GEMaC
Groupe d'Étude de la Matière Condensée

GÉNÉRATION DE PHOTONS INDISCERNABLES PAR CONTRÔLE LASER RÉSONANT DE DÉFAUTS DANS UN MATÉRIAU 2D

Des physiciennes et physiciens ont contrôlé l'état quantique d'un défaut cristallin créé artificiellement dans un matériau au moyen d'un laser résonant. Cette approche leur a permis de générer des photons indiscernables, briques de base de l'information quantique optique. Ces travaux ont fait l'objet d'un fait marquant CNRS Physique.

Le nitrure de bore hexagonal (hBN) est un cristal transparent un peu particulier. Il fait partie de la famille des matériaux dits de van der Waals, dont les couches atomiques sont faiblement liées entre elles. Ces feuillets peuvent être manipulés, déplacés et empilés au moyen de techniques dédiées. Ce matériau peut ainsi être utilisé pour la réalisation de dispositifs complexes, avec une maîtrise de l'épaisseur jusqu'à la monocouche atomique. Il peut également être combiné à d'autres matériaux qui n'ont

pas nécessairement la même maille cristalline. Cette souplesse le distingue des semi-conducteurs plus traditionnels tels que le silicium, le diamant et l'arséniure de gallium. Au cours de ses études antérieures, une équipe du Groupe d'étude de la matière condensée (GEMaC) a mis en place une technique permettant de générer des défauts cristallins ponctuels à la demande dans le hBN, au moyen d'un faisceau d'électrons. Ces défauts, appelés centres colorés, se comportent comme des atomes artificiels et peuvent émettre des photons uniques, une brique de base de l'information quantique.

Néanmoins, pour réaliser un processeur quantique efficace, il faut ensuite que le centre coloré émette des photons parfaitement indiscernables les uns des autres, c'est-à-dire similaires en longueur d'onde, en polarisation, et en tout autre propriété qu'ils possèdent. Souvent, la génération de photons s'effectue en excitant le centre coloré au moyen d'un laser de longueur d'onde plus courte que l'émission des défauts. Cette technique perturbe malheureusement l'environnement, et par conséquent dégrade la qualité des photons, qui alors ne peuvent plus être utilisés pour des applications exigeantes comme les protocoles d'information quantique. Un meilleur moyen pour piloter le centre coloré est de lui amener la lumière d'un laser ayant exactement la même longueur d'onde que les photons qu'il émet. Avec cette technique, appelée « fluorescence de résonance », on génère des photons uniques de qualité optimale car perturbant le moins possible l' environnement cristallin, au prix néanmoins d'une observation des photons émis beaucoup plus difficile : ils sont en effet noyés dans la lumière du laser inévitablement collectée en même temps, qui ne peut pas être simplement séparée par des filtres optiques.

Dans un article récent, l'équipe du GEMaC utilisé astucieusement la polarisation de la lumière – c'est-à-dire la direction de vibration de l'onde lumineuse – pour parvenir à cette séparation. Les photons uniques ont une polarisation fixée par la structure microscopique du centre coloré, alors que celle du laser peut être choisie par les expérimentateurs. En fixant la polarisation du laser à une direction un peu différente de celle du centre coloré, on peut alors séparer les photons uniques de la lumière laser au moyen d'un polariseur placé en sortie, qui tient lieu de « filtre à polarisation ». Pour optimiser encore davantage la collecte des photons uniques produits, les chercheurs ont utilisé en plus une couche d'argent placée directement sous le cristal de hBN (figure 1), l' ensemble formé par l'argent et le film de hBN dirigeant les photons dans la direction de l' objectif du microscope les observant.

Par cette approche, les scientifiques ont réussi à identifier plusieurs régimes portant la signature d'effets purement quantiques. Ainsi, lorsque le laser est continu et de forte

puissance, il s'intrique quantiquement avec l'émetteur, ce qui donne une signature spectrale très singulière appelée « triplet de Mollow », à savoir l'apparition d'un nouveau pic d'émission de chaque côté de la raie d'émission du centre coloré. Outre cette observation, l'équipe a aussi montré que le degré d'indiscernabilité des photons produits était extrêmement élevé, un résultat prometteur pour l'utilisation de ces photons pour des technologies quantiques.

Si le hBN n'est pas le premier matériau servant de base à la réalisation d'émetteurs de photons indiscernables, il offre des avantages technologiques spécifiques. En particulier, les centres colorés peuvent être créés en grand nombre et à des positions contrôlées. De plus, ils émettent tous à la même longueur d'onde, ce qui est un défi pour d'autres plateformes antérieures, telles les boîtes quantiques InGaAs. Ces résultats ouvrent ainsi des voies d'exploration prometteuses pour la réalisation de dispositifs complexes à grande échelle. À long terme, l'équipe ambitionne ainsi de réaliser des démonstrateurs complexes pour établir le potentiel applicatif de cette approche pour la fabrication d'un ordinateur quantique basé sur les photons uniques indiscernables. Ces résultats sont publiés dans la revue Nature Communications.

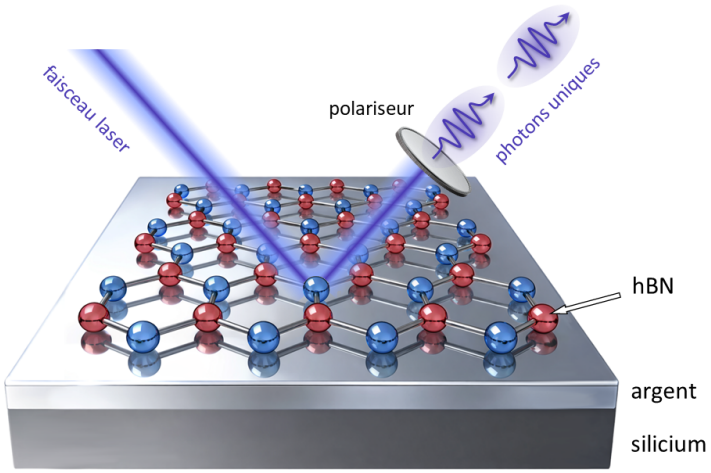


Figure 1 : Représentation schématique du principe de l'expérience. Un laser excite un défaut cristallin dans un feuillet de hBN, composé des atomes de bore (en rouge) et d' azote (en bleu). Les photons émis sont séparés du laser réfléchi grâce à un polariseur. Ces photons émis sous excitation résonante ont des propriétés particulièrement favorables pour l'information quantique.

Références

D. Gérard, S. Buil, K. Watanabe, T. Taniguchi, J.-P. Hermier, A. Delteil, **"Resonance fluorescence and indistinguishable photons from a coherently driven B centre in hBN"**,

Nature Communications **17**, 1843 (2026) – [HAL] – [arXiv]

Lien vers le fait marquant CNRS Physique

Contact: Aymeric Delteil

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

> Groupe d'étude de la matière condensée (GEMAC-UVSQ/CNRS)
> Laboratoire Léon Brillouin (LLB-CEA/CNRS)