

quement neutres caractérisées par un rayon et une masse particuliers.

Nous pouvons maintenant concevoir qu'en piégeant un photon et un exciton dans une même région, on crée entre eux une interaction permanente représentée par une quasi-particule, le polariton (*voir l'encadré page ci-contre*). Pour l'obtenir, il faut trouver le moyen de placer un ou plusieurs « puits quantiques », jouant le rôle de pièges à excitons, au sein d'une « cavité optique » faisant office de piège à photons.

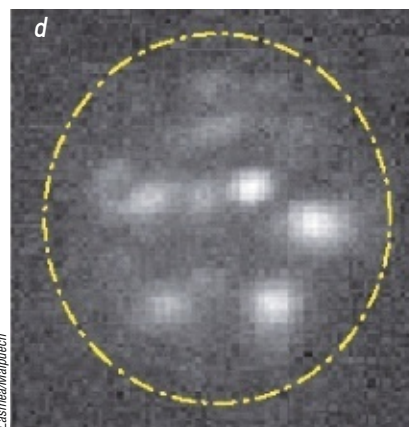
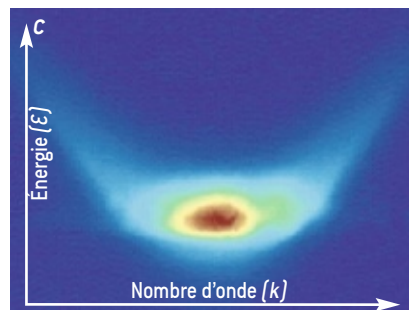
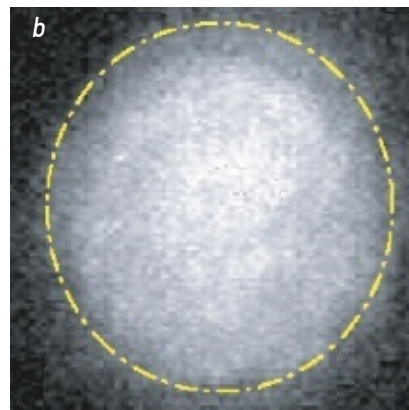
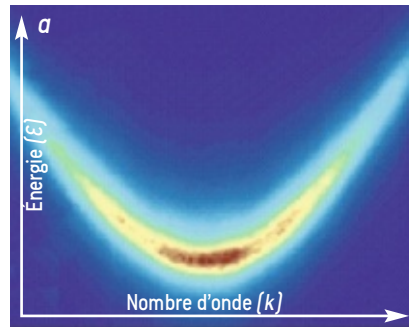
Cette cavité optique consiste en deux miroirs de Bragg se faisant face. Un miroir de Bragg est une succession de couches planes et transparentes d'indices de réfraction différents. Une telle structure réfléchit presque toute la lumière incidente, pour une longueur d'onde appropriée. Les déphasages entre les ondes réfléchies à chaque interface dépendent en effet de la longueur d'onde lumineuse et de la distance entre plans, et ces déphasages doivent donner lieu à une interférence constructive. Un miroir de Bragg est donc construit pour fonctionner pour une longueur d'onde précise : l'épaisseur de ses couches successives doit être égale à un quart de la longueur d'onde de fonctionnement.

Entre les deux miroirs de Bragg qui se font face, on intercale une couche d'épaisseur égale à un multiple de la demi-longueur d'onde. Un photon introduit dans cette couche y crée un mode photonique confiné : en d'autres termes, une répartition stationnaire du champ lumineux dans le plan du piège optique.

Au sein de ce piège à photons, pour piéger des excitons, on place un ou plusieurs puits quantiques aux maxima du champ électrique du mode photonique confiné. Concrètement, les puits quantiques prennent la forme de couches de matériau semi-conducteur épaisses de quelques nanomètres seulement.

En pratique, ces pièges sont obtenus par croissance cristalline en de nombreuses étapes, grâce aux progrès techniques accomplis dans les années 1980. Le piégeage des excitons et des photons se fait le long de l'axe de la croissance du cristal, noté z . Les excitons et les photons restent donc libres de se déplacer dans le plan perpendiculaire à z , qui est aussi celui du piège.

Comment caractériser le comportement de ces particules ou quasi-particules dans le piège ? Cette information est donnée par la « relation de dispersion »



2. L'ÉMISSION LUMINEUSE d'un gaz de polaritons dans l'espace (ϵ, k) et dans l'espace physique avant et après la condensation de Bose-Einstein traduit la relation de dispersion des excitons. Avant la condensation (*a et b*), l'émission est diffuse. Après la condensation (*c et d*), l'émission devient cohérente et tend à se concentrer autour d'une seule valeur de k dans l'espace (ϵ, k) et à devenir ponctuelle (plusieurs condensats sont présents simultanément) dans l'espace physique.

dans le matériau, c'est-à-dire par la relation entre leur énergie et leur vitesse.

Comment créer des excitons dans le puits quantique ? En y pompant de l'énergie lumineuse, c'est-à-dire en l'inondant de lumière. Une partie de cette lumière y est absorbée et crée des excitons. Une telle paire électron-trou peut se recombiner (l'électron et le trou disparaissent simultanément) et restituer sous la forme d'un photon l'énergie ayant servi à le créer. À peine émis, le photon se retrouve dans le piège optique, dans la même région de l'espace que le piège à excitons.

L'interaction d'un exciton et d'un photon piégés ensemble peut se produire de deux façons, l'une qualifiée de faible et l'autre de forte. Dans la première, un photon émis par la recombinaison d'un exciton quitte la cavité avant d'interagir à nouveau avec un exciton ; on parle de régime de couplage faible, puisque le photon ne reste pas assez longtemps dans la cavité pour que de nouvelles interactions aient lieu.

Piégeage dans un plan

Dans le régime de couplage fort, en revanche, l'exciton émet en se recombinant un photon dont la durée de vie est assez longue pour que le photon soit réabsorbé et recrée l'exciton ; ce dernier réémet ensuite le photon, puis le réabsorbe, etc. C'est ainsi que s'établissent des états intermédiaires entre exciton et photon : les polaritons. Dans le piège, ces états quantiques mêlant lumière (le photon) et matière (l'exciton) ne sont confinés que dans la direction z ; ils s'étendent dans tout le plan du piège, perpendiculaire à z .

Il existe en fait plusieurs sortes de polaritons, mettant en jeu des quasi-particules différentes. Ceux que nous considérons ici sont nommés polaritons de microcavité, par référence à la microcavité optique. L'énergie des polaritons de microcavité résultant du couplage fort peut prendre deux valeurs, l'une basse et l'autre élevée, mais toutes deux différentes de celles du photon et de l'exciton d'origine.

L'écart entre ces deux énergies est de l'ordre de cinq à dix milliélectronvolts (un électronvolt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule) dans les structures à base d'arséniure de gallium (GaAs, l'un des semi-conducteurs les plus utilisés en optoélectronique) ; il peut atteindre 60 milliélectronvolts dans des structures réalisées avec

LES AUTEURS



Guillaume MALPUECH est chercheur du CNRS au LASMEA (Laboratoire des sciences et matériaux pour l'électronique et d'automatique, unité mixte CNRS/Université Blaise Pascal), à Clermont-Ferrand. Dmitry SOLNYSHKOV est maître de conférences à l'Université Blaise Pascal et travaille au LASMEA. Il a été le lauréat du Grand prix Jeune chercheur de la ville de Clermont-Ferrand en 2008.

BIBLIOGRAPHIE

J. Levrat *et al.*, Condensation phase diagram of cavity polaritons in GaN-based microcavities: Experiment and theory, *Phys. Rev. B*, vol. 81, 125305, 2010.

A. Kavokin *et al.*, *Microcavities*, Oxford University Press, 2007.

G. Malpuech *et al.*, Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 206402, 2007.

J. Kasprzak *et al.*, Bose-Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature*, vol. 443, pp. 409-414, 2006.

M. Richard *et al.*, Experimental evidence for nonequilibrium Bose condensation of exciton Polaritons, *Phys. Rev. B*, vol. 72, pp. 201301, 2005.

A. Kavokin et G. Malpuech, *Cavity polaritons*, Elsevier, 2003.

C. Weisbuch *et al.*, Observation of a coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, p. 3314, 1992.

du nitrure de gallium (autre semi-conducteur). Cette différence entre les énergies des deux états de polariton est un paramètre important, car elle détermine la vitesse d'échange de l'énergie entre le mode photonique et le mode excitonique. Par exemple, un écart de 10 millielectronvolts signifie qu'un exciton émet un photon, puis le réabsorbe en 0,2 picoseconde (une picoseconde est égale à 10^{-12} seconde). Même s'ils sont assez stables pour être exploités, les polaritons finissent par disparaître: leur durée de vie, de l'ordre de la picoseconde, est liée pour l'essentiel à celle, brève, de la composante photonique.

À ce stade, il importe d'insister sur ce qui étonne les physiciens avec les polaritons. Pour commencer, les polaritons sont des systèmes physiques peu ordinaires, puisqu'il s'agit de quasi-particules composées d'une quasi-particule matérielle (l'exciton) et d'une particule de lumière (le photon). Mais, surtout, ils ont une masse effective environ 100 000 fois inférieure à celle d'un électron dans le vide, donc environ 100 millions de fois plus petite que celles des atomes constituant le réseau cristallin... Une masse effective aussi faible est inédite et ne peut que conférer aux polaritons des comportements singuliers.

Condensation de Bose-Einstein

L'émission laser obtenue avec des polaritons illustre justement cela de façon fascinante. Cette émission ne résulte en effet pas du principe classique d'émission laser (l'inversion de populations d'atomes excités et non excités), mais de la formation d'un « condensat de Bose-Einstein ». Expliquons ce que cela veut dire.

Il existe deux types distincts, par leurs propriétés quantiques, de particules: les bosons et les fermions. Les fermions, de spin demi-entier, ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique qu'un autre fermion identique. Les bosons, dont le spin est entier, ne sont pas soumis à cette interdiction: des bosons identiques peuvent se retrouver tous dans l'état de plus basse énergie possible du système considéré (par exemple un puits de potentiel). On nomme « condensation de Bose-Einstein » le processus où les bosons perdent assez de leur énergie pour se retrouver tous dans l'état de plus basse

énergie, dit état fondamental. La condensation de Bose-Einstein n'est possible à une température donnée que si la densité de particules dépasse une valeur critique, au-delà de laquelle les bosons s'accumulent dans l'état fondamental. La possibilité d'une telle condensation fut décrite dès 1924 par Albert Einstein sur la base de la notion de boson introduite par le physicien indien Satyendranath Bose (1894-1974). Mais elle n'a été observée pour la première fois qu'en 1995, dans un gaz ultrafroid d'atomes bosoniques (atomes de spin entier).

Plusieurs phénomènes où des bosons se retrouvent tous dans le même état sont apparentés à la condensation de Bose-Einstein. Citons l'émission d'un rayonnement laser, les photons (des bosons) émis ayant tous à peu près la même énergie et la même direction; il en est de même de la supraconductivité, qui trouve son origine dans la formation de paires bosoniques d'électrons, et de la superfluidité des gaz suffisamment froids d'atomes bosoniques. Sauf dans le cas des photons (dont la masse est nulle), tous ces effets, ainsi que la condensation de Bose-Einstein, ne s'observent qu'au-dessous d'une certaine température, d'autant plus basse que les bosons concernés ont une masse élevée (la température de condensation est inversement proportionnelle à la masse).

Dans le cas des polaritons, la température critique de condensation de Bose-Einstein est très élevée, puisque ces quasi-particules sont des bosons de très faible masse. La condensation des polaritons n'est limitée que par l'instabilité des polaritons – plus la température est élevée, plus les polaritons sont instables – et par la nécessité d'avoir une densité suffisante de polaritons.

Franchir ces obstacles est difficile tant l'obtention du régime de couplage fort est contraignante. Il faut travailler dans une gamme de températures où les excitons sont stables, ce qui, dans le cas des semi-conducteurs en arséniure de gallium couramment utilisés, signifie au-dessous de 50 à 80 kelvins (-223 à -193 °C). Dans les semi-conducteurs tels que le nitrure de gallium ou l'oxyde de zinc, où les excitons sont bien plus stables, on peut *a priori* observer à température ambiante la condensation de Bose des polaritons, voire construire un composant qui exploite ce phénomène.