

Génération de photons intriqués par des boîtes quantiques semi-conductrices en microcavité

Rémy BRAIVE

Sous la Direction d'Izo ABRAM et Isabelle ROBERT-PHILIP

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Photonique et de Nanostructures

Route de Nozay – 91 460 Marcoussis

Table des matières

Table des matières	2
Introduction	3
Présentation de l'équipe	4
Le laboratoire de Photonique et Nano structure	4
L'équipe Photonique et Electronique Quantique	4
Contexte général : Enjeux, objectifs et thématique	5
Enjeux : Traitement quantique de l'information	5
Contexte scientifique : quel candidats ?	5
Contexte international : un domaine concurrentiel	6
Objectifs et thématiques	6
Présentation du sujet de thèse	7
Sujet : Génération de photons intriqués	7
Les différents schémas d'intrication possibles	7
Les cavités optiques	8
Spécificités et nature du travail de thèse	10
Objectifs	10
Programme et déroulement du stage et de la thèse	11
Perspectives professionnelles	12
Conclusion	13
Bibliographie commentée	14
Annexe 1 : Phys. Rev. Lett 47, 460-465 (1981)	18
Annexe 2 : Phys. Rev Lett 62, 2205 (1989)	19

Introduction

Depuis plusieurs années, de nombreux travaux s'attachent à exploiter la physique quantique pour l'appliquer au traitement de l'information, les communications ou la cryptographie. Par exemple, ils tirent parti de l'unicité des photons pour la distribution quantique de clé cryptographique, ou bien des corrélations subtiles entre photons indiscernables ou intriqués pour le calcul quantique.

Les travaux du Laboratoire de Photonique et de Nanostructures s'inscrivent dans ce contexte. Ils visent la génération d'états quantiques de la lumière pour le traitement de l'information quantique à partir de sources à l'état solide. Les expériences réalisées au laboratoire reposent sur le contrôle du rayonnement de boîtes quantiques en semi-conducteur, des structures extrêmement petites (de quelques nanomètres de hauteur pour quelque dizaines de nanomètres de diamètre) enterrées dans un autre matériau semi-conducteur. Ce contrôle est effectué en plaçant des nano-objets dans des microcavités optiques (minuscule résonateurs optique dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde, environs quelque centaines de nanomètres) qui présentent des effets d'électrodynamique quantique en cavité. Ainsi, il a été possible de produire des trains de photons uniques et des paires de photons produits en cascade. Récemment, il a été possible de produire des photons uniques indiscernables. Il s'agit là de l'état de la lumière le plus pure que l'on puisse imaginer : les photons sont préparés dans le même mode spatial, temporel et de polarisation. Ces photons sont sujets à des phénomènes d'interférence peu communs : lorsque deux photons indiscernables sont incident de part et d'autre d'une lame semi-réfléchissante, les deux photons ressortent de la lame toujours du même côté. Ils « coalescent » et forment un état de Fock à deux photons.

L'objet du stage consiste en une étude de quelques-unes des propriétés des photons unique émis par les boîtes quantiques uniques isolées dans les microcavités optiques et vise l'évaluation de l'effet des mécanismes de relaxation et de déphasage, propres à la physique du solide, sur l'indiscernabilité des photons émis. Ceci permettra de déterminer les conditions dans lesquelles une porte logique quantique basée sur des interférences à deux photons, ou sur des photons intriqués produits par une boîte quantique, peut être développée.

Ce stage se poursuivra par une thèse sur la production de photons intriqués par une boîte quantique isolée dans une microcavité. On exploitera l'émission de photons séquentiels ou bien l'indiscernabilité des photons émis par la boîte pour produire de tels états quantique de la lumière.

Présentation de l'équipe

L'équipe d'accueil est l'équipe Photonique et Electronique Quantique du Laboratoire de Photonique et de Nano structures (UPR20 du CNRS) à Marcoussis.

Le Laboratoire de Photonique et de Nano structures

Le Laboratoire de Photonique et de Nano structures est une unité propre du CNRS dont l'activité de recherche pluridisciplinaire s'inscrit dans le contexte général des nano sciences appliquées aux semi-conducteurs III-V. Il rassemble près de 40 chercheurs permanents, 40 Ingénieurs et Techniciens, environ 30 doctorants et 10 post-doctorants.

Les actions de recherche du laboratoire se regroupent en six grands thèmes fortement imbriqués : nano fluide, physique des nano structures, optique quantique et non-linéaire, technologies des semi-conducteurs, physique et croissance d'hétérostructures et dispositifs optoélectroniques. L'ensemble de ces activités s'appuie sur des moyens lourds de nanotechnologies : le laboratoire dispose de 700 m² de salle blanche dédiés aux nanotechnologies de semi-conducteurs III-V et de 5 bâtis de croissance dédiés à la croissance de semi-conducteurs III-V. A ce titre, le laboratoire est l'une des cinq centrales du réseau national des centrales de technologie publiques.

L'équipe Photonique et Electronique Quantique

L'équipe « Photonique et Electronique Quantique » est animée par Izo Abram, Directeur de Recherche au CNRS, et rassemble aujourd'hui 6 chercheurs permanents, 4 doctorants et 1 post-doctorant. Les activités de recherche de cette équipe ont pour buts l'étude, la compréhension et l'exploitation de phénomènes optiques intervenant lorsque le champ électromagnétique est confiné sur des supports à semi-conducteur, à des échelles inférieures à la longueur d'onde. Un des axes de ce travail est focalisé sur l'étude et la manipulation des propriétés quantiques de la lumière émise par une boîte quantique en semi-conducteurs.

Ce travail est conjointement mené par Izo Abram et Isabelle Robert-Philip, Chargée de Recherche au CNRS. Dans un contexte international très concurrentiel, l'équipe, pionnière dans le domaine, a démontré au cours de ces 4 dernières années qu'une boîte quantique unique isolée dans une microcavité optique peut émettre des photons uniques polarisés [Moreau1], des paires de photons séquentiels [Moreau2] et des photons uniques indiscernables [Varoutsis]. Aujourd'hui, elle s'oriente vers la génération de photons intriqués à partir d'une boîte quantique en résonance avec le mode d'une microcavité optique. Elle rassemble à la fois une expertise en optique quantique et un savoir-faire technologique pour la fabrication des sources étudiées, développé en collaboration avec les épitaxieurs et les technologues du Laboratoire de Photonique et de Nano structures.

Contexte général : enjeux, objectifs et thématiques

Mes travaux de thèse visent à la réalisation de sources solides fiables de photons intriqués, indispensables à l'ingénierie de l'information quantique.

Enjeux : traitement quantique de l'information

Les enjeux de mon travail de thèse s'inscrivent dans le contexte du traitement quantique de l'information dont l'objet est la mise en œuvre de dispositifs efficaces de communication et traitement de l'information exploitant les lois de la mécanique quantique. Ces dispositifs pour la plupart s'appuient sur la manipulation de particules individuelles (tels que des photons) et l'exploitation des corrélations subtiles entre ces particules (telles que l'intrication). Dans ce contexte, les sources lumineuses solides et fiables de photons intriqués constituent un élément clé des futurs dispositifs tout-optique de communication et de logique quantiques.

Plus précisément, le champ de la physique des états quantiques de la lumière s'est considérablement élargi pour passer aux "applications" dans le domaine de l'information quantique. La cryptographie quantique est actuellement l'exemple le plus abouti en la matière. Elle tire parti de l'unicité des photons ou des corrélations entre photons intriqués pour assurer la confidentialité absolue de la communication. Une application plus prospective exploite les corrélations subtiles entre états intriqués pour réaliser un ordinateur exponentiellement plus efficace qu'un ordinateur classique pour la résolution de certains problèmes, comme la factorisation en nombres premiers.

Au delà de ces aspects prospectifs, les sources lumineuses capables de générer efficacement des états intriqués de la lumière sont des outils indispensables pour passer des expériences de pensée en optique quantique aux expériences réelles.

Contexte scientifique : quels candidats ?

Dans la pratique, les sources réalisées dans le cadre de ma thèse reposeront sur l'utilisation et le contrôle du rayonnement de boîtes quantiques uniques en semi-conducteur placées dans une microcavité optique (cavité dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde). Il existe cependant, pour les applications évoquées précédemment, une compétition directe avec des équipes qui s'appuient sur des émetteurs différents : les atomes isolés, les cristaux paramétriques... Dans cette compétition, les boîtes quantiques semblent avoir plusieurs atouts, notamment si l'on considère l'intégration des dispositifs. Les moyens disponibles en nanotechnologie permettent d'envisager l'association et la mise en cascade de plusieurs nano sources, condition nécessaire à la construction d'un ordinateur quantique.

Contexte international : un domaine concurrentiel

Ces travaux sur les propriétés radiatives de boîtes uniques en microcavité mobilisent plusieurs équipes internationales, notamment aux Etats-Unis (Y. Yamamoto, Univ. of Stanford; E. Hu, UCSB; A. Scherer, CalTech ...) comme en Europe (J.Ph. Poizat, LSP Grenoble; A. Forchel, Würzburg University; M. Pepper, Toshiba Cambridge; A. Imamoglu, ETH Zürich...).

Objectifs et Thématiques

Le sujet de thèse allie deux grandes thématiques : la physique quantique (d'un point de vue expérimental et théorique dont plus particulièrement l'intrication des photons) et les nano sciences et nanotechnologies (plus particulièrement la spectroscopie de boîtes quantiques uniques et la technologie des microcavités en semi-conducteurs). Il est à la croisée entre recherche et technologie et nécessite un effort sur toute la chaîne, depuis la croissance des matériaux jusqu'à la démonstration expérimentale de la faisabilité d'une source solide de photons intriqués, en passant par la technologie des cavités optiques et leur modélisation.

Les objectifs de ce travail sont multiples. Il conviendra de définir les conditions expérimentales pour l'observation de l'intrication à partir de boîtes quantiques (dessin de la cavité, conditions d'excitation des émetteurs et étude des mécanismes de perte de cohérence,...), de prolonger le savoir-faire technologique pour la fabrication des cavités, de mettre en place le dispositif expérimental (interféromètres multiphotoniques stables) et de démontrer la faisabilité d'une source solide de photons intriqués.

Présentation du sujet de thèse

Sujet : Génération de photons intriqués

Mon travail de thèse porte sur la réalisation de sources lumineuses à l'état solide capables de générer à la demande des photons intriqués. D'un point de vue fondamental, les sources lumineuses fiables capables de générer des photons intriqués sont des outils indispensables pour implémenter tout un florilège d'expériences de pensée en optique quantique (Gedanken experiment) restées jusque là inaccessibles à toute expérience réelle. Au delà de ces aspects fondamentaux, le champ de la physique des états intriqués s'est considérablement élargi pour donner naissance au domaine du traitement quantique de l'information : l'objet d'un tel domaine est l'utilisation pratique des corrélations subtiles entre états intriqués pour la mise en œuvre de fonctionnalités de traitement de l'information dont l'efficacité surpasserait celles des systèmes classiques. Une application prospective exploite les corrélations entre états intriqués pour implémenter des dispositifs de logique quantique. Les sources lumineuses solides et intégrables capables de générer à la demande des photons intriqués constituent donc un élément clé des futurs dispositifs tout-optique de communication et de logique quantiques.

Les différents schémas d'intrication possibles

La source solide de photons intriqués développée dans le cadre de ma thèse sera une boîte quantique auto-assemblée d'InAs/GaAs, émettant vers 950 nm et placée dans une microcavité optique (résonateur optique dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde). Les travaux antérieurs de l'équipe d'accueil ont démontré que les boîtes auto-assemblées d'InAs/GaAs peuvent générer des photons uniques [Moreau1], des photons uniques indiscernables [Varoutsis] ou des paires de photons corrélés émis suivant un ordre bien défini [Moreau2]. Ces sources pourraient être utilisées, par exemple dans des systèmes de cryptage quantique. Pour atteindre des fonctionnalités d'information quantique plus sophistiquées, tels que la logique quantique ou la téléportation, il faut pouvoir réaliser des trains de photons intriqués. Pour y parvenir, on peut tirer parti des propriétés spécifiques d'émission que présentent les boîtes quantiques uniques en microcavité, lors de la génération de paires de photons en cascade. Deux schémas d'intrications seront explorés :

- **l'intrication en polarisation (voir Figure 1a) :**

Lors de l'émission de paires de photons séquentiels, le premier photon présente une polarisation circulaire (droite ou gauche) et le deuxième présente une polarisation circulaire inverse. L'émission de photons séquentiels produit donc un état intriqué qui conduit au même type de corrélations en polarisation que les paires de photons émises dans les cascades atomiques utilisées dans les premières expériences montrant la violation des inégalités de Bell [Aspect]. Toutefois, les boîtes sont soumises aux fluctuations d'origine thermique du réseau cristallin, qui ont un effet très néfaste sur la cohérence du système et qui concourent à détruire l'intrication. Il faut donc que la boîte émette les photons suffisamment rapidement, avant que les mécanismes de perte de cohérence n'aient pas le temps d'agir. Pour cela, il suffit d'isoler la boîte dans une microcavité optique qui induit une accélération de processus d'émission de la boîte [Gérard].

- **l'intrication en temps-énergie (voir Figure 1b) :**

Une boîte émettant deux photons en cascade peut être vue comme un système à trois niveaux : le niveau électronique donnant naissance au premier photon (de

durée de vie τ_{xx}), un niveau électronique intermédiaire donnant naissance au deuxième photon (de durée de vie τ_x) et le niveau fondamental. Ce processus d'émission s'apparente fortement au schéma proposé par J.D. Franson pour produire des paires de photons intriqués en temps-énergie [Franson]. Plusieurs expériences ont été réalisées avec ce schéma en utilisant des cristaux paramétriques [Tapster, Tittle]. Notons qu'un tel schéma expérimental, où la polarisation n'est pas l'observable mesurée, est particulièrement intéressant pour des expériences avec des fibres optiques pour lesquelles le contrôle de la polarisation est un point particulièrement délicat.

La condition nécessaire à la mise en œuvre d'un tel effet est que la boîte émette le deuxième photon bien plus rapidement que le premier ($\tau_{xx} \gg \tau_x$). Pour cela, il suffit d'isoler la boîte dans une microcavité optique qui induit une accélération de processus d'émission lorsque la boîte émet le deuxième photon [Gérard].

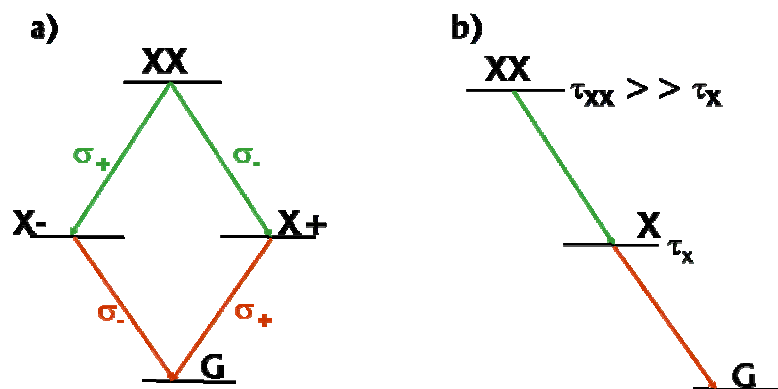


Figure 1 : a) Intrication en polarisation – Figure b) Intrication en temps-énergie

Les cavités optiques

Le dessin de la cavité optique est ici critique et doit satisfaire plusieurs exigences :

- Collection efficace des paires de photons. Les photons, d'énergie différente et séparés d'environ quelques meV, devront être tous deux couplés au mode de la cavité. Ceci impose une limite supérieure au facteur de qualité de la cavité Q située autour de 500.
- Renforcement efficace du processus d'émission de la boîte dans sa transition fondamentale. Ce renforcement, pour une boîte en résonance spectralement et spatialement avec le mode de la cavité, est proportionnel à Q/V , où Q désigne le facteur de qualité de la cavité et V son volume modal. Pour obtenir un renforcement optimal (20 environ), le volume de la cavité devra être minimisé.
- Modes non-polarisés. Pour l'étude des corrélations EPR dont l'observable est la polarisation des photons, il faut préserver les superpositions cohérentes entre chemins de désexcitation et ne pas effectuer une pré-mesure de la polarisation. Le mode de la cavité doit donc être non-polarisé.

Dans ce contexte, deux géométries de cavité seront étudiées :

- **Les cavités micropiliers avec des miroirs GaAs / AlOx** (voir Figure 2)

Le corps de la cavité optique en GaAs contient en son centre un plan dilué de boîtes quantiques. Il est par fermé deux miroirs interférentiels réalisés à partir d'un empilement périodique alternant des couches de GaAs et d'AlAs (miroirs de Bragg). Cette structure est ensuite gravée pour former un pilier puis oxydée pour transformer les couches d'AlAs en couches d'AlOx.

D'un point de vue technologique, la gravure de ces structures est aisée en raison d'un faible rapport d'aspect (environ 8). Un important effort de mise au point technologique doit toutefois être entrepris pour assurer un contrôle de la rugosité des flancs sur des cavités de diamètre de quelques centaines de nanomètre. Le Laboratoire de Photonique et de Nano structures a déjà entrepris la fabrication de micropiliers avec miroirs de Bragg GaAs/AlOx qui, au stade préliminaire de ces travaux, présentent des facteurs de qualité de l'ordre de 2000 pour des diamètres d'environ 1 micron. Les modes sont cependant polarisés et la qualité optique des cavités de plus petit diamètre n'est pas aujourd'hui satisfaisante.

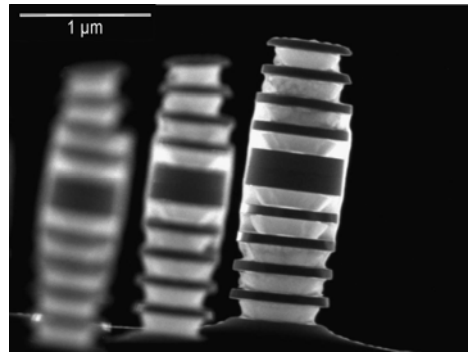


Figure 2 : Cliché obtenu au microscope électronique en transmission de micropiliers GaAs/AlOx

• **Les cavités à cristaux photoniques sur membrane** (voir Figures 3-4)

Les cristaux photoniques bidimensionnels à fort confinement optique vertical sont bien adaptés à la réalisation de microcavités de faible volume. Le fort confinement optique est obtenu verticalement par l'utilisation d'un guide à fort contraste d'indice et latéralement par gravure dans la couche guidante d'une cavité consistant en quelques trous manquant dans un cristal photonique parfait. Ces structures offrent naturellement des volumes de mode très faibles. La fabrication de tels résonateurs à émission spontanée contrôlée a été initiée au Laboratoire de Photonique et de Nano structures l'an passé.

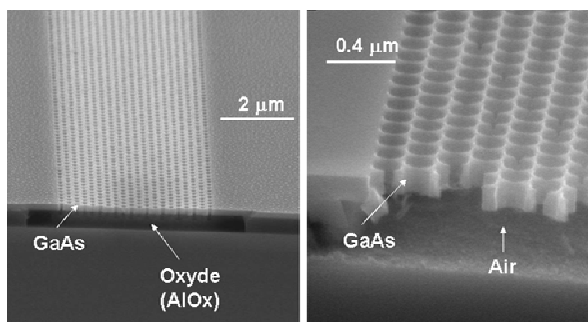


Figure 3 : Confinement vertical obtenu par oxydation (à gauche) ou par formation d'une membrane suspendue (à droite)

Deux approches technologiques complémentaires sont explorées pour assurer le confinement vertical (voir Figure 3). La première exploite la technologie des membranes suspendues. La seconde approche consiste en la fabrication d'une couche guidante de quelques centaines de nanomètres d'épaisseur isolée optiquement du substrat par une couche d'oxyde de faible indice (environ 1.6).

Le confinement latéral est assuré par la gravure de cavités consistant en un trou manquant dans un cristal photonique parfait. Le Laboratoire de Photonique et de

Nano structures a ainsi réalisé des cavités dites « H1 » (un trou dans un cristal photonique à motifs hexagonaux – voir Figure 4) et des cavités dites « S1 » (un trou dans un cristal photonique à motifs carrés).

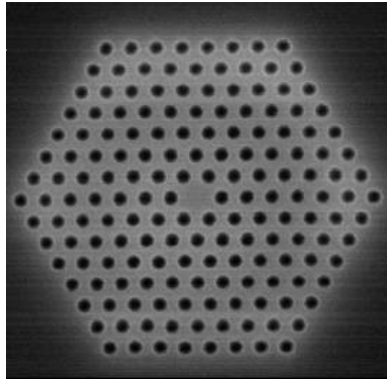


Figure 4 : Confinement latéral obtenu par gravure d'un cristal photonique parfait (ici cavité dite « H1 »)

Spécificités et Nature du sujet de thèse

Ce travail de thèse est principalement expérimental. Il comporte :

- **Un volet technologique pour la fabrication des cavités.**

Mon travail consistera à prolonger les activités de l'équipe d'accueil sur la technologie des micropiliers et des cavités à cristaux photoniques. Une partie importante visera à la fabrication de résonateurs dont les modes sont non-polarisés.

Cet important effort technologique est rendu possible par les infrastructures du Laboratoire de Photonique (salle blanche et moyens lourds d'épitaxie) et par le prolongement d'une collaboration étroite et fructueuse avec les épitaxieurs et technologues du laboratoire.

- **Un volet d'expérimentation optique.**

Mon travail consistera à mettre en place le banc de mesure de corrélations multi-photoniques. La principale difficulté ici tient dans la nécessité de monter des interféromètres stables. Pour cela, je mettrai en place un dispositif d'asservissement laser des interféromètres, pour mener à bien les mesures de corrélations nécessaires à la mise en évidence de la violation des inégalités de Bell.

Objectifs

Les objectifs de ce travail sont multiples. Il conviendra :

- de définir les conditions expérimentales pour l'observation de l'intrication à partir de boîtes quantiques : Ceci comprend une réflexion sur le dessin de la cavité optique (facteur de qualité limité à 500 et faible volume) afin de préciser la géométrie la mieux adaptée (cristaux photoniques ou piliers) mais aussi une étude fine des mécanismes de pertes de cohérence en fonction des conditions expérimentales (conditions d'excitation, température...)
- de prolonger le savoir-faire technologique pour la fabrication des cavités : l'accent sera porté sur la fabrication de cavité de faible volume et dont les modes sont non-polarisés.

- de démontrer l'accélération significative du processus d'émission d'une boîte unique isolée dans ces cavités de faible facteur de qualité et de faible volume. Aujourd'hui, les valeurs records sur les cavités à cristaux photoniques se situent autour de 6 [Englund, Kress] – contre 20 nécessaire ici- et aucune mesure n'a été faite sur des cavités micropiliers GaAs/AlOx; sur les piliers GaAs/AlAs de grand facteur de qualité, des valeurs proches de 25 ont été obtenues par l'équipe d'accueil [Varoutsis].
- de mettre en place le dispositif expérimental (interféromètres multiphotoniques stables) et de démontrer la faisabilité d'une source solide de photons intriqués.

Programme et déroulement du stage et de la thèse

Le stage

Pendant mon stage, je m'initierai aux techniques de micro-luminescence et aux effets d'électrodynamique quantique en cavité. Ce stage sera un premier apprentissage aux techniques expérimentales que j'utiliserai pendant ma thèse et aux effets quantiques que j'exploiterai par la suite. Je participerai à l'installation d'un nouveau banc de micro-luminescence pour la caractérisation des modes optiques de cavités. J'effectuerai ensuite des mesures de facteur de qualité des modes de cavités micro pilier et à cristaux photoniques. J'évaluerai alors les effets d'accélération du processus d'émission dans ces structures.

La thèse

La première année sera consacrée à l'apprentissage des techniques de fabrication des cavités et au développement des cavités optiques nécessaires à l'observation de l'intrication. Ce travail se fera en collaboration étroite avec les technologues et épitaxieurs du laboratoire ainsi qu'avec l'équipe théorique de Philippe Lalanne au LCFIO à Orsay. Parallèlement, je m'initierai aux aspects théoriques des problématiques de mon sujet de thèse (intrication, inégalités de Bell, électrodynamique quantique en cavité...)

Au cours de ma deuxième année, je me focaliserai sur la spectroscopie des boîtes uniques (photoluminescence, photoluminescence en excitation) et sur les mécanismes de déphasage mis en jeu (mesure de largeur de raie par interférométrie). Nous évaluerons ensuite les effets de renforcement des processus d'émission par des mesures de durée de vie.

Au cours de ma troisième année, je poursuivrai l'installation des bancs expérimentaux de corrélation de photons et démontrerai la faisabilité d'une source solide de photons intriqués par des mesures d'inégalités de Bell.

Perspectives professionnelles

La thèse proposée est axée sur deux thèmes principaux, d'un part la technologie et d'autre part l'optique quantique. Chacun de ces thèmes permet d'envisager des horizons professionnels différents et de ce fait, les perspectives sont élargies.

La partie technologique consiste en la réalisation de toutes les structures étudiées par la suite. Toutes les étapes, à l'exception de l'épitaxie, seront faites par mes soins. Cette caractéristique me permettra, à la fin de la thèse, d'être autonome et d'avoir mon propre savoir-faire dans la conception et la réalisation de telles structures. En vue d'une future embauche, que ce soit dans un laboratoire public ou bien privé, cela me semble être un avantage. En effet, dans ces conditions, l'adaptation à un nouvel environnement sera facilitée par ma connaissance de la technologie.

Les perspectives professionnelles de l'optique quantique sont quant à elles plus basées sur le développement des applications utilisant les photons intriqués. Une des applications les plus immédiates est la cryptographie quantique de l'information. Cela permettrait d'envoyer des informations de manière sûre sans qu'elles ne soient décryptées par une tierce personne. L'application la plus aboutie et qui ne reste, pour le moment, qu'une hypothèse est l'ordinateur quantique. Avant de pouvoir obtenir un tel système, certains problèmes tel que la cohérence de grands systèmes doivent être résolus. De telles applications, qui ne sont bien évidemment pas les seules, demandent encore des améliorations technologiques et une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu.

Le fait que l'étude réalisée au cours de cette thèse se fasse à partir de nano-objet apporte des perspectives supplémentaires. Les encouragements financiers nationaux et européens pour certains domaines scientifiques, dont la nano-physique fait parti, sont une preuve de l'intérêt porté à cette discipline. Un des exemples les plus flagrant est la construction du pôle de compétence, à Grenoble, sur les nanosciences (Minatec). Les liens entreprises laboratoires existants au sein de ce pôle montrent aussi l'intérêt que porte les entreprises à ces sujets.

Les perspectives professionnelles, qu'elles s'appuient sur le savoir-faire technologique développé durant la thèse ou bien qu'elles soient axées sur les possibles applications, semblent être nombreuses. Ceci est principalement dû au fait que cette thèse permette d'acquérir une double compétence qui puisse satisfaire aussi bien les laboratoires que les entreprises intéressées par les nano sciences.

Conclusion

Le sujet de thèse proposé par le Laboratoire de Photonique et de Nano structures porte sur la mise en évidence de l'intrication par une boîte quantique à semi-conducteur. Ce sujet de thèse allie à la fois une composante forte en optique quantique et une composante importante en nanotechnologies.

Du point de vue de l'optique quantique, l'obtention de photons intriqués dans le cadre de ce projet devra établir que les boîtes quantiques à semi-conducteur sont des sources fiables et compactes d'objets quantiques intriqués. Ces sources sont des outils indispensables pour passer des expériences de pensée en optique quantique aux expériences réelles en laboratoire. Au-delà de ces aspects fondamentaux, le champ de la physique des états quantiques de la lumière s'est considérablement élargi pour passer, cette fois, des expériences de laboratoire aux « applications » dans le domaine de l'information quantique. La cryptographie quantique est actuellement l'exemple le plus abouti. Une application plus prospective serait la réalisation d'un ordinateur basé sur des fonctionnalités de logique quantique.

Du point de vue des nano structures semi-conductrices, les développements technologiques à entreprendre pour la réalisation de ces nano sources sont de nature générique : fabrication de cavités à cristaux photoniques de haute finesse, localisation des boîtes quantiques... Les retombées applicatives de ces procédés vont au-delà de leur utilisation pour la réalisation de sources à photons intriqués : ils pourront être mis en œuvre dans le développement de nouveaux nano dispositifs photoniques, tels que les nano lasers, l'optique intégrée...

Ces perspectives importantes sont rendues possible grâce à l'expérience de l'équipe d'accueil en optique quantique, l'expérience du laboratoire sur les nano structures à semi-conducteurs et les infrastructures technologiques dont le laboratoire dispose pour l'élaboration de ces nano structures. Ce projet présente un caractère « interactif » impliquant plusieurs équipes du laboratoire et une grande diversité de compétences. Le système matériel nécessaire à cette étude, à savoir les boîtes quantiques à semi-conducteur isolées dans des microcavités optiques, sera réalisé en étroite collaboration avec les équipes du laboratoire dédiées aux matériaux et à la technologie. Ce projet bénéficiera donc du savoir-faire tant technologique que physique développé ces dernières années au Laboratoire de Photonique et de Nano structure.

Grâce aux thématiques abordées et à l'environnement scientifique et technique proposé, ce travail de thèse me permettra non seulement d'approfondir mes connaissances en physique quantique et nanotechnologies mais aussi de m'initier aux techniques expérimentales en optique quantique. Il m'offre un apprentissage riche et motivant au travail de recherche.

Bibliographie commentée

Ouvrages imprimés

Chapitre dans un ouvrage imprimé

Rapports imprimés

Travaux universitaires

Articles de périodiques imprimés

- [Aspect] A. Aspect, Ph. Grangier and G. Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, Phys. Rev. Lett. **47**, 460-463 (1981)

Ce papier fondateur présente pour la première fois la violation des inégalités de Bell. Pour leur expérience, l'équipe utilise une source de photons corrélés en polarisation grâce à une cascade dans les atomes de calcium. Après de nombreuses années de controverse sur le formalisme quantique (notamment des débats homériques entre Bohr et Einstein de la fin des années 1920 jusqu'à la disparition des protagonistes au début des années 1950), cette expérience a mis tout le monde d'accord : l'intrication existe.

- [Englund] Dirk Englund, David Fattal, Edo Waks, Glenn Solomon, Bingyang Zhang, Toshihiro Nakaoka, Yasuhiko Arakawa, Yoshihisa Yamamoto, and Jelena Vuckovic, *Controlling the Spontaneous Emission Rate of Single Quantum Dots in a 2D Photonic Crystal*, quant-ph/0501091 (2005)

Ce papier est une des premières observations d'une accélération et d'un ralentissement du processus d'émission d'une boîte quantique unique isolée dans une cavité à cristal photonique. Les auteurs observent une accélération de 20 % de la dynamique d'émission pour des boîtes en résonance et un ralentissement d'un facteur 5 pour les boîtes non couplées au mode de la cavité.

- [Franson] J.D. Franson, *Bell Inequality for Position and Time*, Phys. Rev. Lett. **62**, 2205 (1989)

Ce papier théorique propose un schéma d'intrication donnant lieu à des corrélations EPR entre des observables autres que la polarisation. Dans ce cas, l'observable pertinente est l'instant d'émission des photons : l'expérience serait menée sur des paires de photons dont les membres sont émis "à deux instants différents".

- [Gérard] J. M. Gérard, B. Sermage, B. Gayral, B. Legrand, E. Costard, and V. Thierry-Mieg, *Enhanced Spontaneous Emission by Quantum Boxes in a Monolithic Optical Microcavity*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1110 (1998)

Ce papier rapporte la première observation d'une accélération du processus d'émission d'un ensemble de boîtes quantiques grâce au couplage de ces nano-émetteurs au mode d'une cavité micropilier. Le renforcement observé atteint la valeur de 5.

- [Kress] A. Kress, F. Hofbauer, N. Reinlt, H.J Krener, R. Meyr, G. Böhm, and J. Finley, *Manipulation of the Spontaneous Emission Dynamics of Quantum Dots in 2D Photonic Crystals*, quant-ph/0501013 (2005)

Ce papier est une des premières observations d'une accélération et d'un ralentissement du processus d'émission d'une boîte quantique unique isolée dans une cavité à cristal photonique. Les auteurs observent une accélération d'un facteur 6 de la dynamique d'émission pour des boîtes en résonance et un ralentissement d'un facteur 2 pour les boîtes non couplées au mode de la cavité.

- [Moreau1] E. Moreau, I. Robert, J.M. Gérard, I. Abram, L. Manin and V. Thierry-Mieg, *Single-mode solid-state single photon source based on isolated QDs in pillar microcavities*, Appl. Phys. Lett. **79**, 2865-2867 (2001)

Il s'agit de la première démonstration de génération de photons uniques polarisés par des boîtes quantiques uniques insérées dans des cavités optiques. Les boîtes quantiques uniques, nano-émetteurs de lumière, présentent des états électroniques distincts et discrets. En excitant un seul état électronique de la boîte, la boîte est susceptible d'émettre un seul photon à la fois. La préparation des photons dans un mode de polarisation donnée est obtenue par couplage de la boîte quantique avec le mode polarisée d'une microcavité optique.

- [Moreau2] E. Moreau, I. Robert, L. Manin, V. Thierry-Mieg, J.M. Gérard and I. Abram, *Quantum cascade of photons in semiconductor quantum dots*, Phys. Rev. Lett. **87**, 183601 (2001)

Il s'agit de la première démonstration de génération de paires de photons séquentiels par des boîtes quantiques uniques. Les boîtes quantiques uniques, nano-émetteurs de lumière, présentent des états électroniques distincts et discrets. En excitant uniquement deux états électroniques de la boîte, la boîte est susceptible d'émettre deux photons en cascade.

- [Tapster] P.R.Tapster, J.G. Rarity, and P. C. M. Owens, *Violation of Bell's Inequality over 4 km of Optical Fiber*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1923 (1994)

Il s'agit là d'une des premières mesures de la violation des inégalités de Bell dans laquelle l'observable est l'énergie des photons. Ce papier met en évidence que ces corrélations subsistent même sur des temps longs (ici les photons parcourent 4.3 km de fibres optiques). Les deux interféromètres utilisés pour démontrer la violation des inégalités de Bell sont séparés de quelques mètres. La source utilisée est ici un cristal paramétrique.

- [Tittel] W. Tittel, J. Brendel, T. Herzog, H. Zbinden and N. Gisin, *Non-local two-photon correlations using interferometers physically separated by 35 meters*, Europhys. Lett. **40**, 595 (1997)

Il s'agit là d'une des premières mesures de la violation des inégalités de Bell dans laquelle l'observable est l'énergie des photons. Ce papier met en évidence que ces corrélations subsistent même à grande distance. Les deux interféromètres utilisés pour démontrer la violation des inégalités de Bell sont séparés de 35 mètres. La source utilisée est ici un cristal paramétrique.

- [Varoutsis] S. Varoutsis, S. Laurent, A. Lemaître, I. Sagnes, I. Robert-Philip, and I. Abram, *Restoration of photon indistinguishability in the emission of a semiconductor quantum dot*, Soumis à Phys. Rev. Lett.

Ce papier montre qu'une boîte quantique unique peut émettre des photons uniques indiscernables. Il faut pour cela que la boîte émette les photons avant que les processus de déphasage effacent la cohérence entre photons. C'est pourquoi la boîte est insérée dans une cavité optique qui accélère le processus d'émission de sorte que les mécanismes de perte de cohérence n'ont pas le temps d'agir.

Articles de périodiques électroniques

Communication dans un congrès

Sites web consultés

Annexes

- **Annexe 1 : commentaires sur l'article Phys. Rev. Lett. 47, 460 (1981) :**

[Aspect] A. Aspect, Ph. Grangier and G. Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, Phys. Rev. Lett. **47**, 460-463 (1981)

- **Annexe 2 : commentaires sur l'article Phys. Rev. Lett. 62, 2205 (1989) :**

[Franson] J.D. Franson, *Bell Inequality for Position and Time*, Phys. Rev. Lett. **62**, 2205 (1989)

Annexe 1 : Phys. Rev. Lett. 47, 460-463 (1981)

Article commenté : A. Aspect, Ph. Grangier and G. Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, Phys. Rev. Lett. **47**, 460-463 (1981)

Jusque là, trois expériences avaient été réalisées et aucune d'elles n'avaient apporté une preuve indiscutable de la violation des inégalités de Bell. Sur chacune d'elles, le signal était particulièrement faible. Il fallait donc attendre quelques centaines d'heures avant d'avoir une précision statistique convenable. Sur une telle durée, la stabilité de la source ne devait pas être suffisante.

Les auteurs de cet article ont donc du développé une source de photons corrélés, de hautes efficacité et très stable. Dans cette optique, ils ont utilisé une excitation sélective à deux photons de la cascade radiative $4p^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s\ 4p^1\ P_1 \rightarrow 4s^2\ ^1S_0$ du calcium (isotope 40). Ce choix particulier n'est pas anodin. La lumière émise par une source est collectée dans un angle fini, aussi grand que possible, par un dispositif optique. Il se trouve que le contraste reste maximum jusqu'à un certain angle. Cet angle atteint un maximum ($\sim 30^\circ$) pour les alcalino-terreux sans structure hyperfine. L'excitation sélective du niveau $4p^2\ ^1S_0$ est réalisée à partir de deux lasers monomodes réglés exactement à résonance pour le processus d'excitation à deux photons. L'un est un laser à krypton ($\lambda_K=406\text{ nm}$) et l'autre est accordable ($\lambda_D=581\text{ nm}$). Le second avantage de cette cascade radiative vient du fait que le temps de vie du niveau intermédiaire est très court ($\sim 5\text{ ns}$), il est donc possible d'avoir un rapport signal sur bruit optimal. Afin de s'assurer de la stabilité de la source, un système d'asservissement contrôlait la longueur d'onde des lasers. De cette façon, le temps d'acquisition atteint est d'une centaine de seconde pour une précision statistique de 1%.

Les inégalités de Bell adaptés au cas des polariseurs à une voie sont données par la relation suivante :

$$-1 \leq S' \leq 0$$

Un test direct donne $S'_{\text{exp}} = 0,126 \pm 0,014$. Ce résultat viole les inégalités par 9 écarts type, il est en bon accord avec les prédictions quantiques prenant en compte l'efficacité finie des polariseurs et l'ouverture des lentilles : $S'_{QM} = 0,118 \pm 0,005$.

L'accord entre les données expérimentales et les prédictions de la mécanique quantique a pu être vérifié pour un intervalle de 360° et avec des polariseurs éloignés de 6,5 m de la source.

Cette expérience a donc permis de faire accepter le principe de la violation des inégalités de Bell ainsi que celui de l'intrication des photons.

Avec des polariseurs à une voie, les mesures de polarisation ne font pas la différence entre un photon manqué par le détecteur et un photon arrêté par le polariseur. Il faut donc utiliser des raisonnements prenant en compte des hypothèses supplémentaires ainsi que des expériences auxiliaires afin de pouvoir réaliser un test sur les inégalités de Bell avec des polariseurs à une voie. La même équipe a par la suite réalisé une expérience similaire mais cette fois avec des polariseurs à deux voies pour s'affranchir de certaines hypothèses sur les détecteurs. Les résultats aboutissent aux mêmes conclusions.

Annexe 2 : Phys. Rev. Lett. 62, 2205 (1989)

Article commenté : J.D. Franson, *Bell Inequality for Position and Time*, Phys. Rev. Lett. **62**, 2205 (1989)

Il s'agit de la proposition d'une expérience afin de vérifier d'une manière différente la violation des inégalités de Bell. En effet, les expériences réalisées auparavant ne mettaient en évidence que les incohérences entre les théories des variables locales cachées et les corrélations entre les spins ou les polarisations de deux particules éloignées.

Le protocole proposé par J.D. Franson devrait permettre une nouvelle approche des inégalités de Bell. Selon ce papier, la violation des inégalités de Bell pourrait dépendre des interférences entre les amplitudes de probabilités pour une paire de photon d'avoir été émis à des instants différents par un atome excité.

Les résultats montrent que la relation d'incertitude de la mécanique quantique associée à un paquet d'onde est incompatible avec n'importe quel théorie des variables locales cachée. La date d'émission ne peut pas être déterminée de manière exacte par une variable cachée. Il en est de même pour la position des photons. L'étape suivante dans le développement de cette expérience concerne l'augmentation de la différence de chemin optique qui devrait dépasser la longueur de cohérence.