

Entretien avec Sara Ducci, experte en photonique quantique

par **Michèle Leduc** (michele.leduc@lkb.ens.fr),
Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

Michèle Leduc. Merci, Sara, pour cet entretien destiné aux lecteurs de *Reflets de la Physique* dans le cadre de l'Année internationale des sciences et technologies quantiques.

Tu es née en Italie et tes premiers travaux de recherche t'ont conduite à une thèse en optique non linéaire que tu as soutenue à l'Université de Florence en 2000. Peux-tu retracer ce qui t'a fait opter pour la recherche en physique ? C'est une voie qui est toujours assez peu empruntée par les jeunes filles. Un professeur convaincant peut-être, un héritage culturel de ta famille, une attirance pour un dépassement personnel, ou une tout autre raison ?

Sara Ducci. Dès les débuts de mes études à l'école primaire, j'étais vraiment attirée par tout ce qui était mathématiques et sciences. Faire mes devoirs dans ces matières-là était un plaisir et j'allais très vite. Au contraire, rédiger des dissertations ou me pencher sur des matières plus littéraires était plutôt une corvée. Je me souviens que l'ambiance à la maison était assez studieuse parce que mon père était professeur de littérature italienne et de latin au lycée. Ma mère avait fait des études de maths et je pense que je tiens d'elle cette passion pour les sciences et aussi pour la science-fiction pendant mes moments de temps libre. Quand j'étais au lycée, j'ai eu la même professeure en physique et en maths. Elle a lancé, lors de ma première année au lycée, une classe pilote en physique expérimentale consistant à modéliser des phénomènes, puis à tester le modèle par des mesures. Elle m'a beaucoup encouragée à aller vers la physique, que je trouvais être le bon équilibre entre l'abstraction des mathématiques et le côté un peu trop appliqué à mon goût de l'ingénierie. J'étais très attirée par cette science qui permet d'expliquer les phénomènes qui nous entourent. Et la science-fiction m'a permis de me projeter dans des technologies qui n'existent pas encore et d'imaginer dans quel sens elles feraient évoluer la société.

ML. Ton sujet de thèse portait sur la formation de structures spatiales dans un système optique non-linéaire. Ensuite tu as laissé de côté les sujets d'optique classique pour t'orienter vers la physique quantique, mais tu es restée fidèle à l'instrumentation optique. D'où te vient cette attirance pour l'optique, pour la lumière et pour les couleurs ? Est-ce qu'il y a un rapport avec les arts qui sont si présents en Italie ?

SD. En effet, mon attirance pour la lumière et les couleurs est vraiment avérée. Elle a un lien avec l'environnement dans lequel j'ai vécu. J'ai visité beaucoup de musées et de sites artistiques avec mon père et puis j'ai vécu au milieu des paysages lumineux et très colorés de la Toscane. Et mon premier stage à l'université s'est déroulé dans un laboratoire qui étudiait des pigments de couleur pour restaurer les fresques d'une chapelle à Florence. Il y avait pour moi un lien entre sciences et arts qui m'attirait.

Puis, quand je suis allée visiter des laboratoires pour choisir un sujet de thèse en Italie, j'ai été attirée à l'Institut National d'Optique par la richesse des couleurs des lasers sur les tables de manip couvertes d'instruments d'optique. Surtout, j'ai réalisé qu'on pouvait avec l'optique approfondir un vaste ensemble de phénomènes, car c'est le même type d'équations qui régissent la formation de structures comme les systèmes granulaires, les liquides en convection ou la formation des étoiles et des galaxies. Travailler avec des faisceaux de lumière colorés, du bleu, du vert qui éclairaient cette table de manip dans le noir a donné la couleur qui manquait à cette salle d'expérience.

ML. Comment ta vocation pour la physique quantique est-elle née ? J'ai souvenir de ton passage comme post-doctorante dans l'équipe de Claude Fabre au Laboratoire Kastler Brossel (LKB) à l'École normale supérieure. Qu'est-



Mon attirance pour la lumière et les couleurs [...] a un lien avec l'environnement dans lequel j'ai vécu. J'ai visité beaucoup de musées et de sites artistiques avec mon père et puis j'ai vécu au milieu des paysages lumineux et très colorés de la Toscane.



© Olivier Ezratty

Sara Ducci est professeure à l'Université Paris Cité et mène ses recherches au laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques. Avant son recrutement à l'université, elle a effectué une thèse de doctorat à l'Université

de Florence sur la formation de structures spatiales dans un milieu optique non-linéaire, puis un postdoc en optique quantique au Laboratoire Kastler Brossel et elle a enseigné en tant que ATER à l'ENS Cachan. Aujourd'hui, elle dirige une équipe de recherche axée sur la photonique intégrée dans des matériaux semi-conducteurs pour le domaine de l'information quantique et elle participe à plusieurs projets européens et nationaux. Elle est *Optica Fellow*, membre honoraire de l'Institut Universitaire de France, récipiendaire du prix Louis Ancel de la Société Française de Physique et du prix de la Fondation iXcore - iXlife - iXblue pour la recherche.



ce qui t'a passionnée dans le sujet qui t'a été confié ? Peux-tu décrire en quoi consistaient ces études sur la distribution transverse de la lumière ? Et comment elles t'ont menée à ton domaine de recherche actuel ?

SD. Le sujet m'a intéressée parce qu'il y avait un point commun avec les manipulations d'optique que j'aimais faire (alignement de cavités, réglages des lasers, etc.), mais j'ai aussi été attirée par l'optique quantique, un domaine complètement nouveau pour moi. De plus, j'ai tout de suite aimé l'ambiance du LKB, en particulier grâce à la dynamique créée par le groupe de doctorants et de postdocs. C'était très enrichissant pour moi d'un point de vue scientifique mais aussi culturel. Nous partagions des passions pour l'opéra, le ballet, les concerts, les sorties au Quartier latin. Cette immersion dans la vie parisienne m'a donné envie de rester en France, envie qui s'est consolidée quand j'ai rencontré le physicien qui est ensuite devenu mon mari.

Au LKB j'ai étudié les corrélations spatiales entre paires de photons générées quand un laser éclaire un cristal non-linéaire inséré entre deux miroirs. D'abord l'enjeu était de montrer que ces corrélations existaient vraiment avec des détecteurs sensibles à de très petits flux de lumière. Ensuite il y avait la perspective de les utiliser dans des applications qui étaient très intéressantes, par exemple pour des mesures de précision. Et c'est ainsi que j'ai fait cette transition de l'optique classique à l'optique quantique.

ML. Maintenant tu es professeure au laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (MPQ) et tu as vu la création de l'Université Paris Diderot, maintenant intégrée à Université Paris Cité. Je sais que tu es impliquée dans les festivités qui marquent l'anniversaire cette année de la création du laboratoire MPQ ainsi que des deux autres laboratoires qui ont été créés en même temps. Peux-tu rappeler comment tu as été attirée vers cette aventure ?

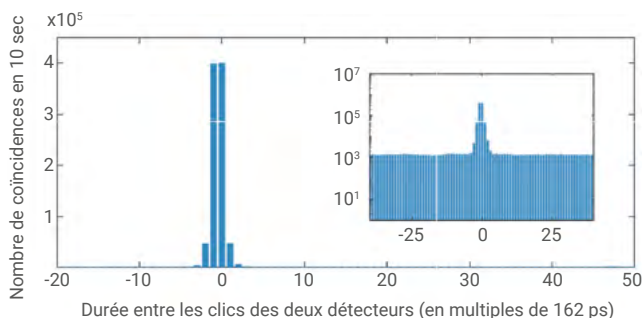
SD. Quand j'ai posé ma candidature, le directeur de l'époque, Vincent Berger, m'a bien expliqué que la particularité de son laboratoire était de développer les connaissances de la physique quantique pour les appliquer à des recherches sur les matériaux et aboutir à des dispositifs. Cela ouvrait la possibilité de générer et de contrôler des états quantiques de la lumière avec des systèmes originaux dessinés et conçus par nous-mêmes. En attendant la construction du laboratoire MPQ, notre équipe s'est installée dans les locaux du laboratoire de recherche de Thales à Orsay. J'y ai bénéficié de l'interaction avec leurs ingénieurs pour comprendre comment concevoir la fabrication de dispositifs. Plusieurs propositions avaient été faites à l'époque pour faire de la conversion de fréquence optique avec des matériaux semi-conducteurs. Il a fallu d'abord le réaliser dans un régime classique, pour ensuite passer au régime quantique, donc générer les photons deux par deux. Et c'est là que j'ai lancé ma ligne de recherche portant sur la génération et le contrôle d'états quantiques de la lumière

>>>



a

b

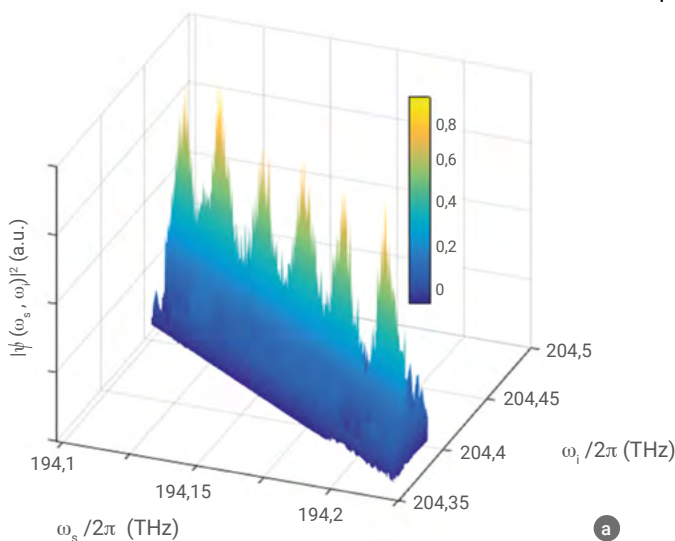


1. (a) Représentation d'une source AlGaAs de photons intriqués. L'alternance de couches de compositions différentes permet le guidage du faisceau laser injecté et des paires de photons générées au sein du dispositif.

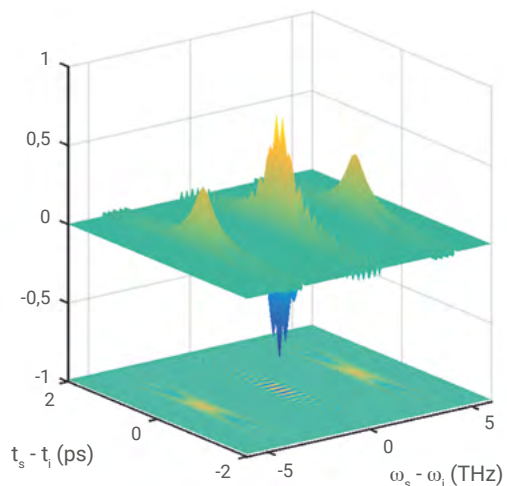
(b) Histogramme des coïncidences temporelles mesurées entre les clics des 2 détecteurs, démontrant l'émission de photons par paires. Le taux de génération typique est de 10^6 - 10^7 paires par seconde et par milliwatt de puissance de pompe.

2. (a) Intensité spectrale jointe de l'état à deux photons émis par les guides d'onde AlGaAs : la partie spectrale de la fonction d'onde a la forme d'un peigne de fréquence grâce à la réflexion sur les facettes des photons générés à l'intérieur. Ce type d'état est intéressant pour le calcul quantique grâce à sa robustesse vis-à-vis des perturbations.

(b) Représentation à travers la fonction de Wigner d'un état type chat de Schrödinger à deux photons dans l'espace qui représente la différence de fréquences en fonction de la différence entre leurs instants d'arrivée. Les franges d'interférence visibles au centre témoignent de la cohérence de l'état et la négativité des valeurs sur l'axe vertical de la présence d'intrication.



a



b

L'équipe de Sara Ducci développe des dispositifs photoniques à base d'AlGaAs pour générer et manipuler des états quantiques de la lumière. Cette plateforme présente une grande maturité technologique et permet de fabriquer dans une même puce des composants actifs (lasers, modulateurs) et passifs (séparateurs de faisceau, interféromètres...) tout en travaillant à température ambiante, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour les applications. Le processus physique utilisé est la génération paramétrique spontanée dans laquelle les photons d'un laser en interaction avec le dispositif produisent des paires de photons (de fréquences respectives ω_s et ω_l) qui se partagent l'énergie et l'impulsion du photon initial. L'émission des photons par paires est observée grâce à l'utilisation de détecteurs très sensibles, en mesurant le signal de corrélation temporelle entre les instants d'arrivée des photons.

L'état quantique produit peut être contrôlé avec grande précision et plusieurs degrés de liberté peuvent être utilisés pour générer de l'intrication : la polarisation, le mode spatial, la fréquence, l'énergie-temps.

Cette ingénierie de la fonction d'onde permet de préparer des états qui peuvent être utilisés dans plusieurs applications, de la métrologie aux simulations et calcul quantiques.

Une propriété intéressante de ces dispositifs est qu'ils produisent directement des photons intriqués en polarisation sur une large bande spectrale aux longueurs d'onde des télécommunications. Cela permet d'implémenter des protocoles multi-utilisateurs de distribution d'intrication pour les communications quantiques en s'appuyant sur l'infrastructure fibrée déployée par les opérateurs télécom et les composants standard pour le traitement du signal. Un lien fibré entre les 2 campus de l'Université Paris Cité et de Sorbonne Université est actuellement en cours de test pour l'utilisation de ces dispositifs innovants dans les protocoles de cryptographie quantique ; il fait partie d'un réseau dédié au déploiement de communications quantiques en Ile-de-France, projet soutenu dans le cadre du PEPR QuCommTestBed.

>>>

dans des puces photoniques miniaturisées. D'un côté nous avons commencé à caractériser les propriétés des paires de photons produites, et de l'autre à développer des dispositifs originaux, par exemple intégrant de façon monolithique un laser et le processus de conversion de fréquence.

ML. Maintenant tu diriges tout un groupe qui allie l'optique et les matériaux. Quelle a été la part d'initiative que tu as prise au démarrage ? Et comment s'est développée ton équipe ?

SD. J'ai apporté l'idée d'adopter les méthodes de l'optique quantique. À l'inverse, j'ai bénéficié du socle de connaissances de mes partenaires sur les matériaux, les dispositifs et la fabrication, où je n'avais pas d'expertise. Vincent Berger a inclus mon équipe dans un projet européen, ce qui nous a permis de collaborer avec des groupes de pointe comme celui de Nicolas Gisin à Genève. Ainsi nous avons eu accès aux tout premiers détecteurs de photons uniques pour démontrer que nos dispositifs d'optique quantique intégrés fonctionnaient.

ML. Comment sont élaborés vos dispositifs ? Où faites-vous croître vos matériaux ?

SD. Au démarrage, dans la salle blanche de Thales. Depuis notre installation dans nos nouveaux locaux, nous collaborons beaucoup avec le Centre de Nanosciences et de Nanotechnologie (C2N) où des ingénieurs nous aident pour la fabrication des dispositifs que nos doctorants et postdoctorants terminent. Nous avons ainsi la possibilité de suivre toute la chaîne : la conception, la fabrication, les mesures en interaction avec les théoriciens, jusqu'à l'utilisation des dispositifs dans des infrastructures.

ML. Peux-tu résumer la thématique développée par ton équipe ?

SD. Elle s'organise autour de trois axes de recherche.

Le premier est la mise au point de nouveaux dispositifs pour générer et manipuler des états quantiques de la lumière à petit nombre de photons, en particulier pour des paires de photons. Nous avons créé nos propres codes pour simuler les champs électromagnétiques à l'intérieur des dispositifs. Nous avons aussi développé des collaborations avec des entreprises comme ST Microelectronics, leader de la fabrication de composants au silicium, avec qui nous fabriquons des systèmes hybrides à base d'arséniure de gallium et d'aluminium sur silicium.

Le deuxième axe est la physique fondamentale. Nous explorons divers types d'états quantiques pour comprendre leur intérêt et leur robustesse pour le calcul ou la métrologie quantique et nous nous questionnons sur les propriétés des photons sur lesquelles il faut s'appuyer pour générer l'intrication. Nous collaborons principalement avec les théoriciens de notre équipe, Perola Milman et Arne Keller,

mais nous avons eu aussi des collaborateurs à l'étranger, comme Marco Liscidini en Italie ou John Sipe au Canada. Ensemble nous développons des outils de caractérisation de ces états quantiques de la lumière et imaginons des protocoles pour des applications.

Le troisième est l'utilisation de ces dispositifs dans des infrastructures comme les communications quantiques, par exemple pour la distribution quantique de clés en cryptographie. Nous collaborons avec l'équipe d'Eleni Diamanti pour la démonstration de protocoles cryptographiques et avec Nokia Bell Labs pour les architectures en télécommunication.

L'équipe de photonique quantique intégrée est l'une des trois qui composent le groupe Information Quantique et Technologies de MPQ (les deux autres équipes sont orientées respectivement vers la théorie et vers les ions piégés). Elle comprend deux maîtres de conférence, Florent Baboux et Maria Amanti, et un ingénieur de recherche, Marco Ravaro, ainsi qu'une dizaine de non-permanents, stagiaires de master, doctorants et postdoctorants.

ML. Le phénomène d'intrication en physique quantique est au fondement de ce qu'on appelle la seconde révolution quantique d'aujourd'hui. Peux-tu expliquer comment tu l'as exploité pour tes travaux en optique quantique et préciser quels sont les débouchés applicatifs que tu envisages ?

SD. L'intrication repose sur des propriétés de corrélation, par exemple entre deux particules, qu'on ne retrouve pas dans le monde classique. Quand deux particules sont intriquées, la mesure sur l'une des deux nous renseigne immédiatement sur l'état de sa jumelle, quelle que soit la distance qui les sépare. Cette propriété étonnante a d'abord généré des débats entre les pères fondateurs de la mécanique quantique, en particulier entre Einstein et Bohr. Ensuite la question de son existence est passée dans le camp des expérimentateurs ; c'est ce qui a mené au prix Nobel de physique d'Alain Aspect en 2022. Aujourd'hui nous sommes dans la phase de miniaturisation des dispositifs qui en découlent, ce qui permet de générer de l'intrication et de l'exploiter pour tous les domaines des technologies quantiques : le calcul, les communications, la métrologie, les simulations.

Dans mon équipe nous avons l'avantage d'exploiter une plateforme matérielle qui permet de travailler à température ambiante et d'émettre des photons à la longueur d'onde des télécommunications. Nous sommes ainsi à la charnière entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée. Nous participons à la fois à un projet national et à un projet européen qui portent sur les développements d'infrastructures pour les communications quantiques, incluant les dispositifs et les protocoles. Un réseau fibré relie notre laboratoire aux campus de Jussieu, de Saclay et de Palaiseau pour transporter à distance les photons intriqués que nous générons. Nous testons tous ensemble les protocoles de la cryptographie quantique.

>>>

>>>

ML. Mais pour la cryptographie quantique il semble que le domaine applicatif soit limité à des distances assez courtes, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, de par l'atténuation des signaux lumineux liée aux pertes dans les fibres optiques ?

SD. Les limites sont repoussées à quelques centaines de kilomètres grâce à des sources plus brillantes et des détecteurs plus efficaces. À côté de la communication, nos travaux se positionnent aussi pour le calcul quantique, qui repose un peu sur les mêmes propriétés quantiques. Par exemple, nous nous intéressons à des états multimodes en fréquence où l'état du photon n'est pas encodé sur une fréquence unique mais sur un peigne de fréquences, ce qui rend l'état plus robuste vis-à-vis de possibles perturbations. D'autres applications de nos travaux théoriques intéressent la métrologie : la forme et la symétrie de la fonction d'onde utilisée pour effectuer des mesures ont un impact très grand sur la précision et sur leur robustesse vis-à-vis des imperfections des systèmes. Nous avons prouvé ces concepts expérimentalement dans le cadre de mesures de variations très petites d'instants d'arrivée de deux photons corrélés. De même pour les simulations quantiques, où l'on peut élaborer des circuits photoniques à base de plusieurs guides d'onde où les photons interfèrent lors de la propagation. Et la capacité de contrôle que nous avons aujourd'hui sur les états quantiques produits permet de manipuler les statistiques d'échange des paires de photons : les photons ainsi générés envoyés sur les deux entrées d'un séparateur 50/50 peuvent ainsi sortir soit du même port (en se comportant comme des bosons) soit de ports différents (en simulant donc le comportement de fermions).

ML. Puisque tu mentionnes la transmission des connaissances de ton équipe à d'autres domaines, pourrais-tu nous parler de ton goût pour l'enseignement ? Tu as une grande expérience dans l'enseignement, depuis ton poste d'ATER au début de ta carrière à l'ENS de Cachan après ta thèse, jusqu'à celui de professeure d'université aujourd'hui. Peux-tu commenter ce que t'apportent ces activités d'enseignante ?

SD. Quand je suis arrivée au laboratoire, j'ai été chargée de créer un master avec une formation originale autour des dispositifs quantiques. Nous avons créé un réseau d'intervenants au niveau de l'Ile-de-France pour proposer aux étudiants une variété de débouchés dans la recherche académique et en milieu industriel. J'aime ma carrière d'enseignante-chercheuse parce qu'enseigner me pousse toujours à me renouveler. Au niveau licence je dois trouver des nouveaux outils pour intéresser des étudiants aux profils variés, tandis qu'au niveau master je dois me tenir au courant des nouveautés en recherche. Dans le laboratoire nous avons à cœur de former les étudiant-es par la recherche et un des atouts ici à Paris Cité est la plateforme expérimentale en nanosciences pour former les étudiants

et les étudiantes à la fabrication de dispositifs en salle blanche et à leur caractérisation avec des équipements utilisés dans les laboratoires de recherche dans le domaine de la nanoélectronique et de la micronanophotonique, ou des techniques de microscopie en champ proche. Cette année, nous allons étendre notre offre avec une nouvelle salle de projets en technologies quantiques, grâce aux fonds reçus dans le cadre du projet national QuanTedu France.

ML. Pour finir, une dernière question : as-tu rencontré des difficultés en tant que femme ayant des responsabilités dans la recherche, que ce soit dans ton équipe de recherche au MPQ ou dans les différents postes à responsabilité que tu as occupés et qu'on n'a pas détaillés ici dans l'administration de la recherche ? Considères-tu avoir un rôle modèle à jouer auprès des jeunes pour faire avancer la cause des femmes en science ?

SD. Tout le monde rencontre des difficultés dans sa carrière, mais je ne crois pas en avoir rencontrées en particulier en tant que femme. Je pense par contre qu'il faut faire attention à comment on exerce les responsabilités ; par exemple dans mon expérience de présidente du conseil scientifique du département de physique à l'université, mon objectif était d'arriver à prendre des décisions sur des critères transparents basées sur des réflexions collectives en essayant de prendre en compte tous les éléments pertinents et non pas de prendre des décisions en imposant mon autorité.

Pour ce qui concerne mon rôle modèle en tant que femme de science, j'y réponds toujours favorablement quand je suis sollicitée par des classes de lycéennes, ou dans les rencontres entre permanentes et doctorantes au laboratoire. Le problème est qu'il y a trop peu de jeunes femmes qui se dirigent vers les disciplines comme les maths et la physique. D'une part parce qu'elles ont des choix de carrière à faire trop tôt dès le lycée, d'autre part parce qu'elles sont victimes des préjugés et des stéréotypes qui persistent sur les sciences dites exactes.

Je dois dire que de mon côté, probablement grâce à l'éducation que j'ai eue dans ma famille, ma motivation a toujours été d'aller vers ce qui m'intéresse le plus, de suivre ma passion pour un sujet sans me demander s'il convient pour une femme ou pour un homme. Je pense que, pour que les jeunes femmes puissent faire un tel choix, il faut qu'elles connaissent la multiplicité des possibilités qui s'offrent à elles, qu'elles parlent avec nous les chercheuses, qu'elles voient que tout est faisable et qu'il ne faut pas avoir peur.

ML Voici une bonne conclusion pour cet entretien et merci, Sara Ducci, d'avoir partagé avec les lecteurs de *Reflets de la Physique* ton enthousiasme pour la physique quantique et ta vision de la recherche. ■