je peux me souvenir, où nous avons été en quelconque désaccord, ni à propos de la science, ni à propos de sujets bien plus délicats comme les politiques nationale et départementale. » (Wolf (2010), p.6)

33. « Dans la dérivation de la principale formule, aucune hypothèse contraignante sur la lumière n'a été faite au-delà de celles qui résultent de la supposition que le processus aléatoire sous-jacent est stationnaire et gaussien au second ordre. » (Mandel and Wolf (1961), p.1699)

de corrélation vaut 2 lorsque les deux détections sont simultanées, et décroît jusqu'à 1 à mesure que les clics dans les deux photodétecteurs se désynchronisent, avec un temps caractéristique qui correspond à la longueur de cohérence temporelle du train d'onde. A l'instar de Wolf et Mandel, on pourrait donc être tenté d'affirmer que plus la lumière est cohérente – comme c'est le cas pour le laser – plus ce temps de cohérence va s'allonger, et donc plus les corrélations seront conservées malgré l'écartement progressif des photodétecteurs. Autrement dit, si la fonction de corrélation (qui dépend de la distance entre les deux photodétecteurs) chute rapidement de 2 à 1 dans le cas d'une source thermique, elle devrait décroître beaucoup moins rapidement dans le cas d'une source laser (voir figure 2.1).

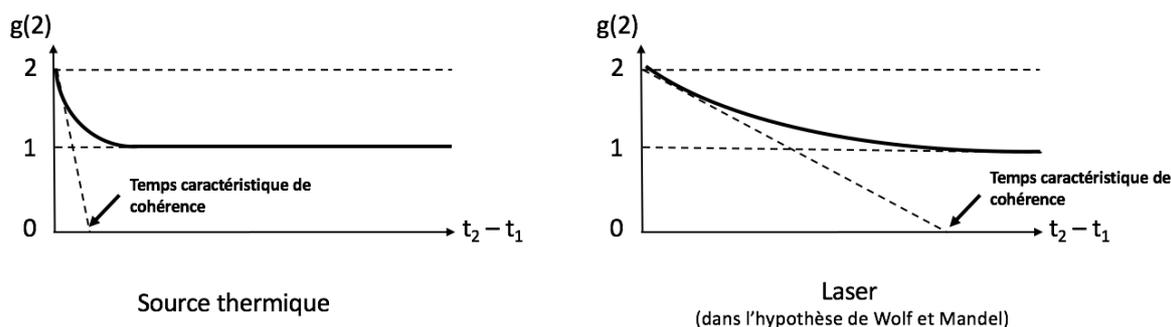


FIGURE 2.1: Schéma de l'évolution de la fonction de corrélation d'ordre 2 en fonction de la différence entre les temps d'arrivée t_1 et t_2 des photons au niveau des deux photodétecteurs, dans le cas d'une source thermique, et dans le cas d'une source laser (sous l'hypothèse de Wolf et Mandel). $t_2 - t_1$ dépend directement de l'écartement entre les deux photodétecteurs; en particulier, si $t_1 = t_2$, cela signifie que les deux photodétecteurs sont superposés par rapport à l'axe de la lame séparatrice (voir figure 1.2). La cohérence du laser étant bien plus importante que celle d'une source thermique, Wolf et Mandel ont supposé que la fonction de corrélation décroîtrait beaucoup plus lentement dans le cas du laser. Si le laser était idéal, la fonction de corrélation pourrait même demeurer constante égale à 2.

Mais en fait, avec un tel raisonnement, le problème est pris à l'envers : dans l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, c'est *parce qu'il y a des fluctuations d'intensité* que la fonction de corrélation monte à 2, et non parce que la lumière est de plus en plus cohérente. En supposant un champ gaussien pour le laser, Wolf et Mandel faisaient donc l'hypothèse de fluctuations d'intensité qui, en réalité, n'existaient pas, puisque l'amplitude du champ était en tout point la même. Joan Lisa Bromberg, dans son article sur l'histoire du débat autour de la cohérence du laser, explique pourquoi l'hypothèse du champ gaussien pour le laser était erronée :

The proof that the photons in a thermal field obey Bose-Einstein statistics ³⁴

34. Bromberg précise juste avant que se demander si un champ vérifie une distribution de probabilité

depended on the assumption that the atoms that emit them follow a thermal distribution, with more atoms in lower than in upper energy states. Lasers, however, made use of inverted populations, with more of its atoms in the more energetic levels.³⁵

On peut également voir le problème sous un autre angle. Le calcul semi-classique des corrélations entre fluctuations d'intensité dans les expériences de Hanbury Brown et Twiss fait apparaître que le rapport signal/bruit est d'autant meilleur que la densité spectrale est élevée. Or dans le cas du laser, la densité spectrale est immense puisque la lumière est quasiment monochromatique (donc l'énergie est concentrée sur une très petite plage de longueurs d'onde). Ainsi, là encore, on aurait envie de dire que plus la lumière est monochromatique, plus l'effet HBT sera important.

Comme nous le verrons, Glauber a compris que cela était faux, et que la cohérence du laser n'était pas la même que celle d'une source thermique. Mais pour le moment, restons avec Wolf et Mandel et concentrons-nous encore sur la théorie de la cohérence classique³⁶. Pour cela, penchons-nous sur la Conférence d'Electronique Quantique qui eut lieu à Paris en 1963, où Wolf et Mandel eurent chacun l'opportunité de présenter leur vision de la cohérence, et en particulier celle du laser.

2.4 La Conférence d'Electronique Quantique de Paris (1963)

2.4.1 Présentation générale de la Conférence

La Conférence d'Electronique Quantique de Paris fut de bien plus grande ampleur que les deux précédentes, qui s'étaient tenues à New York et en Californie, respectivement en 1959 et en 1961. Ces trois conférences furent soutenues financièrement notamment par la marine, représentée par *the Office of Naval Research*. Celle de 1963 dura cinq jours, et accueillit plus de mille personnes venues de quinze pays différents, soit sept fois plus que pour la première conférence, et deux fois et demi plus que pour la seconde. Cette hausse de fréquentation traduisait un intérêt croissant des physiciens théoriciens comme des ingénieurs pour le maser, le laser et leurs applications, notamment en spectroscopie.

gaussienne revient à se demander si les photons suivent une statistique de Bose-Einstein. Il faudrait mener de plus amples recherches en théorie des statistiques pour justifier rigoureusement ce lien.

35. « La preuve que les photons dans un champ thermique suivent une statistique de Bose-Einstein dépendait de l'hypothèse que les atomes qui les émettent suivent une distribution thermique, avec plus d'atomes dans les états d'énergies basses que dans les états d'énergies hautes. Pourtant, les lasers faisaient usage des inversions de populations, avec la plupart des atomes dans des niveaux d'énergies élevées. » (Bromberg (2016), p.246-247).

36. Celle-ci sera mise en contraste avec la théorie de la cohérence quantique de Glauber dans le chapitre suivant.

L'électronique quantique se trouvait justement à la charnière du laser et de la spectroscopie, ce qui selon Nicolaas Bloembergen justifiait le titre donné à la Conférence : « The subject of quantum electronics was initially defined as the frontier between electronics and spectroscopy. These two fields of science were welded close together by the development of microwave spectroscopy and magnetic resonance techniques immediately following World War II. »³⁷. A cela s'ajoutent par exemple la physique des décharges dans les gaz et de la luminescence dans les solides, en lien avec les lasers, ainsi que l'étude de l'effet photoélectrique.

Le programme de la conférence – largement consacré au maser et au laser – était supervisé par Nicolaas Bloembergen, physicien néerlandais naturalisé américain pionnier dans le domaine de la spectroscopie laser, et lauréat du prix Nobel de physique en 1981. Le Comité Scientifique franco-américain était dirigé par Bloembergen, tandis que le Comité d'Organisation était supervisé par Pierre Grivet. Le thème de la cohérence fit l'objet de toute une partie de la Conférence qui – si l'on s'en tient à l'ordre des *Proceedings* – se déroula au tout début. Parmi les intervenants sur le sujet de la cohérence figuraient sans grande surprise Wolf, Mandel et Glauber. Je vais donner un aperçu de leurs présentations³⁸, mais je vais aussi évoquer les retranscriptions des séances de questions-réponses à l'issue de celles-ci, car c'est là que l'on commence à sentir des points de vue irréconciliables avec Glauber d'un côté, et Wolf et Mandel de l'autre.

2.4.2 L'exposé de Wolf

Dans son exposé³⁹, Wolf présenta à nouveau sa propre définition de la cohérence, qui faisait usage de ses fonctions de corrélations (fondées sur des quantités observables), ainsi que le degré de cohérence qu'il était possible de définir à partir de celles-ci. Il mit l'accent sur la fonction de corrélation d'ordre 2, notée alors Γ_{12} . Wolf faisait remarquer que ces fonctions étaient également appelées « fonctions de cohérence mutuelle », en référence au fait qu'elles intégraient à la fois la cohérence spatiale et la cohérence temporelle. Pour les phénomènes du premier ordre, il était possible de distinguer la cohérence spatiale de la cohérence mutuelle. Par exemple, dans le cas d'une expérience de fentes de Young, la cohérence temporelle correspondait à la différence de marche entre les deux faisceaux en sortie des fentes atteignant un même point sur l'écran, et la cohérence spatiale était liée au fait que la source n'est pas parfaitement ponctuelle. Mais dès lors qu'on s'intéressait à des phénomènes d'ordre supérieur, comme dans l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, les deux types de cohérence ne pouvaient plus être traités indépendamment l'un de l'autre,

37. « Le sujet de l'électronique quantique était à l'origine défini comme la frontière entre l'électronique et la spectroscopie. Ces deux domaines de la science étaient soudés l'un à l'autre par le développement de la spectroscopie micro-onde et les techniques de résonance magnétique juste après la Seconde guerre mondiale. » (Bloembergen (1964), p.XIII-XIV)

38. Sauf celle de Glauber, car j'exposerai sa théorie quantique de la cohérence au chapitre suivant.

39. voir Wolf (1964).

car les corrélations entre les photons dépendaient à la fois des temps de détection et des positions des photodétecteurs. Il devenait donc nécessaire de réunir les cohérences spatiale et temporelle dans un même concept : c'est ce que symbolisaient les fonctions de corrélations de Wolf, qui faisaient intervenir des champs électriques dépendant à la fois du temps et de l'espace.

Wolf s'est ensuite attaché à montrer comment le laser pouvait manifester une cohérence spatiale, alors que les différentes sources (représentées par les différents atomes émetteurs) étaient incohérentes entre elles. La cohérence spatiale n'était pas une propriété immédiate du laser (ici considéré solide) : « A quasi-monochromatic light which is initially only partially space coherent or even completely incoherent, will, after a sufficient number of transits through the elements of a periodic structure⁴⁰ become completely space-coherent, even though the structure is passive in the sense that no light is generated within it. The spatial coherence is created by the process of propagation⁴¹ and diffraction. »⁴². Wolf ajoutait que l'émission stimulée ne servait qu'à compenser les pertes liées à la réflexion et à la transmission au niveau des miroirs.

La présentation de Wolf s'acheva sur une étude des corrélations entre fluctuations d'intensité, en prenant pour exemple l'expérience en laboratoire de Hanbury Brown et Twiss. Celle-ci faisait en effet intervenir des fonctions de cohérence mutuelle d'ordre 2, à savoir des produits d'intensités instantanées en deux points différents de l'espace-temps.

2.4.3 L'exposé de Mandel

Dans son intervention (plus courte), alors que Wolf se limita à un cadre strictement classique, Mandel utilisa les formalismes classique *et* quantique afin de mettre en évidence les différences entre la lumière maser et la lumière sortant d'une source thermique. Mandel commença par rappeler qu'on pouvait représenter le faisceau d'une source thermique par un ensemble de photons, et que la distribution des photons dans les cellules de l'espace des phases suivait une statistique de Bose-Einstein. Et Mandel d'affirmer ensuite :

In an optical maser on the other hand a few (possibly only one) strongly preferred transitions occur. They are mainly stimulated and saturate the available radiators. As a result of a few highly populated quantum states are found in the beam and the photon numbers in different energy states are no longer statistically independent. The beam can therefore no longer be represented in

40. Dans le cas du laser, il s'agit du milieu amplificateur délimité par deux miroirs.

41. Ce processus est représenté par les deux équations d'onde que vérifient les fonctions de cohérence mutuelle, et que j'ai évoquées au début de ce chapitre.

42. « Une lumière quasi-monochromatique qui est au départ seulement partiellement cohérente spatialement, ou même complètement incohérente, deviendra complètement cohérente spatialement après un nombre suffisant d'aller-retours à travers les éléments d'une structure périodique – même si la structure est passive dans le sens où aucune lumière n'est générée à l'intérieur. » (Wolf (1964), p.25)

terms of ensembles of single photon states.⁴³

J'ai souhaité mettre ce passage en exergue afin de montrer que Mandel a compris que les états de photons ne seraient pas adaptés pour décrire le laser. Comme tous les atomes émettaient dans un même mode, le nombre de photons détectés dans un petit intervalle de temps devait suivre non pas une statistique de Bose-Einstein, mais une statistique de Poisson⁴⁴. Ce résultat remettait en cause la prédiction d'un effet HBT pour le laser ; ainsi, on peut dire que dès la Conférence de 1963 (et certainement même avant), Mandel avait changé d'avis par rapport à son article de 1961 avec Wolf. Voici ce qu'il déclara :

The same Poisson distribution applies also to the number of counts registered by a photo-detector exposed to an ideal maser beam for a short time. One consequence of this is that two such coherent beams⁴⁵ will show no correlation in the sense of the Hanbury Brown-Twiss experiment.⁴⁶

Mandel continua sa présentation en décrivant les sources thermiques et les masers de façon classique, avant de conclure sur les fonctions de corrélation d'ordre supérieur.

A la suite de Wolf et Mandel, Glauber donna lui aussi une conférence ; mais plutôt que de m'attarder sur son contenu, je préfère me pencher dans le dernier chapitre de ce mémoire sur l'ensemble de la théorie quantique de la cohérence de Glauber, telle qu'il l'exposa dans ses articles de 1963. Je reviendrai alors sur la Conférence de Paris, et notamment sur les échanges entre Wolf, Mandel et Glauber à l'issue de leurs présentations respectives. Ces discussions, qui marquèrent le début d'une longue controverse, mirent en lumière de profondes divergences entre la position quantique de Glauber et la position classique de Wolf et Mandel.

43. « D'autre part, dans un maser optique, quelques transitions fortement privilégiées (voire une seule) se produisent. Elles sont principalement stimulées et saturent les radiations disponibles. En conséquence, quelques états quantiques fortement peuplés se trouvent dans le faisceau et le nombre de photons dans différents états d'énergie ne sont plus statistiquement indépendants. Le faisceau ne peut ainsi plus être représenté en termes d'ensembles d'états de photon individuel. » (Mandel (1964), p.102)

44. Glauber avait lui aussi déjà trouvé ce résultat par un traitement quantique dans son article « Photon Correlations », publié juste avant la Conférence de Paris. Pour plus de détails, voir la note 50.

45. En référence aux deux faisceaux en sortie de la lame séparatrice dans une expérience de type Hanbury Brown et Twiss.

46. « La même distribution de Poisson s'applique aussi pour le nombre de photons enregistrés par un photodétecteur exposé à un faisceau maser idéal pendant une courte durée. Une conséquence de cela est que deux faisceaux aussi cohérents ne manifesteront aucune corrélation au sens d'une expérience de Hanbury Brown et Twiss. » (Mandel (1964), p.103)

Chapitre 3

Roy Glauber et la naissance de l'optique quantique

On pourrait être tenté de désigner les expériences de Hanbury Brown et Twiss – en même temps que celles de Brannen et Ferguson – comme la naissance de l'optique quantique, puisqu'elles ont inauguré l'étude des statistiques de photons. En effet, ce sont bien des expériences d'optique, car elles s'intéressent à la lumière, et le fait qu'elles portent sur des corpuscules de lumière, les photons, semble attester leur appartenance au domaine quantique. Mais cela est trompeur, car dans les années 1950, toutes ces expériences ont été interprétées de façon classique ou semi-classique. Personne n'a pensé décrire simultanément le rayonnement et le processus de photodétection de façon entièrement quantique. Si l'on considère que l'optique quantique se réfère à une description intégralement quantique des phénomènes, alors on ne peut en parler qu'à partir des travaux de Roy Glauber, qui a franchi ce pas décisif. Glauber est, à n'en point douter, le personnage clé dans la naissance de l'optique quantique, et c'est pourquoi j'ai jugé opportun de lui consacrer une section à part entière, pour mettre en valeur l'importance de ses travaux au regard des avancées expérimentales que constituèrent les expériences de Hanbury Brown et Twiss et l'invention du laser.

L'objectif de ce chapitre est d'abord de montrer comment Glauber a été amené à formuler une nouvelle théorie - en l'occurrence quantique - de la cohérence. Pour cela, j'analyserai des extraits choisis de l'interview de Glauber par Bromberg (1987), dans laquelle il retrace le cheminement de sa pensée l'ayant conduit à adopter les états dits « cohérents »¹, qui sont au cœur de sa théorie quantique de la cohérence. Celle-ci sera étudiée par la suite en détail, et sera mise en perspective de la théorie de la cohérence classique à travers les débats entre Wolf, Mandel et Glauber à la Conférence de Paris. Enfin, je terminerai en évoquant l'Ecole d'été des Houches de 1964, où Glauber présenta encore plus précisément ses travaux, et en tentant d'expliquer pourquoi il n'y a pas eu de théorie de Glauber avant Glauber.

1. On doit cette dénomination à Glauber lui-même.

Mais en premier lieu, je vais donner quelques éléments biographiques surtout afin de montrer que Glauber, avant de s'intéresser à l'optique, provenait de la physique des particules et de la théorie quantique des champs, ce qui l'a sans nul doute inspiré dans l'élaboration d'une théorie quantique du rayonnement.

3.1 Quelques mots sur Glauber (1925 - 2018)

Roy Glauber² vécut toute son enfance à New-York, ville où il est né en 1925, bien qu'il changeât fréquemment de quartier. Sa première rencontre avec la science, alors qu'il n'avait que sept ans, fut pour le moins risquée. Intrigué par l'électricité, il décida un matin de piéger ce qui passait à travers les fils qui allumaient une lampe. Pour ce faire, il attachait les fils de la lampe à une prise mâle, qu'il branchait sur le secteur. Ce fut son premier court-circuit, qui aurait pu lui coûter la vie : « There was a bright blue flash at that end [l'extrémité libre des fils], accompanied by a muffled bang. That was followed by a silence, till my parents awoke and began wondering why none of the light switches seemed to be working. »³ Au-delà de cette anecdote, les dix premières années de Glauber ne laissaient pas présager qu'il deviendrait physicien. Doté d'un talent de dessinateur, Glauber aurait voulu devenir artiste, mais le manque de réussite de son oncle dans cette voie le découragea.

La vocation scientifique de Glauber se déclara en 1937, à 12 ans, lorsqu'il lut son premier livre d'astronomie. Pris de passion pour cette discipline, il entreprit de construire un petit télescope, ce qu'il accomplit en neuf mois. En 1938, il intégra une école nouvellement créée qui proposait un enseignement axé sur les sciences, où il se mit à apprécier les mathématiques qui l'avaient jusqu'alors ennuyé. En parallèle, il continua d'entretenir sa passion pour les instruments d'optique : en particulier, il monta un spectroscope qu'il eut l'occasion de présenter en 1939 (ainsi que son télescope) dans un congrès scientifique.

En 1941, Glauber obtint une bourse et intégra la prestigieuse Université d'Harvard. La même année, le 7 décembre exactement, eut lieu l'attaque de Pearl Harbor qui engendra l'entrée en guerre des Etats-Unis. Lorsque Glauber atteignit ses 18 ans, en septembre 1943, il était prêt à s'engager ; mais un homme qui ne révéla pas immédiatement son identité lui rendit visite à Harvard, et lui proposa de participer à un projet « intéressant » à Santa Fe, dans le Nouveau-Mexique, sans lui donner de détails. Intrigué, Glauber accepta l'offre en se doutant qu'elle aurait un rapport avec la fission de l'uranium, découverte en 1939, et avec l'espoir de produire des réactions en chaîne – ce dont il avait eu connaissance en lisant la presse. Plus tard, il comprit que l'homme mystérieux n'était autre que John von

2. Glauber a écrit une autobiographie disponible sur internet : [Glauber \(2005a\)](#).

3. « Il y eut un éclair bleu brillant à cette extrémité [où les fils étaient libres], accompagné d'une détonation assourdissante. Cela s'est prolongé par un silence, jusqu'à ce que mes parents se réveillent et commencent à se demander pourquoi aucun des interrupteurs ne semblait fonctionner. » ([Glauber 2005a](#))

Neumann, et qu'il venait de s'engager dans le projet Manhattan. Lorsqu'il apprit que ce projet avait vocation à façonner une bombe, il fut à la fois surpris et choqué, et mit plusieurs semaines à digérer cette nouvelle – lui qui pensait que les recherches se limitaient à la possibilité de réaliser des réactions en chaîne. Il travailla sur la diffusion des neutrons et notamment sur la masse critique nécessaire à l'enclenchement de la réaction en chaîne, aux côtés d'éminents physiciens comme Robert Oppenheimer ou Richard Feynman, alors que lui n'était âgé que de 18 ans !

De retour à Harvard après la guerre, en 1946, Glauber obtint son diplôme et fit une rencontre déterminante avec Julian Schwinger. Il réalisa sous la direction de ce dernier un doctorat consacré à la théorie quantique des champs, avant de passer un an à Zürich aux côtés de Wolfgang Pauli puis un an à Caltech en tant que professeur remplaçant de Feynman. Il revint ensuite à Harvard où il devint directeur de recherches, et s'intéressa aux grandes avancées des années 50, à savoir la mise au point du maser et du laser, ainsi que la découverte de l'effet HBT. Il demeura à Harvard pour le restant de sa carrière, où il fut professeur et où il mena d'autres recherches. Bien qu'il restât fidèle à l'optique quantique, il revint également à la physique des particules, et développa notamment le « modèle de Glauber » dans le cadre des collisions à haute énergie.

Bien après ses travaux fondateurs de 1963, il fut récompensé par le prix Nobel de Physique en 2005 « pour sa contribution à la théorie quantique de la cohérence optique ». Et quand on lui faisait remarquer qu'il était surnommé le « père de l'optique quantique », voici le trait d'humour que ses 80 ans lui suggéraient : « I hope it's not just a reference to my considerable age. »⁴.

Glauber nous a quittés le 26 décembre 2018, peu avant la rédaction de ce mémoire.

3.2 Les origines de la théorie de Glauber

Au début des années 1960, Glauber s'intéressait de près au lien théorique entre les corrélations observées dans les expériences de Hanbury Brown et Twiss et les éventuelles corrélations liées au laser, et ces recherches ne relevaient pas de la simple curiosité. En effet, un chercheur de la *American Optical Company*, Saul Bergmann, était venu demander à Glauber au nom de la société d'étudier ce que donnerait un effet HBT dans le cas du laser. « Here was a strange thing, he said that he would set up a consulting arrangement of some sort with American Optical, because this could have some practical interest to them, and so, for some months I did put in time on this, and was paid by them, not as consultants really are paid, but I was paid something »⁵. Le moins que l'on

4. « J'espère que ce n'est pas juste une référence à mon âge considérable. » (Glauber 2005c)

5. « Ce fut une chose étrange : il m'a dit qu'il mettrait en place une sorte d'accord dans le domaine du conseil avec l'American Optical, parce que cela pouvait avoir de l'intérêt pour eux. Et donc, pendant quelques mois j'y ai consacré du temps, et j'étais payé par eux – pas comme les vrais consultants, mais j'étais payé quelque chose » (Glauber 1987)

puisse dire, c'est que Glauber se montra dans son interview avec Bromberg sans pitié envers Bergmann. Ce dernier continua de rendre régulièrement visite à Glauber, mais sans comprendre ses idées : « I didn't know quite what to make of Bergmann because Bergmann really did not illuminate anything. He knew nothing. »⁶. Mais Bergmann a au moins été utile en ceci : grâce à lui, Glauber a pris connaissance de l'article de Wolf et Mandel évoqué dans la section précédente (Mandel and Wolf 1961). Comprenant que Wolf et Mandel faisaient fausse route avec l'hypothèse des fluctuations gaussiennes, Glauber a rapidement eu l'intuition que le laser ne manifesterait pas de corrélations de type HBT.

Mais comment expliquer le manque d'effet HBT pour le laser avec des photons ? Comment rendre compte de la cohérence du laser, avec des photons qui ne font pas intervenir la notion de phase pourtant essentielle ?

The laser, it was understood in a sense, in terms of rate equations, and curiously, those rate equations were constructed involving quantum mechanical states and they talked about numbers of photons, but what was weird about it was that there was nothing in the world more coherent than the laser, and yet the whole notion of phase was left out of those equations completely.⁷

Certainement marqué par l'incapacité des physiciens à donner un sens à la « phase du photon », Glauber a progressivement compris qu'il fallait utiliser d'autres états que les états de Fock, qui correspondaient chacun à un nombre bien défini de photons, afin de décrire l'effet HBT pour le laser. Glauber a relaté lui-même les difficultés qu'il avait rencontrées et l'évolution de sa réflexion à ce sujet :

It's very difficult to recount the stages, but all of these early ones were ones of disillusion, and the feeling that, my God, photons are never going to explain this. I can't see what the explanation is in terms of photons. Then, I began to switch over to the notion of using states other than the photon states, and having this association with my earlier work [...], I began looking at it in terms of coherent states.⁸

Ces états constituent la substantifique moelle de la théorie quantique de la cohérence, que je vais maintenant exposer en me fondant sur les travaux de Glauber de 1963.

6. « Je ne savais pas trop quoi faire de Bergmann parce que Bergmann n'était vraiment pas une lumière. Il ne connaissait rien. » (Glauber 1987)

7. « Le laser était compris en un certain sens, en termes d'équations de variation, et curieusement, ces équations de variation étaient construites en faisant intervenir des états de la mécanique quantique, et parlaient de nombres de photons. Mais ce qui était étrange à ce propos, c'était qu'il n'y avait rien de plus cohérent que le laser dans le monde, et que jusqu'alors l'entière notion de phase avait été complètement bannie de ces équations. » (Glauber 1987)

8. « Il est très difficile de retracer les étapes, mais toutes les premières d'entre elles furent des moments de désillusion, et le sentiment que, mon Dieu, les photons ne pourront jamais expliquer cela. Je ne vois pas quelle est l'explication en termes de photons. Puis, j'ai commencé à me faire à l'idée d'utiliser des états autres que les états de photons, et comme j'avais ce lien avec mes travaux antérieurs [...], j'ai commencé à regarder [le problème] en termes d'états cohérents. » (Glauber 1987)

3.3 1963, *annus mirabilis* de l'optique quantique

1963 constitua le point de confluence entre l'histoire du photon, ravivée par les expériences de Hanbury Brown et Twiss, et l'histoire de la cohérence, marquée par l'invention du maser puis du laser. C'est en effet cette année-là que Glauber soumit à la *Physical Review* deux articles fondamentaux, qui établirent les bases théoriques de l'optique quantique en inaugurant la description des statistiques de photons de façon purement quantique : « The Quantum Theory of Optical Coherence », reçu le 11 février et publié en juin, ainsi que « Coherent and Incoherent States of the Radiation Field », reçu le 29 avril et publié en septembre.

Ces deux articles - cela mérite d'être souligné dès maintenant - sont d'une limpidité tout à fait remarquable. Glauber prend soin de bien présenter ses nouveaux concepts et d'expliquer dans le détail la logique de son raisonnement, dans un style agréable à lire. Il dépouille de plus ses textes de toute notation superflue, de sorte que même les passages techniques mathématiquement, qui ne deviennent jamais trop complexes et s'accompagnent toujours de justifications, se lisent aisément. Finalement, l'ensemble ressemble presque à un cours, très structuré, dans lequel on ne se perd jamais. J'espère, dans la suite de ce chapitre, rendre compte de cette clarté du discours propre à Glauber.

J'insistais à l'instant sur l'importance de l'année 1963 dans la genèse de l'optique quantique ; mais si je devais me prononcer encore plus précisément sur la date de naissance de l'optique quantique, du moins d'un point de vue théorique, je désignerais le lundi 11 février 1963. Hasard, ou synchronicité ? En plus d'être le jour où la *Physical Review* a reçu le premier des deux articles susmentionnés, c'est la date à laquelle s'ouvrait la Conférence de Paris, où Glauber eut l'occasion de présenter ses récents travaux devant un large public international⁹.

Afin de comprendre en quoi ces travaux ont marqué un tournant dans l'histoire de l'optique et pourquoi ils ont suscité la polémique, entrons dans le détail des deux articles de 1963.

3.3.1 Une nouvelle théorie de la photodétection

Dérivation des fonctions de corrélation d'ordre 1

Quel est le point de départ de la théorie de Glauber ? On pourrait croire que c'était la quantification du champ, c'est-à-dire mathématiquement le passage du champ électrique classique \mathbf{E} à l'opérateur $\hat{\mathbf{E}}$ ¹⁰. Formellement, c'était bien le cas, car que ce soit dans son premier article de février 1963 ou dans sa présentation lors de la Conférence de Paris, Glauber quantifiait le rayonnement et définissait les opérateurs création et annihilation¹¹,

9. C'est aussi le jour où les Beatles enregistrèrent leur premier album. A marquer d'une pierre blanche !

10. Pour éviter toute confusion, dans tout ce qui suit, j'indique les opérateurs par des chapeaux.

11. Ces opérateurs décrivent respectivement l'émission et l'absorption d'un photon.

en séparant l'opérateur $\hat{\mathbf{E}}$ en deux composantes $\hat{\mathbf{E}}^{(-)}$ et $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ ¹². Mais conceptuellement, ce n'était pas nouveau, puisque Dirac disposait déjà des opérateurs création et annihilation près d'un demi-siècle plus tôt !

Le vrai point de départ de la réflexion de Glauber réside dans *une nouvelle description du processus de photodétection faisant appel au champ quantique*. Dans les expériences classiques, on mesure des valeurs moyennes du champ, donc on ne se préoccupe pas des émissions et des absorptions de photons individuels. De ce fait, avant Glauber – comme nous avons eu l'occasion de le voir – le traitement semi-classique de la photodétection se traduisait par l'hypothèse que la probabilité d'émission d'un photoélectron était proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde incidente. L'originalité de Glauber est d'avoir quantifié le champ électromagnétique pour représenter la photodétection en termes d'absorption de photons individuels :

Experiments which detect photons ordinarily do so by absorbing them in one or another way. The use of any absorption process, such as photoionization, means in effect that the field we are measuring is the one associated with photon annihilation, the complex field $\mathbf{E}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$. ¹³

En désignant par $|i\rangle$ l'état initial du champ et $|f\rangle$ son état final après le processus d'absorption, l'amplitude de probabilité correspondant à la transition entre ces deux états s'exprime par :

$$\langle f | \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) | i \rangle$$

Cependant, il faut souligner que cette affirmation n'est exacte que dans le cas d'un photodétecteur idéal, infiniment petit, qui détecte des photons sur des temps infiniment courts, et dont la probabilité d'absorption ne varie pas suivant la fréquence du photon. Dans le cas réel, l'affirmation reste vraie, mais il faut garder à l'esprit qu'elle résulte d'une approximation. Glauber a détaillé celle-ci dans le passage suivant, qui témoigne d'une profonde réflexion sur la photodétection :

If we are using atomic systems in their ground states as probes of the electric field for example, then the atoms have no energy to emit photons and can only absorb them. In this case, which corresponds in principle to that of a

12. En physique classique, il n'est pas nécessaire de distinguer les composantes $\mathbf{E}^{(-)}$ et $\mathbf{E}^{(+)}$ du champ (qui correspondent respectivement à des fréquences négatives et positives), puisque les mesures d'intensité ne concernent que la somme des contributions de ces deux opérateurs ; autrement dit, on mesure \mathbf{E} directement. $\mathbf{E}^{(-)}$ et $\mathbf{E}^{(+)}$ sont alors considérées comme des abstractions mathématiques, et leur distinction ne se justifie que par la simplification des calculs qu'elle permet. En revanche, dès lors qu'on traite d'opérateurs, $\hat{\mathbf{E}}^{(-)}$ et $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ acquièrent une signification physique bien particulière, à savoir la création et l'annihilation d'un photon.

13. « Ordinairement, les expériences qui détectent des photons le font en les absorbant d'une façon ou d'une autre. L'utilisation de n'importe quel processus d'absorption, comme la photoionisation, signifie en réalité que le champ que l'on mesure est celui associé à l'annihilation du photon ¹⁴, le champ complexe $\mathbf{E}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$. » (Glauber (1963b), p.2531)

typical photodetector, only the annihilation operator $\mathbf{E}^{(-)}$ figures significantly in determining the transition amplitudes. More exactly, if we do a calculation of the transition amplitude using first order perturbation theory, we easily find that the creation operator $\mathbf{E}^{(+)}$ contributes only an extremely small amplitude which varies so rapidly with time that it leads to no observable effect at all. The creation operator can only contribute materially if the detector contains excited atoms. [...]

In the third and higher orders of perturbation theory, the creation operator can indeed play a tiny role in an absorption experiment. The effect in question is a radiative correction to the first order absorption probability which all estimates indicate will be quite small. We see, therefore, that it is fairly accurate to say that a typical photodetector detects the field $\mathbf{E}^{(+)}$ rather than the field \mathbf{E} . Although this statement is clearly an approximate one rather than a rigorous one it is none the less important since *it furnishes us a reason for formulating the theory in terms of a set of non-Hermitian operators*^{15, 16}.

Cette hypothèse de l'utilisation de la théorie des perturbations au premier ordre étant admise, pour connaître la probabilité totale de transition – c'est-à-dire le taux de détection de photons par un photodétecteur – on somme les probabilités $|\langle f | \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) | i \rangle|^2$ sur tous les états finaux possibles. En effet, comme l'explique Glauber, on ne mesure jamais $|f\rangle$: on ne fait qu'observer l'état final du photodétecteur. En utilisant la relation de fermeture, on obtient une expression qui ne dépend que de l'état initial du champ :

$$\sum_f |\langle f | \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) | i \rangle|^2 = \langle i | \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) | i \rangle.$$

Néanmoins, Glauber remarque que notre connaissance du champ est toujours limitée par des paramètres inconnus : on n'est donc pas en mesure de le décrire par un vecteur

15. En l'occurrence, $\mathbf{E}^{(-)}$ et $\mathbf{E}^{(+)}$. Texte mis en italique par moi-même.

16. « Si l'on utilise des systèmes atomiques dans leur état fondamental pour sonder le champ électrique par exemple, alors les atomes n'ont pas d'énergie pour émettre des photons et ne peuvent que les absorber. Dans ce cas, qui correspond en principe à celui d'un photodétecteur typique, seul l'opérateur annihilation $\mathbf{E}^{(-)}$ n'est pas négligeable lorsqu'on détermine les probabilités de transition. Plus exactement, si on fait le calcul d'une amplitude de transition en utilisant la théorie des perturbations au premier ordre, on trouve facilement que l'opérateur création $\mathbf{E}^{(+)}$ ne contribue qu'avec une amplitude extrêmement faible qui varie si rapidement dans le temps que cela ne mène à absolument aucun effet observable. L'opérateur création ne peut contribuer matériellement que si le détecteur contient des atomes dans l'état excité. [...]

Aux troisième et quatrième ordres de la théorie des perturbations, l'opérateur création ne joue qu'un rôle minuscule dans une expérience d'absorption. L'effet en question est une correction radiative à la probabilité d'absorption au premier ordre, que toutes les estimations prévoient assez petites. On voit donc qu'il est plutôt exact de dire qu'un photodétecteur typique détecte le champ $\mathbf{E}^{(+)}$ plutôt que le champ \mathbf{E} . Bien que cette affirmation soit clairement une approximation plutôt qu'une affirmation rigoureuse, elle n'en est pas moins importante puisqu'elle nous fournit une raison pour formuler une théorie en termes d'un ensemble d'opérateurs non-hermitiens. » (Glauber (1965), p.76)

d'état (qui correspondrait à un état pur). On passe donc à la description d'un mélange statistique en utilisant la matrice de densité ρ qui intègre tous ces paramètres de façon moyennée. Ainsi, la moyenne de l'observable $\hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$, qui correspond au taux de détection de photons pour un photodétecteur idéal, peut se réécrire :

$$\langle \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{paramètres inconnus}} = \text{Tr} \left(\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) \right).$$

Cette dernière quantité définit précisément la fonction de corrélation d'ordre 1 dans le cadre de la théorie quantique de la cohérence (notée $G^{(1)}$), à ceci près qu'elle peut concerner deux points différents de l'espace-temps :

$$G^{(1)}(\mathbf{r}, t, \mathbf{r}', t') = \text{Tr} \left(\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}', t') \right).$$

Exemple avec les fentes de Young

Cette expression de $G^{(1)}$ permet de réinterpréter sous un angle quantique les expériences d'optique classique faisant intervenir des mesures d'intensité, comme par exemple les fentes de Young¹⁷. Imaginons que l'on remplace un point de l'écran derrière les deux fentes par un photodétecteur, qui fonctionne de façon intrinsèquement quantique. On choisit maintenant de décrire le champ non pas dans le cadre semi-classique, avec les grandeurs $\mathbf{E}^{(+)}$ et $\mathbf{E}^{(-)}$, mais avec les opérateurs $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ et $\hat{\mathbf{E}}^{(-)}$, donc de façon totalement quantique. Or, l'état du champ au point \mathbf{r} et à l'instant t correspond environ à la superposition des champs issus des deux fentes placées en \mathbf{r}_1 et en \mathbf{r}_2 tels qu'ils étaient aux temps t_1 et t_2 antérieurs à t (afin de prendre en compte le temps de trajet de la lumière entre chaque fente et le point de l'écran considéré). On peut donc décomposer l'opérateur $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ en deux autres opérateurs :

$$\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) = \lambda_1 \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_1, t_1) + \lambda_2 \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_2, t_2),$$

où les indices 1 et 2 correspondent respectivement aux champs issus des deux fentes, et où λ_1 et λ_2 sont des paramètres liées à la taille des fentes. Si celles-ci sont identiques, on peut de plus supposer que $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$.

L'intensité que l'on détecterait sur un écran au point \mathbf{r} est proportionnelle au taux de photons détectés par le photodétecteur positionné à la place de cet écran au point \mathbf{r} , c'est-à-dire proportionnelle à la fonction de corrélation d'ordre 1 :

$$I \propto G^{(1)}(\mathbf{r}, t, \mathbf{r}, t) = \text{Tr} \left(\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) \right).$$

Or, d'après la décomposition ci-dessus :

$$\text{Tr} \left(\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}, t)\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) \right) = \text{Tr} \left(\rho |\lambda|^2 \left[\hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_1, t_1) + \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_2, t_2) \right] \left[\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_1, t_1) + \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_2, t_2) \right] \right).$$

17. J'ai repris le calcul fait dans [Glauber \(1965\)](#), p.93.

On peut donc exprimer I en termes d'une somme de fonctions de corrélations :

$$I = |\lambda|^2 [G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_1, t_1) + G^{(1)}(\mathbf{r}_2, t_2, \mathbf{r}_2, t_2) + 2\Re(G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2))].$$

Une fonction de corrélation étant une fonction à valeurs complexes, on peut écrire :

$$G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2) = |G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2)| e^{i\phi(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2)},$$

et on en déduit que :

$$I = |\lambda|^2 [G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_1, t_1) + G^{(1)}(\mathbf{r}_2, t_2, \mathbf{r}_2, t_2) + 2|G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2)| \cos \phi(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2)].$$

Les deux premiers termes correspondent aux intensités produites au point \mathbf{r} par les champs issus de chacune des fentes indépendamment l'un de l'autre, tandis le troisième est un terme d'interférences. On rend donc bien compte de l'expérience des fentes de Young en utilisant les fonctions de corrélations et en décrivant les champs de façon quantique.

Passage aux fonctions de corrélation d'ordre 2

Les fonctions de corrélation d'ordre 1 deviennent insuffisantes lorsqu'il s'agit de rendre compte de corrélations d'intensité, comme les expériences de Hanbury Brown et Twiss. C'est pourquoi Glauber, après avoir défini la fonction de corrélation d'ordre 1, s'empresse de passer à l'ordre 2 (voir [Glauber \(1963b\)](#), p.2533) :

$$G^{(2)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2, \mathbf{r}_3, t_3, \mathbf{r}_4, t_4) = \text{Tr} \left[\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_1, t_1) \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_2, t_2) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_3, t_3) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_4, t_4) \right].$$

Bien que ces fonctions de corrélation soient définies dans un cadre quantique, elles ressemblent très fortement aux fonctions de corrélation classiques de Wolf. En effet, avec les notations utilisées lors de la Conférence de Paris, la fonction de corrélation de Wolf à l'ordre 1, Γ_{12} ¹⁸, qui compare deux points P_1 et P_2 d'un champ à deux instants séparés d'un délai τ , s'écrit :

$$\Gamma_{12}$$
¹⁹ = $\langle V(P_1, t + \tau) V^*(P_2, t) \rangle,$

où V correspond au champ électrique habituellement noté E . De même, à l'ordre 2 :

$$\overline{I_1(t + \tau) I_2(t)} = \overline{V(P_1, t + \tau) V^*(P_1, t + \tau) V(P_2, t) V^*(P_2, t)}.$$

Or dans la théorie de Glauber, les analogues de ces deux fonctions de corrélation sont :

$$G^{(1)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2) = \langle \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_1, t_1) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle$$

et :

$$G^{(2)}(\mathbf{r}_1, t_1, \mathbf{r}_2, t_2, \mathbf{r}_3, t_3, \mathbf{r}_4, t_4) = \langle \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_1, t_1) \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(\mathbf{r}_2, t_2) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_3, t_3) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}_4, t_4) \rangle$$

18. Précédemment notée ϵ_{ij} , comme nous l'avons vu, dans l'article de Wolf de 1954.

19. Voir [Wolf \(1964\)](#), p.16 pour la fonction de corrélation d'ordre 1 et p. 26 pour celle d'ordre 2.

Glauber a reconnu que ses fonctions de corrélations ressemblaient beaucoup à celles de Wolf, puisqu'il a lui-même admis qu'il les avait nommées « G » afin de faire écho à la notation « Γ » de Wolf²⁰ (voir la note dans Glauber (1964), p.113). Néanmoins, au-delà du fait que les unes sont définies dans un cadre quantique et les autres dans un cadre classique, les fonctions de corrélation de Glauber ont ceci d'original qu'elles proviennent – comme je viens de le montrer – d'une analyse approfondie du processus de photodétection.

Mais les fonctions de corrélation de Glauber se sont surtout démarquées de celles de Wolf parce qu'elles ne se sont pas limitées à l'ordre 2. En fait, Glauber a compris que les mesures de corrélation d'intensités en deux points d'un champ n'apportaient qu'une information très limitée sur la cohérence de ce champ :

Intensity measurements although they characterize nearly all the familiar experiments of optics, do not begin to exhaust the possibilities of measurements we can make upon the field. We can, for example, use the techniques of delayed coincidence counting of photons to gain additional statistical information about the field.²¹

Ainsi, en quelque sorte, Glauber a généralisé de façon conceptuelle les expériences de Hanbury Brown et Twiss, en imaginant n photodétecteurs en n points de l'espace. C'est ainsi que Glauber a défini des fonctions de corrélation d'ordre supérieur à 2, qui ont permis de rendre compte des propriétés de cohérence des masers et des lasers. C'est l'objet de la section suivante.

3.3.2 Définition de la cohérence selon Glauber

Glauber considéra $2n$ points de l'espace à $2n$ temps donnés²² afin de définir la fonction de corrélation à l'ordre n (voir Glauber (1963b), p. 2532-2534) :

$$G^{(n)}(x_1, \dots, x_{2n}) = \text{Tr} \left[\rho \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(x_1) \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(x_2) \dots \hat{\mathbf{E}}^{(-)}(x_n) \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(x_{n+1}) \dots \hat{\mathbf{E}}^{(+)}(x_{2n}) \right] \quad 23,$$

que l'on peut également écrire en version renormalisée :

$$g^{(n)}(x_1, \dots, x_{2n}) = \frac{G^{(n)}(x_1, \dots, x_{2n})}{\prod_{i=1}^n \sqrt{G^{(1)}(x_i, x_i)}},$$

avec $g^{(n)} = 1$ lorsque $x_1 = x_2 = \dots = x_n$.

20. Alors que, dans son article « Photon correlations », Glauber désignait ses fonctions de corrélations par la lettre « C ».

21. « Bien qu'elles caractérisent presque toutes les expériences qui nous sont familières en optique, les mesures d'intensité sont loin de couvrir toutes les possibilités de mesures que l'on peut réaliser sur le champ. Par exemple, on peut utiliser les techniques de comptage de coïncidences retardées de photons, afin d'obtenir plus d'information statistique sur le champ. » (Glauber (1964), p.112)

22. Ces points seront notés x_k , avec $x_k = (\mathbf{r}_k, t_k)$.

23. On peut remarquer que, dans cette formule, les opérateurs annihilation précèdent les opérateurs création. C'est ce que l'on appelle l'ordre « normal » des opérateurs.

C'est alors qu'il proposa une nouvelle définition de la cohérence²⁴, en deux temps. D'abord, il stipula qu'un champ est totalement cohérent à l'ordre n si, pour tout $j \leq n$, les fonctions réduites de corrélation vérifient la condition suivante :

$$g^{(j)}(x_1, \dots, x_j, x_j, \dots, x_1) = 1.$$

Notons qu'à l'ordre 1, cette définition coïncide avec celle de Wolf²⁵. Ainsi, au premier ordre, la cohérence totale au sens de Wolf apparaît comme la limite classique de la cohérence totale au sens de Glauber ; cela n'est cependant plus vrai à partir du deuxième ordre car, dans ce cas, la cohérence totale au sens de Glauber implique deux conditions sur les fonctions réduites de corrélation.

Glauber donna ensuite une deuxième définition de la cohérence totale, que nous retiendrons pour la suite : un champ est totalement cohérent à l'ordre n s'il vérifie pour tout $j \leq n$ les relations :

$$G^{(j)}(x_1, \dots, x_j, x_j, \dots, x_1) = \prod_{i=1}^j G^{(1)}(x_i, x_i).$$

Ces conditions de factorisation étaient au cœur de la nouvelle théorie de la cohérence. Glauber les interpréta ainsi :

These relations mean, in observational terms, that the rate at which j -fold delayed coincidences are detected by our ideal photon counters, reduces to a product of the detection rates of the individual counters. In photon coincidence experiments of multiplicity up to and including n the photon counts registered by the individual counters may then be regarded as statistically independent events.²⁶

Une conséquence de taille s'en dégage : plus un champ est cohérent au sens de Glauber – autrement dit, plus il vérifie ces relations de factorisation jusqu'à un ordre n grand –

24. On peut remarquer que cette définition est très large, car les champs n'ont pas besoin d'être stationnaires et monochromatiques pour être parfaitement cohérents. C'est un changement radical : en effet, la cohérence était auparavant associée à la monochromaticité parce que la majorité des expériences d'optique étaient menées avec de la lumière qui ne varie pas dans le temps. Or, dans ce cas particulier, on peut montrer que la fonction de corrélation se factorise si et seulement si la lumière est monochromatique – d'où cette association entre monochromaticité et cohérence, que Glauber a dépassé en proposant une théorie plus générale sans contrainte sur le spectre en fréquence.

25. Pour une comparaison de la fonction de cohérence de Glauber avec celle de Wolf, voir aussi l'appendice de Bromberg (2016), p.261-263.

26. « En termes observationnels, ces relations signifient que le taux de corrélation auquel nos compteurs de photons idéaux détectent des coïncidences retardées j fois se réduit à un produit de taux de détection de compteurs individuels. Dans les expériences de coïncidences de photons de multiplicité allant jusqu'à n inclus, les comptes de photons enregistrés par les compteurs individuels peuvent être considérés comme des événements statistiquement indépendants. » (Glauber (1963b), p.2535)

moins il manifeste de corrélations²⁷. De plus, par extrapolation, le champ est dit totalement cohérent lorsqu'il vérifie toutes les conditions de factorisation quand n tend vers l'infini : la notion de cohérence totale devient alors une abstraction. Chez Glauber, tous les champs sont partiellement cohérents, en vérifiant au mieux un nombre fini de conditions de factorisation²⁸. Les champs auparavant considérés comme totalement cohérents ne l'étaient désormais plus !

En résumé : dans le premier article fondateur de 1963 intitulé « The Quantum Theory of Optical Coherence », Glauber s'est concentré sur les fonctions de corrélations, et a établi à partir d'elles une nouvelle définition de la notion de cohérence. Dès lors, la question suivante était logiquement : quels sont les champs qui, justement, vérifient la nouvelle définition de la cohérence ? C'est à cette question que répondit le second article de Glauber de 1963, « Coherent and Incoherent States of the Radiation Field ».

3.3.3 Naissance des états cohérents

Dans cette section, mon objectif est de montrer que les états cohérents, qui caractérisent les champs totalement cohérents au sens de Glauber et qui occupent une place centrale en optique quantique, découlent naturellement et mathématiquement de la nouvelle définition de la cohérence que je viens de présenter. Concrètement, dans [Glauber \(1963c\)](#), la question liminaire initiant les calculs est : quels sont les états du champ pour

27. Remarque : dans le cas de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, le champ est cohérent au sens de Glauber à l'ordre 1, mais pas à l'ordre 2, puisque des corrélations commencent à se manifester à cet ordre. Mathématiquement, cela signifie que la fonction de corrélation ne peut pas se factoriser en produit de fonctions de corrélation d'ordre 1 (car si tel était le cas, les taux de détections de photons dans les deux photodétecteurs seraient indépendants l'un de l'autre, sans corrélation). Alain Aspect précise : « Si l'on interprète l'effet HBT de façon classique, c'est juste un champ lumineux classique fluctuant, et le facteur 2 [dans la fonction de corrélation d'ordre 2] provient du théorème de Wick : c'est la statistique gaussienne. » (Extrait de [Cohen-Tannoudji \(2019\)](#)). Dans le cadre de l'expérience de Hanbury Brown et Twiss, le théorème de Wick stipule que $g^{(2)}(r_1, r_2, \tau) = 1 + |g^{(1)}(r_1, r_2, \tau)|^2$ où $g^{(1)}$ et $g^{(2)}$ sont les fonctions de corrélation d'ordre 1 et 2, où r_1 et r_2 correspondent aux positions respectives des deux photodétecteurs, et où τ désigne le délai entre deux détections. Dans le cas où les photodétecteurs sont parfaitement superposés ($r_1 = r_2$) et que les détections ont lieu au même moment ($\tau = 0$), on a par définition $g^{(1)} = 1$, et par suite $g^{(2)} = 2$. Cet effet HBT permet en particulier d'acquérir une certaine information sur la cohérence de la source lumineuse, comme le souligne Glauber : « These observations verify that light beams from ordinary sources such as discharge tubes, when made optimally coherent in the first-order sense, still lack second-order coherence. » : « Ces observations montrent que les faisceaux de lumière provenant de sources ordinaires comme des tubes à décharge, même s'il sont rendus cohérent au sens du premier ordre de façon optimale, ne présentent pas encore de cohérence au second ordre. » ([Glauber \(1963b\)](#), p.2535)

28. On se souvient que Wolf, à la suite de Zernike, avait défini un degré de corrélation à partir de ses fonctions de corrélations classiques, et que cela lui permettait de distinguer les champs cohérents, les champs non-cohérents et les champs partiellement cohérents. Chez Glauber, cela devenait différent, puisque le degré de cohérence dépendait du nombre n de conditions de factorisation satisfaites, avec n pouvant tendre vers l'infini.

lesquels les fonctions de corrélation peuvent se factoriser à n'importe quel ordre? Or, Glauber a préalablement montré dans Glauber (1963b) que, comme ces fonctions de corrélation sont des enchaînements d'opérateurs création et annihilation, les états recherchés sont les états propres de l'opérateur $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ ²⁹. Quand on réfléchit à de tels états propres d'un point de vue conceptuel, et non pas uniquement mathématique, on prend la mesure de leur caractère très contre-intuitif, que Glauber souligna lui-même lors de la conférence qu'il donna à l'occasion de son prix Nobel, en 2005 :

That's a rather strange thing! It says that you take away a photon, and you're left with the very same state you had before. That's a guarantee that you cannot have any fixed number of photons present³⁰, but if you have a right kind of superposition of different numbers of photons states, you perfectly well can satisfy this condition. This defines the coherent states.³¹

Dans ce qui suit, je ne donnerai que les principales étapes du calcul menant aux états cohérents³². D'abord, Glauber rappelle que les opérateurs champ électrique et champ magnétique dérivent d'un potentiel vecteur dont l'expression dans le formalisme quantique est :

$$\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}, t) = c \sum_k \left(\sqrt{\frac{\hbar}{2\omega_k}} \right) \times \left(\hat{a}_k \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{-i\omega_k t} + \hat{a}_k^\dagger \mathbf{u}_k^*(\mathbf{r}) e^{i\omega_k t} \right),$$

où k représente à la fois les différentes polarisations possibles ainsi que les trois composantes du vecteur d'onde \mathbf{k} associé au mode $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ (de fréquence ω_k), et où \hat{a}_k et \hat{a}_k^\dagger sont les opérateurs annihilation et création.

Souvenons-nous que la nouvelle définition de la cohérence impliquait de séparer l'opérateur champ électrique en ses composantes de fréquences positives et négatives. Puisque

$$\hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c} \frac{\partial \hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}, t)}{\partial t},$$

la composante $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}$ se déduit à partir de la composante positive du potentiel vecteur, c'est-à-dire celle faisant intervenir l'opérateur annihilation :

$$\hat{\mathbf{A}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) = c \sum_k \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega_k}} \times \left(a_k \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{-i\omega_k t} \right).$$

29. Plus précisément, Glauber a montré que si le champ est dans l'état $|\alpha\rangle$ avec $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)|\alpha\rangle = \epsilon(\mathbf{r}, t)|\alpha\rangle$, où la valeur propre $\epsilon(\mathbf{r}, t)$ est une fonction complexe, alors la fonction de corrélation d'ordre 1 se factorise en $G^{(1)}(\mathbf{r}, t, \mathbf{r}'t') = \epsilon^*(\mathbf{r}, t)\epsilon(\mathbf{r}'t')$. Il en est de même pour les fonctions de corrélation d'ordres supérieurs.

30. Chose encore plus étrange : le nombre de photons, dans les états cohérents, n'est pas limité ; sinon, il y aurait nécessairement un ordre à partir duquel la condition de cohérence ne serait pas respectée!

31. « C'est une chose plutôt étrange! Cela veut dire que vous enlevez un photon, et que vous obtenez exactement le même état que celui que vous aviez auparavant. Ceci est une garantie que vous ne pouvez pas avoir un nombre quelconque défini de photons présents, mais si vous avez une bonne superposition d'états de photons avec différents nombres de photons, vous pouvez parfaitement satisfaire cette condition. C'est ce qui définit les états cohérents. » (Glauber (2005b), 35')

32. Pour consulter l'intégralité du calcul, voir Glauber (1963c), p.2767-2769.

En effet, par linéarité, nous avons :

$$\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c} \frac{\partial \hat{\mathbf{A}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}.$$

On en déduit que :

$$\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) = i \sum_k \sqrt{\frac{\hbar \omega_k}{2}} \hat{a}_k \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{-i\omega_k t}.$$

Glauber avance ensuite l'argument que les fonctions complexes $\epsilon(\mathbf{r}, t)$ définies comme les valeurs propres de l'opérateur $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$ doivent de même que celui-ci vérifier les équations de Maxwell, car celles-ci sont linéaires. Par conséquent, à l'instar de $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$, $\epsilon(\mathbf{r}, t)$ peut également s'écrire comme un développement en série de Fourier sur les modes $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$:

$$\epsilon(\mathbf{r}, t) = \sum_k \alpha_k \times \left(i \sqrt{\frac{\hbar \omega_k}{2}} \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{-i\omega_k t} \right).$$

Or, compte-tenu que les \mathbf{u}_k forment une base orthogonale des modes du champ, on peut identifier terme à terme $\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t)$ avec $\epsilon(\mathbf{r}, t)$. Donc la relation initiale :

$$\hat{\mathbf{E}}^{(+)}(\mathbf{r}, t) |\alpha\rangle = \epsilon(\mathbf{r}, t) |\alpha\rangle$$

devient :

$$\hat{a}_k |\alpha\rangle = \alpha_k |\alpha\rangle$$

Glauber déduit ainsi la relation fondamentale caractérisant les états cohérents. Oublions désormais l'indice k pour simplifier les notations. En projetant la dernière équation sur l'état à n photons $\langle n|$, il vient :

$$\langle n|\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha \langle n|\alpha\rangle.$$

Or en étudiant les propriétés de l'opérateur annihilation, Glauber montre que :

$$\hat{a}^\dagger |n\rangle = \sqrt{n+1} |n+1\rangle,$$

c'est-à-dire dans la version adjointe (complexe conjuguée) :

$$\langle n|\hat{a} = \langle n+1| \sqrt{n+1}.$$

Il en résulte que :

$$\langle n|\hat{a}|\alpha\rangle = \sqrt{n+1} \langle n+1|\alpha\rangle.$$

Donc :

$$\sqrt{n+1} \langle n+1|\alpha\rangle = \alpha \langle n|\alpha\rangle.$$

Il s'agit d'une relation de récurrence. Par une multiplication terme à terme des mêmes égalités prises entre 0 et $n-1$, on trouve :

$$\langle n|\alpha\rangle = \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} \langle 0|\alpha\rangle.$$

De plus, l'ensemble des états de photons forment une base orthonormale, donc les termes $\langle n|\alpha\rangle$ correspondent aux coefficients de la décomposition de l'état $|\alpha\rangle$ dans cette base, soit :

$$|\alpha\rangle = \sum_n \langle n|\alpha\rangle |n\rangle = \langle 0|\alpha\rangle \sum_n \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle.$$

Enfin, en projetant cette dernière relation sur $\langle\alpha|$, on obtient :

$$\langle\alpha|\alpha\rangle = \langle 0|\alpha\rangle^* \langle 0|\alpha\rangle \sum_n \left(\frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}}\right)^* \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} = |\langle 0|\alpha\rangle|^2 \sum_n \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} = |\langle 0|\alpha\rangle|^2 e^{|\alpha|^2}.$$

Or, par normalisation : $\langle\alpha|\alpha\rangle = 1$, d'où :

$$\langle 0|\alpha\rangle = e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2}.$$

Glauber dérive ainsi l'expression bien connue des états cohérents $|\alpha\rangle$ en fonction des états de Fock $|n\rangle$:

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} \sum_n \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle.$$

L'article se poursuit sur une étude approfondie des états cohérents, sur laquelle je ne m'appesantirai pas plus longuement pour ne pas rentrer dans trop de détails. En revanche, j'insisterai sur le fait que Glauber, alors qu'il réfléchissait au problème de l'effet HBT pour le laser, a ressenti une vive émotion en découvrant les états cohérents : « I thought, my God, there is something magic about these states, I have really discovered something. »³³. Il fut notamment fasciné par la propension de ces états à faire le lien entre le monde classique et le monde quantique, ainsi qu'à donner un sens à la notion de phase dans un contexte corpusculaire³⁴. C'est ce qui l'a amené à penser dès 1962 que ces états pourraient servir à décrire l'effet HBT et les faisceaux lasers. Mais, à cette époque, cela ne relevait encore de l'intuition, comme il l'a reconnu lui-même :

That convinced me that there was some wonderful point, I didn't know what, to talk about the coherent states, and using them as a basis to describe the Hanbury-Brown-Twiss effect. [...] And I didn't know really what a laser was. And if I tell you that my impression was that the laser radiated coherent states, it was on the basis of instinct at this point, late in 1962.³⁵

33. « J'ai pensé, mon Dieu, il y a quelque chose de magique avec ces états, j'ai vraiment découvert quelque chose. » (Glauber 1987)

34. Il en fut de même plus tard pour Claude Cohen-Tannoudji. Lui-même en témoigne : voir Cohen-Tannoudji (2019).

35. « Cela m'a convaincu qu'il y avait quelque chose de merveilleux, [mais] je ne savais pas quoi, à parler des états cohérents et à les utiliser comme une base pour décrire l'effet HBT. [...] Je ne savais pas vraiment ce qu'était un laser. Et si je vous dis que mon impression était que le laser émettait des états cohérents, c'était sur la base d'une intuition à ce moment-là, fin 1962. » (Glauber 1987)

Je ferai pour terminer une remarque importante : en réalité, les états cohérents – bien qu'ils ne fussent pas nommés ainsi – existaient déjà formellement avant Glauber dans les travaux de Schrödinger³⁶. Glauber en était bien conscient : « There was something known about those states from 1926 on, but they were always regarded as literally a curiosity. »³⁷. En effet, chez Schrödinger, ces états se référaient à l'oscillateur harmonique, et n'avaient aucunement vocation à décrire un champ cohérent. Déjà dans le premier article fondateur de 1963, Glauber en donnait l'explication suivante : « Since the coherent states do not form an orthogonal set, they appear to have received little attention as a possible system of basis vectors for the expansion of arbitrary states. »³⁸. Glauber souligne que ce n'est pas tant l'orthogonalité des états qui compte, mais le fait qu'ils forment une base complète : « The essential property of such a set is that it be complete. The set of coherent states $|\alpha\rangle$ for a mode oscillator can be shown without difficulty to form a complete set. »³⁹.

Avec les travaux de Glauber, les états cohérents prenaient une nouvelle dimension. De simple curiosité théorique, ils acquéraient un statut ontologique en prétendant décrire les champs cohérents, et en particulier... le laser. Si Glauber mentionna le maser et le laser dans ses articles de 1963, il développa surtout ce point dans un cours donné l'année suivante à l'Ecole d'été des Houches, que je vais bientôt évoquer. Auparavant, pour refermer cette section sur les états cohérents, je laisserai le dernier mot à Glauber, qui rappelle que ces états proviennent directement de la nouvelle définition de la cohérence :

We have found that the use of a rather different set of states, one which arises in a natural way in the discussion of correlation and coherence properties of fields, offers much more penetrating insights into the role played by photons in the description of light beams.⁴⁰

3.3.4 En guise de résumé des travaux de 1963

Comme l'a laissé paraître le chapitre précédent, Glauber fut particulièrement intrigué par les expériences de Hanbury Brown et Twiss et la tendance des quanta à être détectés

36. Joan Lisa Bromberg souligne l'influence de Schrödinger dans les travaux en physique des particules de Glauber de 1951 dans Bromberg (2016), p.253.

37. « On savait quelque chose de ces états depuis 1926, mais on les considérait toujours littéralement comme une curiosité. » (Glauber 1987)

38. « Comme les états cohérents ne forment pas une base orthogonale, ils semblent avoir reçu peu d'attention en tant que possible système de vecteurs de base pour le développement d'états arbitraires. » (Glauber (1963c), p.2772)

39. « La propriété essentielle d'un tel ensemble est d'être complet. On peut montrer sans difficulté que l'ensemble des états cohérents $|\alpha\rangle$ pour un oscillateur à modes forme un ensemble complet. » (Glauber (1963c), p.2772)

40. « Nous avons trouvé que l'utilisation d'un ensemble d'états plutôt différent, un ensemble qui émerge de façon naturelle dans la discussion des propriétés de corrélation et de cohérence des champs, offre un aperçu bien plus profond du rôle joué par les photons dans la description des faisceaux de lumière. » (Glauber (1963c), p.2767)

par paires. Cette fois, il n'était plus question de mesures d'intensité, comme dans l'optique classique, mais de mesures de photons individuels corrélés qui venaient interroger la nature granulaire de la lumière. L'étrangeté de ces corrélations a motivé Glauber à donner une explication purement quantique de l'effet HBT qui n'avait jusqu'alors jamais été développée : « That was the initial inspiration for me. I wanted to see what that meant in terms of quantum field theory. »⁴¹.

D'autre part, l'invention du laser fit comprendre à Glauber que certains champs pouvaient présenter des propriétés de cohérence très différentes de la lumière provenant de sources thermiques ; autrement dit, que des sources de lumière non naturelles pouvaient avoir un degré de cohérence bien supérieur à la simple cohérence optique. Il généralisa alors les corrélations de type HBT pour n points de l'espace-temps, introduisit pour cela les fonctions de corrélation d'ordre n et établit de nouvelles conditions caractérisant la cohérence d'un champ. De cette nouvelle définition de la cohérence ont émergé des états particuliers, dits états cohérents, qui caractérisent dans ce cadre un champ totalement cohérent.

Il est important de noter que les fonctions de corrélation d'ordre élevé constituent la véritable clé de voûte de la nouvelle théorie de la cohérence. En effet, celles-ci permettent de décrire l'effet HBT aussi bien pour de la lumière provenant d'une source thermique que pour le laser. Elles marquent donc bien un point de confluence entre deux histoires d'apparence disjointe : l'histoire du photon et des expériences de Hanbury Brown et Twiss (chapitre 1), ainsi que celle de la cohérence et du laser (chapitre 2). On ne s'étonnera donc pas de constater que le premier article de 1963, après avoir mis en exergue le mot « CORRELATION », faisait d'emblée le lien entre ces deux histoires :

The development of the optical maser, in particular, has led to the generation of fields with a range of correlation unprecedented at optical frequencies. The use of techniques of coincidence detection of photons has, in the same period, shown the existence of unanticipated correlations in the arrival times of light quanta.⁴²

3.3.5 Début de la controverse semi-classique/tutti quantique

Avant la Conférence de Paris

Bien que la controverse entre Wolf et Mandel, défenseurs de la vision classique de la lumière, et Glauber, fervent partisan de la vision quantique, éclatât lors de la Conférence

41. « C'était l'inspiration de départ pour moi. Je voulais voir ce que cela signifiait en termes de théorie quantique des champs. » (Glauber 2008)

42. « En particulier, le développement du maser optique a conduit à la production de champs avec une gamme de corrélations inédite aux fréquences optiques. Pendant la même période, l'utilisation de techniques de détection de coïncidences de photons a montré l'existence de corrélations qui n'avaient pas été anticipées dans les temps d'arrivée des quanta de lumière. » (Glauber (1963b), p.2529)

de Paris, celle-ci fut lancée quelques jours auparavant avec la parution de l'article de Glauber intitulé « Photon correlations » (Glauber 1963a) dans les *Physical Review Letters*. Cet article formulait en effet une critique sévère à l'encontre de la prédiction de Wolf et Mandel concernant l'effet HBT pour le laser : « The fact that photon correlations are enhanced by narrowing the spectral bandwidth has led to a prediction of large-scale correlations to be observed in the beam of an optical maser. We shall indicate that this prediction is misleading and follows from an inappropriate model of the maser beam. »⁴³. Et Glauber de renchéir au paragraphe suivant en déclarant que le champ électrique dans un faisceau lumineux ne pouvait pas toujours « être décrit comme un processus stochastique gaussien classique ». Il montrait alors que si l'on choisissait de décrire le champ avec des états cohérents, celui-ci ne manifesterait pas de corrélations. Néanmoins, il n'allait pas jusqu'à dire que le maser réel pouvait être décrit par des états cohérents, et concluait l'article dans une forme d'entre-deux :

The density operator which represents an actual maser beam is not yet known. It is clear that such a beam cannot be represented by a product of individual coherent states, $\prod_k |\alpha_k\rangle \langle \alpha_k|$, unless the phase and amplitude stability of the device is perfect. On the other hand, a maser beam is not at all likely to be described by the ideally incoherent classical model which underlies the calculation of Mandel and Wolf.⁴⁴

Avec cet article, Glauber déclencha les hostilités. Wolf confirme que la façon de décrire les faisceaux lumineux était à l'origine de la controverse :

No other type of light was known except that which was governed by Gaussian random process statistics, but basically it's misleading. Well, Glauber jumped at it, and that started the whole controversy. You have to understand he's a very aggressive person. As anybody can tell you who knows him. He's a great scientist but aggressive, and he started attacking us very strongly in print⁴⁵, in a paper he published in PHYSICAL REVIEW I think or in PHYSICAL

43. « Le fait que les corrélations de photons soient mises en valeur lorsque la bande spectrale est rendue plus étroite a conduit à la prédiction que des corrélations à grande échelle seraient observées dans le faisceau d'un maser optique. Nous indiquerons que cette prédiction est erronée et qu'elle découle d'un modèle inapproprié pour un faisceau maser. » (Glauber (1963a), p.84)

44. « L'opérateur densité qui représente un faisceau maser réel n'est pas encore connu. Il est clair qu'un tel faisceau ne peut pas être représenté par un produit d'états cohérents individuels, $\prod_k |\alpha_k\rangle \langle \alpha_k|$, à moins que la stabilité de la phase et de l'amplitude du dispositif soit parfaite. D'autre part, un faisceau maser ne peut vraisemblablement pas du tout être décrit par le modèle classique idéalement incohérent qui sous-tend les calculs de Mandel et Wolf. » (Glauber (1963a), p.86)

45. Contrairement à ce que dit Wolf, l'attaque de Glauber dans « Photon Correlations » n'est pas si virulente ; il ne les cite nommément qu'une fois, et écrit sur un ton plutôt neutre. Cela n'empêche pas que Glauber ait peut-être pu se montrer acerbe de vive voix, à la Conférence de Paris.

REVIEW LETTERS⁴⁶, and then of course at the Paris Conference.⁴⁷

L'article à charge de Glauber « Photon Correlations » est paru le 1er février 1963, et a en quelque sorte « préparé le terrain » pour la Conférence de Paris où le débat s'est prolongé de vive voix. Mais loin de porter uniquement sur l'effet HBT dans le cas du maser, celui-ci a pris une autre dimension. En effet, la question centrale n'était plus : « la lumière laser présente-t-elle des corrélations de type HBT ? » mais de façon beaucoup plus générale : « Faut-il décrire la lumière de façon classique, ou bien de façon quantique ? ».

Lors de la Conférence de Paris

On peut se réjouir de connaître la teneur des discussions entre Wolf, Mandel et Glauber à l'issue de leurs présentations à la Conférence de Paris, car celles-ci ont été rapportées dans les *Proceedings* (ce qui n'est pas le cas pour bon nombre d'autres présentations). Ces retranscriptions des séances de questions-réponses ne reflètent probablement pas toute l'étendue des échanges, qui se sont peut-être poursuivis en conversations de couloir. Néanmoins, elles mettent en lumière des différences notables de point de vue et de sensibilité.

Sans surprise, Glauber est intervenu après l'exposé de Wolf⁴⁸, que j'ai esquissé au chapitre précédent. Glauber exhorta Wolf à traiter le problème de la cohérence de façon quantique. Mais ce dernier n'accéda pas cette demande, et il est intéressant de comprendre pourquoi à travers sa réponse :

I said right at the beginning of my talk that I am giving an account of the classical and the semi-classical treatments only. Of course, one should try to formulate a full quantum mechanical treatment of coherence, but this may not be very easy to do. For many purposes the classical and the semi classical treatments are quite good approximations and in fact have been extremely successful in predicting the results of experiments.

One should also bear in mind that the classical theory arose from an attempt to understand certain types of phenomena with light from thermal sources. Of course, as new problems arise, the theory has to be extended and this is precisely what is now being done with the help of higher order correlation

46. En l'occurrence, l'article « Photon Correlations » de Glauber a bien été publié dans les *Physical Review Letters*.

47. « Aucun autre type de lumière n'était connu, mis à part celui qui était gouverné par des statistiques de processus aléatoire gaussien, mais fondamentalement, c'est une erreur. Bon, Glauber a sauté là-dessus, et cela a démarré toute la controverse. Vous devez comprendre qu'il est une personne très agressive. Comme tout le monde qui le connaît pourra vous le dire. C'est un grand scientifique, mais agressif, et il a commencé par nous attaquer de façon très virulente à l'écrit, dans un papier publié dans la *Physical Review* je pense, ou dans les *Physical Review Letters*, et puis bien sûr à la Conférence de Paris. » (Wolf 1984)

48. Il semblerait que la Conférence de Paris marque la première rencontre directe entre Wolf et Glauber.

functions. But my guess is that for maser light classical theories will be even more useful than for thermal light.⁴⁹

Wolf n'était donc pas fondamentalement opposé à un traitement quantique de la cohérence, mais n'en voyait pas l'utilité. Que ce soit pour les expériences faisant intervenir des sources thermiques, les corrélations d'intensité, ou encore le maser, Wolf pensait que tout pouvait être décrit dans un cadre classique. De plus, il considérait qu'un traitement quantique apporterait des complications mathématiques inutiles. Ainsi, Wolf restait attaché à une description classique de la cohérence.

A l'issue de la présentation de Mandel, Glauber a également fait part de son point de vue. Il était d'accord avec les résultats de Mandel concernant les statistiques de photons, mais n'était fondamentalement pas d'accord sur l'*interprétation* de ces résultats. On voit apparaître ici la sensibilité classique de Mandel et la sensibilité quantique de Glauber. Ce dernier s'exprima ainsi :

The results on photon statistics which you have stated are correct and have already been derived by the methods of quantum field theory.⁵⁰ I do not, however, understand the derivations you have given on the basis of configuration space wave functions for photons, in considering field like that of a maser beam since the possibility of having phase information means that the number of photons present is intrinsically indefinite. It is indefinite in a much deeper sense than can be accounted for by simply averaging over the photon number as a statistical variable. Any single mode of the field can only be described by states in which the excitation quantum number of the number of photons present is irreducibly vague.⁵¹

49. « J'ai dit tout au début de ma présentation que je ne donnerai qu'un compte rendu des traitements classique et semi-classique. Bien sûr, on devrait essayer de formuler un traitement complètement quantique de la cohérence, mais cela ne devrait pas être très facile à faire. Dans de nombreux cas, les traitements classique et semi-classique sont d'assez bonnes approximations et ont en fait été extrêmement performants pour prédire des résultats d'expériences.

On devrait aussi garder à l'esprit que la théorie classique a émergé de la tentative de comprendre certains types de phénomènes avec de la lumière venant de sources thermiques. Bien sûr, à mesure que de nouveaux problèmes apparaissent, la théorie doit être étendue, et c'est précisément ce qui est en train d'être fait avec l'aide des fonctions de corrélation d'ordres supérieurs. Mais je parie que pour la lumière maser, les théories classiques seront encore plus utiles que pour les sources thermiques. » (Wolf (1964), p.34)

50. Glauber fait ici référence à son propre article « Photon Correlations », publié deux semaines avant la Conférence de Paris. Il y explique en effet que pour une distribution de type lorentzienne (en forme de raie spectrale), ce qui est le cas du laser, le nombre de photons détectés suit une distribution assez complexe (dépendant de fonctions de Bessel, donc de fonctions polynomiales) qui, dans la limite d'une détection pendant un court intervalle de temps, tend vers une statistique de Poisson. De même que pour la remarque de la note 34, il faudrait étudier plus précisément la théorie des statistiques pour bien comprendre d'où provient cette statistique de Poisson.

51. « Les résultats sur les statistiques de photons que vous avez établis sont justes et ont déjà été dérivés par des méthodes de théorie quantique des champs. Cependant, je ne comprends pas les calculs

Enfin, dans la discussion qui suivit l'intervention de Glauber, Wolf critiqua sa nouvelle définition de la cohérence totale, qu'il jugeait inapplicable en pratique :

This may be very elegant but perhaps not so practical in trying to determine whether given beams of light are or not completely coherent. For one would need an infinite number of experiments to do this.⁵²

Ce à quoi Glauber rétorqua :

The definition of complete coherence which I have given is indeed rather idealized, but it may not be so impractical to apply as you imagine.

In fact we already know there are fields which satisfy the coherence conditions extremely well. That can be shown, for example, from the fact that countless radio sets, tuned to the same station, all play very nearly the same program.⁵³

De plus, au-delà même de l'aspect expérimental, la nouvelle définition de Glauber présentait l'avantage de décrire la lumière des masers et des lasers. C'est ce que Glauber expliqua dans son article de juin 1963 en faisant à nouveau référence aux postes de radio :

That much greater regularities may exist in the field variations of a maser beam than are required by the optical definition of coherence may be seen by comparing the maser beam with the carrier wave of a radio transmitter. The latter type of wave ideally possesses a stability of amplitude which optically coherent fields need not have. Furthermore, the field values of such a wave possess correlations of a much more detailed sort than the optical definition requires. These are properties best expressed in terms of the higher order correlation functions $G^{(n)}$, for $n > 1$.⁵⁴

que vous avez faits sur la base de fonctions d'onde pour photons dans un espace de configuration, tout en considérant un champ comme celui du maser, puisque la possibilité d'avoir une information sur la phase signifie que le nombre de photons présents est intrinsèquement indéfini. Il est indéfini dans un sens bien plus profond que ce qui peut être expliqué par une simple moyenne sur le nombre de photon vu comme une variable statistique. Chaque mode individuel du champ peut être décrit uniquement par des états dans lesquels le nombre quantique d'excitation du nombre de photons présents est irréductiblement vague. » (Mandel (1964), p.108-9)

52. « Cela est certainement très élégant, mais peut-être pas si pratique dans le but de déterminer si des faisceaux de lumière donnés sont complètement cohérents ou pas. Dans la mesure où cela nécessiterait un nombre infini d'expériences. » (Glauber (1964), p.118)

53. « La définition de la cohérence totale que j'ai donnée est en effet plutôt idéalisée, mais elle ne devrait pas être si inapplicable en pratique comme vous l'imaginez. En fait, on sait déjà qu'il y a des champs qui vérifient les conditions de cohérence extrêmement bien. Par exemple, on peut le montrer à partir du fait que d'innombrables postes de radio réglés sur la même station jouent tous vraiment quasiment le même programme. » (Glauber (1964), p.118)

54. « Le fait que de bien plus grandes régularités puissent exister dans les variations du champ d'un faisceau maser par rapport à celles exigées par la définition optique de la cohérence peut se voir en comparant le faisceau maser à l'onde porteuse d'un émetteur radio. Ce dernier type d'onde possède idéalement une stabilité d'amplitude que les champs cohérents au sens optique ne peuvent pas avoir. De plus, les valeurs du champ pour une telle onde possèdent des corrélations bien plus variées que celles

Ainsi débuta en février 1963 une controverse qui allait durer au moins quinze ans. Mais puisque ce mémoire se limite à la naissance de l’optique quantique, je m’arrêterai là pour ce débat, et je poursuivrai mon propos en évoquant un événement particulier qui joua un rôle important dans la diffusion de la théorie de Glauber : l’Ecole d’été des Houches de 1964.

3.4 L’Ecole d’été des Houches de 1964

Préparation de l’Ecole d’été de 1964

Je soulignais précédemment l’importance de l’année 1963 dans l’histoire de l’optique quantique. Néanmoins, un autre événement important mérite d’être mis en lumière : l’Ecole d’été des Houches qui s’est tenue en 1964. Claude Cohen-Tannoudji raconte⁵⁵ qu’à la Conférence de Paris, l’année précédente, la physicienne Cécile DeWitt avait émis l’idée de consacrer la prochaine école d’été aux problèmes de comptage de photons. Elle proposa alors à Glauber de donner une série de cours sur ses derniers travaux. Glauber accepta, et Cécile DeWitt nomma Claude Cohen-Tannoudji et son ami André Blandin responsables du programme scientifique. De son côté, Glauber raconte que Cécile DeWitt lui a également demandé comment quel nom pouvait être attribué au domaine du comptage de photons. « I told her we ought to call it Quantum Optics. [...] I think that was the first use of Quantum Optics that I know of. »⁵⁶. Cette anecdote est importante, car elle donne une idée de la naissance du terme « optique quantique ». ⁵⁷ (Cohen-Tannoudji 2019). Le rendez-vous fut pris, et Glauber donna un grand cours sur sa théorie quantique de la cohérence aux Houches, en 1964.

Située entre Chamonix et Saint-Gervais-les-bains, la station de ski des Houches offre un panorama splendide sur les Alpes et le Mont-Blanc. C’est dans ce lieu favorable à la contemplation que Cécile DeWitt-Morette décida de créer en 1951 une Ecole d’été consacrée à la physique (qui existe toujours aujourd’hui), propice aux échanges entre grandes

exigées par la définition optique. Ce sont des propriétés qui sont pour le mieux exprimées en termes de fonctions de corrélation d’ordre supérieur $G^{(n)}$, pour $n > 1$. » (Glauber (1963b), p.2534)

55. voir Cohen-Tannoudji (2017), en ligne.

56. « Je lui ai dit qu’on devrait l’appeler Optique Quantique. [...] Je crois que c’était la première utilisation du terme Optique Quantique, de ce que je sais. » (Glauber 1987)

57. En réalité, comme mentionné dans l’introduction du mémoire (dans la note 2), j’ai trouvé des occurrences du terme avant 1964 ; mais le terme n’avait pas le même sens que celui sous-entendu par Glauber, où le rayonnement est quantifié. Il faut ajouter à cela que, même si le titre de l’école d’été des Houches de 1964 a marqué l’apparition de l’expression « optique quantique » dans son sens moderne, c’est-à-dire dans le sens d’une quantification du rayonnement et pas uniquement de la matière, celle-ci a mis du temps à diffuser. En particulier, je soulignerai que Claude Cohen-Tannoudji a plus tard largement contribué à faire accepter au sein de la communauté scientifique la nécessité de quantifier la lumière et à définir ainsi les expériences relevant de la « vraie optique quantique », comme lui et son ami Serge Reynaud se plaisaient à dire.

figures du domaine et étudiants. L'École des Houches connut un rapide rayonnement international, et accueillit au fil des ans d'éminentes personnalités comme Fermi, Pauli, Schwinger, Uhlenbeck, Ramsey... sans compter ses étudiants qui allaient recevoir plus tard le prix Nobel de physique comme Alfred Kastler, Pierre-Gilles de Gennes, Georges Charpak, Claude Cohen-Tannoudji, ou encore Serge Haroche. La liste complète des prix Nobel ayant séjourné aux Houches contient plusieurs dizaines de noms⁵⁸.

Les premières sessions – de 1951 à 1957 – furent consacrées à différents aspects de la physique quantique : théorie quantique des champs, électrodynamique quantique, théorie quantique des solides... Néanmoins, les thèmes des années suivantes dévièrent de la mécanique quantique, jusqu'à véritablement s'en éloigner ; par exemple, l'été 1962 fut dédié à la géophysique, et celui de 1963 à la relativité. En particulier, aucune des sessions entre 1960 et 1963 ne traita du laser, qui était pourtant en plein développement. Il fallut attendre la prestigieuse session de 1964⁵⁹, finalement intitulée « Optique et électronique quantiques », pour que le laser et l'optique quantique fassent simultanément leur apparition aux Houches. Il n'est pas surprenant que ces deux thèmes figurent au programme de la même session ; dans la préface de l'ouvrage où sont retranscrites toutes les conférences qui ont été données en 1964, il est rappelé que ceux-ci sont intimement liés :

A number of important problems concerning the electromagnetic field and its interaction with matter have emerged in recent years as a result of the development of optical masers and the consequent expansion of theoretical optics. An understanding of these problems has required a sharpening and reformulation of several basic concepts.⁶⁰

Le laser décrit dans le cours de Glauber

Le cours de Glauber aux Houches se scinda en 17 parties regroupées sous le nom « Optical coherence and photon statistics ». Dans ce cours, bien plus long que les deux articles de 1963 réunis, Glauber reprend le contenu de ces derniers, mais avec beaucoup plus de détails mathématiques et d'interprétations. Il y a un point en particulier que je voudrais soulever : le traitement du laser, dans les cas idéal et non-idéal, afin de montrer la portée des états cohérents.

Nous avons vu que la présence de corrélations dans un champ tient son origine de modulations de l'amplitude de ce champ. Comme un laser fonctionnant largement au-

58. Pour plus de renseignements, voir le site internet de l'École des Houches.

59. On notera par exemple la présence de Nicolaas Bloembergen, qui parla d'optique non-linéaire, de Pierre Aigrin, qui donna un cours sur les lasers à solides, et de Jean Brossel, qui évoqua le pompage optique développé au Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'École normale supérieure (renommé en 1994 Laboratoire Kastler-Brossel).

60. « Un nombre de problèmes importants liés au champ électromagnétique et à son interaction avec la matière a émergé ces dernières années comme une conséquence du développement des masers optiques et du développement de l'optique théorique qui s'ensuivit. Comprendre ces problèmes a demandé un affûtage et une reformulation de plusieurs concepts de base. » (Blandin et al. (1965), p.VII)

dessus du seuil est très stable, l'amplitude du champ varie très peu, donc le laser idéal ne présente pas de corrélations d'intensité : « Lasers, when they are operating most monochromatically, generate beams with very little amplitude modulation, and for these, [...] there would be virtually no photon correlation effect at all. »⁶¹

Le laser idéal peut donc être décrit par un état cohérent $|\alpha\rangle$ ⁶², puisque c'est un champ qui ne subit aucune modulation d'amplitude⁶³. A tout ordre, les fonctions de corrélation peuvent se factoriser en produit de fonctions de corrélation du premier ordre : le champ du laser idéal est donc totalement cohérent au sens de Glauber.

Cependant, le laser idéal demeure une abstraction : dans la réalité, un laser n'est jamais parfaitement monochromatique, et sa fréquence varie aléatoirement dans une certaine gamme. Glauber étudie alors l'évolution du champ sous l'effet d'un Hamiltonien de perturbation aléatoire, et aboutit à ce résultat : même dans le cas non-idéal, il n'apparaît pas de modulation d'amplitude, donc de corrélation de photons (ce qui n'est pas trivial d'un point de vue quantique).

Notons enfin qu'un autre grand théoricien du laser, Willis Lamb, qui était également présent à cette Ecole d'été, fit un cours sur sa théorie du maser optique – donc du laser – en des termes exclusivement classiques. Glauber, fervent défenseur de l'interprétation quantique, eut l'occasion de se quereller avec Lamb à ce propos⁶⁴. Le débat entre interprétation semi-classique et interprétation quantique, commencé à la Conférence d'électrodynamique quantique à Paris, se poursuivait donc aux Houches avec Lamb et Glauber⁶⁵. Personne ne sortit vainqueur de ce duel, les deux physiciens ayant campé sur leurs positions. Réputés pour leur caractère difficile, leurs relations demeurèrent manifestement toujours cordiales : « It's been very friendly in general between Lamb and myself, because he has great respect for me and I do for him. »⁶⁶. Lamb accorda même un permis photon à Glauber ! « "You know, Roy, [...] I would give out licenses for talking about photons, and there's only one license I'd give, and that's to you." That was terribly flattering. »⁶⁷.

61. « Quand ils fonctionnent de façon la plus monochromatique, les lasers génèrent des faisceaux avec une très faible modulation d'amplitude, et pour ceux-là, il ne devrait pratiquement pas y avoir d'effet de corrélation. » (Glauber (1965), p.162)

62. Dans le cas du laser idéal, donc parfaitement monochromatique, on connaît la phase et l'amplitude du champ. On peut donc décrire ce dernier par un état cohérent $|\alpha\rangle = ||\alpha|e^{i\phi}\rangle$, où $|\alpha|$ et ϕ sont l'amplitude et la phase en question.

63. Cela suppose que la cavité laser est idéale, c'est-à-dire qu'elle ne subit pas de pertes. Dans le cas réel, il y a toujours des pertes, liées par exemple à des imperfections des miroirs ou au phénomène de diffraction. Il en résulte que le champ dans la cavité est amorti, ce qui engendre une perte d'amplitude.

64. C'est ce que raconte Cohen-Tannoudji, passionné par ces discussions : Cohen-Tannoudji (2017).

65. D'après Claude Cohen-Tannoudji, Kastler intervenait parfois dans le débat, bien qu'il restât selon lui plutôt neutre (Cohen-Tannoudji 2019).

66. « Les relations entre Lamb et moi-même ont toujours été en général très amicales, parce qu'il avait un grand respect pour moi et réciproquement. » (Glauber 1987)

67. « "Vous savez, Roy, [...] je délivrerais des permis pour parler de photons, et je ne le donnerais qu'à une seule personne : c'est à toi." C'était incroyablement flatteur. » (Glauber 1987)

La postérité du cours de Glauber aux Houches

Pour refermer cette section consacrée à l'École d'été des Houches de 1964, je souhaite insister sur l'importance du cours de Glauber dans le développement de l'optique quantique, en particulier parce qu'il a marqué une étape importante dans le parcours scientifique de Claude Cohen-Tannoudji. Ce dernier me racontait en effet ([Cohen-Tannoudji 2019](#)) qu'il découvrit les états cohérents à l'occasion du cours de Glauber aux Houches, et qu'il en fut émerveillé – notamment parce que ces états permettaient de retrouver une phase dans le domaine quantique.

Pour Claude Cohen-Tannoudji, le cours de Glauber fut un événement qui constitue, selon lui, le début de l'optique quantique ; en témoigne ce mot qu'il écrivit 50 ans après cette École d'été à l'attention de Glauber, qui fêtait alors ses 90 ans :

The lectures that you gave at Les Houches during the summer of 1964 were a memorable event. Your talent to explain the quantum nature of optical detection signals fascinated everybody. Willis Lamb was also attending the lecture and the questions that he was asking after each lecture were extremely stimulating. I really think that this course which you gave in 1964 was the starting point of quantum optics. ⁶⁸

Je proposais au début de ce chapitre de fixer la date de naissance de l'optique quantique au 11 février 1963. Faudrait-il la déplacer en 1964, au premier cours de Glauber aux Houches ? Je dirais plutôt que les années 1963 et 1964 furent à la fois cruciales et complémentaires dans la naissance de l'optique quantique. 1963, parce que c'est cette année-là que Glauber publia les deux articles fondateurs qui introduisirent les états cohérents et les fonctions de corrélation d'ordre n ⁶⁹. Et 1964, parce que l'école d'été des Houches a entériné cette nouvelle vision du champ, en donnant plus de détails par exemple sur le processus de photodétection et sur la description du laser, tout en influençant une génération de physiciens dont faisait partie Claude Cohen-Tannoudji.

68. « Les cours que vous avez donnés aux Houches pendant l'été 1964 furent un événement mémorable. Tout le monde a été fasciné par votre talent pour expliquer la nature quantique de la détection des signaux optiques. Willis Lamb assistait lui aussi à la conférence, et les questions qu'il posait à la fin de chaque cours étaient extrêmement stimulantes. Je crois vraiment que ce cours que vous avez donné en 1964 a marqué le début de l'optique quantique. » ([Cohen-Tannoudji 2017](#))

69. En réalité, dans son article « Photon correlations » ([Glauber 1963a](#)) de fin décembre 1962 et paru début février 1963, Glauber avait déjà introduit les états cohérents comme états possibles du champ, ainsi que les fonctions de corrélation d'ordre 2 définies à partir des opérateurs sur le champ. Seulement, dans ce très court article que j'ai déjà évoqué à travers la critique de la prédiction de Wolf et Mandel, Glauber ne justifie pas vraiment sa démarche ; il faut donc plutôt y voir les prémisses des deux autres articles de 1963.

3.5 Pourquoi n’y a-t-il pas eu de Glauber avant Glauber ?

Pourquoi a-t-il fallu attendre Glauber et ses articles de 1963 pour donner une interprétation intégralement quantique des expériences de Hanbury Brown et Twiss ? Et pourquoi cette entreprise n’a-t-elle pas été menée auparavant par l’un des physiciens impliqués dans la controverse autour de ces expériences ? Bien sûr, on peut invoquer le passé scientifique. Par exemple, Glauber étudia la théorie quantique des champs, dont les méthodes n’étaient utilisées qu’en physique des particules (et non en optique), tandis que Wolf écrivit avec Born un ouvrage intégralement consacré à l’optique classique, *Principles of Optics*. Mais j’ai voulu aller plus loin en tâchant d’élucider ce point auquel je n’ai cessé de penser en écoutant les interviews orales de Glauber disponibles en ligne. Dans ce que j’ai consulté, la question ne lui a jamais été posée directement ; néanmoins, dans une interview téléphonique datant de 2005, suite à son prix Nobel, il semble attribuer la réticence à développer une théorie purement quantique de la lumière à une certaine paresse des physiciens attachés à la « vieille optique » :

It was very well understood that light has a granular structure, even though nearly everything one observed was explained by continuous waves. But there were various things about this granular structure which were not taken fully seriously, because it didn’t appear that they were necessary. In the context of the older optics which dealt only with the intensity of light, the average intensity, and not with the statistical properties of light, you could get away with using the older form of the theory ; and so people were rather lazy about it.⁷⁰

Ainsi, selon Glauber, la grande efficacité de l’optique classique à rendre compte des phénomènes optiques connus aurait inhibé le développement d’une théorie quantique en installant les physiciens conservateurs dans une certaine forme de paresse. Si l’on peut s’accorder avec Glauber sur le fait que le cadre de l’optique classique suffisait à de nombreux physiciens, le dernier point semble plus discutable : les physiciens fidèles à l’optique classique semblent ne pas avoir développé de théorie quantique non pas par paresse, mais plutôt par profonde conviction que cela était inutile. De plus, si la raison n’était que pure paresse, la controverse entre Wolf, Mandel et Glauber n’aurait pas eu lieu d’être.

J’ajouterai à cela une hypothèse plus personnelle : on peut remarquer qu’avant 1963,

70. « Il était très bien compris que la lumière possédait une structure granulaire, même si presque tout ce qu’on pouvait observer était expliqué par des ondes continues. Mais il y avait plusieurs choses à propos de cette structure granulaire qui n’étaient pas toutes prises sérieusement en compte, parce qu’elles n’apparaissaient pas nécessaires. Dans le contexte de la plus vieille optique, qui ne traitait que de l’intensité de la lumière, de l’intensité moyenne, et non des propriétés statistiques de la lumière, vous pouviez vous en sortir en utilisant la forme plus ancienne de la théorie ; et donc les gens devenaient plutôt paresseux. » ([Glauber 2005c](#))

Wolf et Mandel avaient déjà chacun mené des expériences dans le domaine de l'optique, ce qui ne me semble pas être le cas pour Glauber. Ce contact avec l'expérience pourrait-il expliquer l'attachement de Wolf et Mandel pour l'optique classique? Cette hypothèse mériterait d'être étayée, mais dans le cadre de ce mémoire, je préfère la laisser au rang de simple constatation.

Conclusion

De 1956 à 1964, de spectaculaires progrès expérimentaux en optique ont provoqué un bouleversement conceptuel quant à la compréhension de la lumière. Pour commencer, en 1956, l'expérience en laboratoire de Hanbury Brown et Twiss mit en évidence des corrélations d'intensités dans le domaine du visible. Un calcul classique permet de comprendre aisément cet effet ; mais dès lors qu'on cherche à interpréter celui-ci en termes de photons, les difficultés surviennent. Quel sens peut-on en effet attribuer à des corrélations de photons ? Cette question alimenta pendant deux ans un débat au cours duquel certains physiciens tentèrent de remettre en cause les résultats de Hanbury Brown et Twiss et s'acharnèrent à démontrer que de telles corrélations ne pouvaient se produire. Finalement, quand leur existence fut définitivement avérée⁷¹, il devint clair que la lumière ne pouvait pas être simplement décrite par un ensemble de corpuscules indépendants les uns des autres, et de ce fait que le concept de photon n'était à lui seul pas suffisant pour expliquer les phénomènes observés.

En parallèle, l'intérêt des militaires pour la recherche fondamentale et en particulier pour le radar micro-onde a conduit à la création du premier maser (en 1954), puis du premier laser (en 1960), qui témoigne de la contribution de l'électronique quantique à la naissance de l'optique quantique⁷². L'arrivée du laser marqua l'apparition d'une nouvelle source de lumière, avec de remarquables propriétés de cohérence que des physiciens comme Wolf et Mandel cherchèrent à expliquer en se fondant sur la théorie de la cohérence classique. Le laser motiva l'organisation de grandes conférences internationales – comme celle de Rochester en 1960 ou celle de Paris en 1963 – dont l'un des thèmes centraux était la notion de cohérence, rendue plus claire par Wolf depuis 1954.

71. suite à la deuxième expérience de Brannen et Ferguson, en 1958.

72. Joan Lisa Bromberg remarque à ce propos que l'électronique quantique et l'optique quantique ont toutes deux bénéficié de l'esprit de « device physics » installé par les militaires dans le but d'élaborer des prototypes au nom de la sécurité nationale : « It is certainly true that quantum electronics and the closely related field of quantum optics have been two of the fields most useful and most used for weaponry. Yet it is also true that in these fields research aimed at creating or improving devices (“device physics”) was pursued in tandem with fundamental physics. » : « Il est certainement vrai que l'électronique quantique et le champ très proche qui s'y rapporte, l'optique quantique, ont été les deux domaines les plus utiles et les plus utilisés pour l'armement. De même, il est vrai que dans ces domaines, la recherche qui avait vocation à créer ou à améliorer des prototypes (« device physics ») était menée en tandem avec la physique fondamentale. » (Bromberg (2006), p.238).

Ces deux avancées pratiques concomitantes – l’observation de corrélations de second ordre et la création de faisceaux lasers – soulevèrent le problème transversal suivant : quel serait l’effet HBT pour le laser ? Mandel et Wolf, ainsi que Glauber, apportèrent des réponses radicalement opposées. Mandel et Wolf avancèrent que le laser manifesterait un effet HBT d’autant plus marqué que sa cohérence était forte. Glauber s’inscrivit en faux en affirmant que le laser (idéal) ne présenterait aucune corrélation, puisqu’il ne subirait aucune fluctuation d’intensité. L’avenir allait lui donner raison.

C’est en réfléchissant à ce problème que Glauber fut amené à formuler une nouvelle théorie de la cohérence. Certainement inspiré par l’électrodynamique quantique, qu’il connaissait bien pour avoir travaillé auparavant dans le domaine de la physique des particules, il décrivit le champ, le processus de photodétection et les corrélations du champ de façon intégralement quantique. Pour cela, il proposa sa propre définition (quantique) des fonctions de corrélation, qui ne coïncidaient avec celles de Wolf qu’au premier ordre. Afin de décrire la lumière du laser, il étendit cette définition à l’ordre n , ce qui peut s’interpréter comme une généralisation des corrélations HBT à n points de l’espace-temps. Alors, grâce à des conditions de factorisation sur ces fonctions de corrélation d’ordre n , il établit une nouvelle définition de la cohérence, en faisant la distinction entre cohérence totale et cohérence partielle. Glauber était ainsi en mesure de distinguer différents types de lumière, comme les sources thermiques et les faisceaux lasers, en fonction de leur degré de cohérence (directement relié à la présence ou à l’absence de corrélations).

De plus, Glauber fit émerger naturellement de sa théorie des états caractérisant un champ totalement cohérent ⁷³, les « états cohérents ». Glauber, qui avait eu l’intuition que les états de photons ne seraient pas adaptés pour rendre compte du laser, fut lui-même émerveillé par ces états cohérents. Certes, ceux-ci avaient déjà été envisagés par Schrödinger, mais l’originalité de Glauber est de leur avoir donné dans le contexte de l’invention du laser un statut ontologique, en comprenant qu’ils pouvaient être érigés en états du champ. Les états cohérents présentaient surtout le grand avantage de faire le lien entre les descriptions classique et quantique du champ, notamment en apportant une réponse claire à la question : « Où est la phase du photon ? ». Comme le souligne Claude Cohen-Tannoudji : « On ne comprenait pas ce qu’était la phase [du photon]. La superposition de n états a déverrouillé l’esprit de beaucoup de gens. » (Cohen-Tannoudji 2019).

Malgré la puissance explicative de cette nouvelle théorie et la clarté des présentations de Glauber – que ce soit dans ses articles ou ses conférences – ses travaux de 1963 ont été vivement critiqués par les physiciens attachés à la vision semi-classique de l’optique. En première ligne de ses détracteurs figuraient Wolf et Mandel, qui collaboraient ensemble à Rochester, et qui se trouvaient être en parfaite symbiose aussi bien sur le plan des idées que sur le plan personnel. La confrontation entre ces trois protagonistes, qui concernait

73. Je précise une nouvelle fois qu’il s’agit bien ici d’une cohérence totale au sens de la nouvelle définition de la cohérence par Glauber.

initialement le problème spécifique des corrélations du laser, se poursuivit sur un terrain beaucoup plus vaste, avec comme leitmotiv : faut-il décrire les phénomènes d'optique de façon quantique ou bien semi-classique ?

La controverse autour de cette question, attisée par l'apparition de la théorie de Glauber, dura au moins quinze ans à la suite de la Conférence de Paris. En effet, comme l'explique Claude Cohen-Tannoudji dans son cours de 1979-1980 au Collège de France⁷⁴, il fallut attendre l'avènement de l'optique non-linéaire et l'expérience de Jeff H. Kimble, Mario Dagenais et Leonard Mandel (Kimble et al. 1977) pour départager les théories quantique et semi-classique, qui dans ce cas particulier ne prévoyaient pas les mêmes résultats⁷⁵. Ce n'est pas l'objet du présent mémoire de dire si cette expérience a réellement mis fin au débat ; néanmoins, force est de constater qu'elle marqua un tournant au cours duquel Mandel remit en cause sa position semi-classique.

On pourrait dire que la théorie de Glauber, qui réalisa une synthèse entre les corrélations de Hanbury Brown et Twiss et les « non-corrélations » du laser en intégrant ces deux phénomènes dans une même théorie de la cohérence, a été en quelque sorte l'aboutissement d'une panoplie d'interrogations soulevées depuis 1956. Cette impression est renforcée par le fait que Glauber a réuni dans une même théorie les concepts de photon et de cohérence, à travers les fonctions de corrélations d'ordre n et les états cohérents.

Mais en tant qu'élément déclencheur d'une grande controverse, les travaux de Glauber ont surtout constitué un commencement. En effet, en proposant une vision purement quantique des expériences d'optique contemporaines, ils apportaient un regard neuf sur la lumière et sur son interaction avec la matière, en conflit avec la vision semi-classique. Ils amorçaient une nouvelle ère dans l'histoire de la lumière, et inauguraient un nouveau domaine de la physique : l'optique quantique.

74. De même que le cours de Glauber aux Houches, ce cours de Claude Cohen-Tannoudji fait toujours référence aujourd'hui en optique quantique : [Cohen-Tannoudji \(1980\)](#).

75. Il est possible que le débat eût pu être tranché quelques années auparavant, notamment avec une expérience de John F. Clauser mettant apparemment en défaut la théorie semi-classique au profit de la théorie quantique ([Clauser 1974](#)). Comprendre pourquoi cette expérience n'a pas eu la portée de celle de Kimble, Dagenais et Mandel constitue une piste de recherches qui mériterait d'être explorée.

Bibliographie

- Ádám, A., Jánossy, L., and Varga, P. (1955). « Beobachtungen mit dem Elektronenvervielfacher an kohärenten Lichtstrahlen ». *Annalen der Physik*, 451(5-8) :408–413.
- Aspect, A. (2019). Interview personnelle d’Alain Aspect, Professeur à l’Institut d’Optique, le 08 mars 2019.
- Beck, G. (1927). « Zur Theorie des Photoeffekts ». *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 41(6-7) :443–452.
- Bertolotti, M. (2015). *Masers and Lasers, Second Edition : an Historical Approach*. Taylor & Francis.
- Blandin, A., Cohen-Tannoudji, C., and DeWitt, C. (1965). Préface. In *Quantum Optics and Electronics : Lectures Delivered at Les Houches During the 1964 Session of the Summer School of Theoretical Physics, University of Grenoble*. Gordon & Breach.
- Bloembergen, N. (1964). « Introduction ». In *Quantum Electronics : Proceedings of the third international congress (1963)*, volume 1, pages XIII – XV. Dunod.
- Born, M. and Wolf, E. (1959). *Principles of Optics*.
- Brannen, E. and Ferguson, H. I. (1956). « The question of correlation between photons in coherent light rays ». *Nature*, 178(4531) :481.
- Bretenaker, F. and Treps, N. (2016). *Le LASER : 50 ans de découvertes*. EDP Sciences, 2e édition.
- 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. (2010). « Modelling the Hanbury Brown-Twiss Effect ; The Mid-Twentieth century revolution in optics ; A talk for HQ3 ». http://quantum-history.mpiwg-berlin.mpg.de/news/workshops/hq3/hq3_talks/22_bromberg.pdf.

- Bromberg, J. L. (2016). « Explaining the laser's light : classical versus quantum electro-dynamics in the 1960's ». *Archive for History of Exact Sciences*, 70(3) :243–266.
- Brosseau, C. (2010). « Polarization and coherence optics : historical perspective, status, and future directions ». In *Progress in Optics*, volume 54, pages 149–208. Elsevier.
- Cagnac, B. (2010). Pré-histoire et histoire du LASER. Culture Sciences Physique. <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/video-html5/pp2010/cagnac/pre-histoire-et-histoire-du-laser>.
- Clauser, J. F. (1974). « Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect ». *Physical Review D*, 9(4) :853.
- Cohen-Tannoudji, Claude et Aspect, A. (2019). Entretien personnel avec Claude Cohen-Tannoudji et Alain Aspect à l'Ecole Normale Supérieure de Paris, le 29 mars 2019.
- 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. (2017). Souvenirs des Houches. Sur Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=U1J1JgNGwCM>.
- Darrigol, O. (2012). *A history of optics from Greek antiquity to the nineteenth century*. Oxford University Press.
- Darrigol, O. (2014). « The quantum enigma ». In Michel Janssen and Christoph Lehner, editor, *The Cambridge companion to Einstein*, pages 117–142. Cambridge University Press.
- Davis, J. and Lovell, B. (2003). « Robert Hanbury Brown. 31 August 1916–16 January 2002 Elected FRS 1960 ». *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, (49) :83–106.
- Dirac, P. A. (1958). *The principles of quantum mechanics*. Clarendon Press, Oxford, fourth edition.
- Einstein, A. (1905). « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt ». *Annalen der Physik*, 322(6) :132–148.
- Fisher, E. M. (2017). Principles and Early Historical Development of Silicon Avalanche and Geiger-Mode Photodiodes. In *Photon Counting-Fundamentals and Applications*, chapter 1. IntechOpen.

- 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.
- Forman, P. (1992). « Inventing the maser in postwar America ». *Osiris*, 7 :105–134.
- Forrester, A. T., Gudmundsen, R. A., and Johnson, P. O. (1955). « Photoelectric mixing of incoherent light ». *Physical Review*, 99(6) :1691.
- Glauber, R. J. (1963a). « Photon correlations ». *Physical Review Letters*, 10(3) :84–86.
- Glauber, R. J. (1963b). « The quantum theory of optical coherence ». *Physical Review*, 130(6) :2529–2539.
- Glauber, R. J. (1963c). « Coherent and incoherent states of the radiation field ». *Physical Review*, 131(6) :2766–2788.
- Glauber, R. J. (1964). « Quantum Theory of Coherence ». In *Quantum Electronics : Proceedings of the third international congress (1963)*, volume 1, pages 111 – 120. Dunod.
- 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.
- Glauber, R. J. (2005a). Biographical, on NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/glauber/biographical>.
- Glauber, R. J. (2005b). Nobel lecture : One Hundred Years of Light Quanta, on Nobel-Prize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/glauber/lecture>.
- Glauber, R. J. (2005c). Telephone interview on October 4th, 2005 with Professor Roy J. Glauber after the announcement of the 2005 Nobel Prize in Physics, on NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/glauber/interview/>.

- Glauber, R. J. (2008). Interview on June 30th, 2008 with the 2005 Nobel Laureate in Physics Roy Glauber, at the 58th Meeting of Nobel Laureates in Lindau, Germany, on NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/glauber/interview/>.
- Grangier, P. (2019). Interview personnelle de Philippe Grangier, Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut d'Optique, le 26 mars 2019.
- Grudzinski, R. and Paillette, M. (1963). « Sur des interférences avec grande différence de marche obtenues avec un laser à gaz ». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 257(25) :3842.
- Hanbury Brown, R. (1974). *The intensity interferometer : its application to astronomy*. Taylor & Francis.
- Hanbury Brown, R. (1991). *Boffin : A Personal Story of the Early Days of Radar, Radio Astronomy and Quantum Optics*. Taylor & Francis.
- Hanbury Brown, R., Jennison, R., and Das Gupta, M. (1952). « Apparent angular sizes of discrete radio sources : observations at Jodrell Bank, Manchester ». *Nature*, 170(4338) :1061.
- Hanbury Brown, R. and Twiss, R. Q. (1954). « A new type of interferometer for use in radio astronomy ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 45(366) :663–682.
- Hanbury Brown, R. and Twiss, R. Q. (1956a). « Correlation between photons in two coherent beams of light ». *Nature*, 177(4497) :27–29.
- Hanbury Brown, R. and Twiss, R. Q. (1956b). « A test of a new type of stellar interferometer on Sirius ». *Nature*, 178(4541) :1046–1048.
- Hanbury Brown, R. and Twiss, R. Q. (1957). « Interferometry of the intensity fluctuations in light-I. Basic theory : the correlation between photons in coherent beams of radiation ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 242(1230) :300–324.
- Jansky, K. G. (1933). « Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin ». *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 21(10) :1387–1398.
- Javan, A., Bennett Jr., W. R., and Herriott, D. R. (1961). « Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture ». *Physical Review Letters*, 6(3) :106.
- Kimble, J. H., Dagenais, M., and Mandel, L. (1977). « Photon antibunching in resonance fluorescence ». *Physical Review Letters*, 39(11) :691.

- Klauder, J. R. and Sudarshan, E. C. G. (1968). *Fundamentals of Quantum Optics*. New York, W.A. Benjamin.
- Kragh, H. (2002). *Quantum Generations : A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton University Press.
- Kragh, H. (2014). « Photon : New light on an old name ». *arXiv preprint arXiv :1401.0293*.
- Kuhn, T. S. (1987). *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*. University of Chicago Press.
- Lamb, W. E. (1995). « Anti-photon ». *Applied Physics B*, 60(2-3) :77–84.
- Laue, M. (1906). « Zur thermodynamik der Interferenzerscheinungen ». *Annalen der Physik*, 325(7) :365–378.
- Lewis, G. N. (1926). « The conservation of photons ». *Nature*, 118(2981) :874.
- Maiman, T. H. et al. (1960). « Stimulated Optical Radiation in Ruby ». *Nature*, 187 :493–494.
- Mandel, L. (1958). « Fluctuations of photon beams and their correlations ». *Proceedings of the Physical Society*, 72(6) :1037.
- Mandel, L. (1964). « Some Coherence Properties of Non-Gaussian Light ». In *Quantum Electronics : Proceedings of the third international congress (1963)*, volume 1, pages 101 – 110. Dunod.
- Mandel, L. and Wolf, E. (1961). « Correlation in the fluctuating outputs from two square-law detectors illuminated by light of any state of coherence and polarization ». *Physical Review*, 124(6) :1696.
- Michelson, A. A. (1891). « Measurement of Jupiter’s Satellites by Interference ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 3(17) :274–278.
- O’Neill, E. and Bradley, L. (1961). « Coherence Properties of Electromagnetic Radiation ». *Physics Today*, 14 :28.
- Osmundsen, J. A. (1960). « Light Amplification Claimed by Scientist ». *The New York Times*, page 1 & 7.
- Pfleegor, R. L. and Mandel, L. (1967). « Interference of independent photon beams ». *Physical Review*, 159(5) :1084.
- Purcell, E. M. (1956). « The question of correlation between photons in coherent light rays ». *Nature*, 178(4548) :1449.

- Rebka, G. and Pound, R. (1957). « Time-correlated photons ». *Nature*, 180 :1035–1036.
- Schawlow, A. L. and Townes, C. H. (1958). « Infrared and Optical Masers ». *Physical Review*, 112(6) :1940.
- Schrödinger, E. (1927). « Über den Comptoneffekt ». *Annalen der Physik*, 387(2) :257–264.
- Scully, M. O. and Zubairy, M. S. (1999). *Quantum optics*. AAPT.
- Scully, R. J., Scully, M. O., and Kimble, J. H. (2005). "Leonard Mandel". In *Biographical Memoirs*, volume 87, chapter 16, pages 274–292. Washington DC : The National Academies Press.
- Siegman, A. E. (1986). *Lasers*. University Science Books, Mill Valley, California.
- Sillitto, R. M. (1957). « Correlation between events in photon detectors ». *Nature*, 179(4570) :1127.
- 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.
- Taylor, G. I. (1909). « Interference fringes with feeble light ». In *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, volume 15, pages 114–115.
- Thompson, B. J. (2004). "Guide, Philosopher and Friend". In Jannson, Tomasz P., editor, *Tribute to Emil Wolf : science and engineering legacy of physical optics*, volume 139, chapter 1, pages 1–28. SPIE Press.
- Townes, C. H. (1999). *How the laser happened - Adventures of a scientist*. Oxford University Press.
- Vaughan, A. H. J. (1967). « Interferometer Measurement of Star Diameters ». *Astronomical Society of the Pacific Leaflets*, 10(458) :57–64.
- Wentzel, G. (1926). « Zur Theorie des photoelektrischen Effekts ». *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 40(8) :574–589.
- Wheaton, B. R. (1991). *The tiger and the shark : Empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge University Press.
- Wiener, N. (1928). « Coherency matrices and quantum theory ». *Journal of Mathematics and Physics*, 7(1-4) :109–125.
- Wolf, E. (1954). « Optics in terms of observable quantities ». *Il Nuovo Cimento (1943-1954)*, 12(6) :884–888.

- Wolf, E. (1957). « Intensity fluctuations in stationary optical fields ». *Philosophical Magazine*, 2(15) :351–354.
- Wolf, E. (1959). « Coherence properties of partially polarized electromagnetic radiation ». *Il Nuovo Cimento (1955-1965)*, 13(6) :1165–1181.
- Wolf, E. (1964). « Recent Researches on Coherence Properties of Light ». In *Quantum Electronics : Proceedings of the third international congress (1963)*, volume 1, pages 13 – 34. Dunod.
- 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.
- Wolf, E. (2007). *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light*. Cambridge University Press.
- Wolf, E. (2010). « Early days of coherence theory and the first Rochester conference on coherence ». *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 5.
- Zernike, F. (1938). « The concept of degree of coherence and its application to optical problems ». *Physica*, 5(8) :785–795.