

LA LIBRAIRIE DE SCIENCE POUR LA

Des livres à offrir ou à s'offrir



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

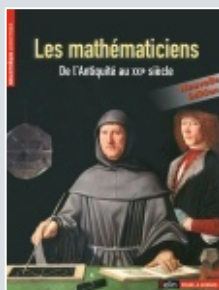
224 pages • 19 euros • 075110



Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT. Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

Les lasers à polaritons

Les physiciens développent des lasers d'un nouveau type, fonctionnant à très faible énergie. Ces dispositifs sont fondés sur les polaritons, des états particuliers créés à partir d'électrons et de lumière.

Guillaume Malpuech et Dmitry Solnyshkov

Les interactions au sein d'un solide sont complexes. Les décrire complètement est impossible, mais le concept de quasi-particule s'est révélé très utile. Les physiciens nomment ainsi une interaction se propageant au sein d'un solide, dont les effets équivalent pour l'essentiel à ceux de la propagation d'une particule fictive dotée d'une masse et d'une charge électrique.

Les «trous» d'électrons sont un exemple bien connu de quasi-particule : ils représentent les interactions du réseau atomique d'un solide avec le flux de ses électrons mobiles quand il manque une charge électrique élémentaire (celle d'un électron). Quasi-particule chargée positivement, le «trou» d'électron a son pendant négatif : l'«électron». Cette dénomination est abusive, car elle désigne en fait l'interaction du réseau atomique avec le flux d'électrons mobiles quand il s'y trouve un excès de une charge élémentaire.

Quand ils veulent décrire efficacement des interactions plus complexes, les physiciens du solide combinent les quasi-par-

ticules. Nous verrons ainsi que l'on peut combiner une paire électron-trou et un photon. Nommées polaritons, les quasi-particules en question sont l'objet d'intenses recherches dont nous allons évoquer les principaux aspects, le plus notable étant sans doute la naissance d'un nouveau principe de laser.

Des combinaisons photon-exciton

Comment obtient-on des polaritons ? En superposant un piège à excitons à un piège à photons. Pour comprendre ce que cela signifie, il nous faut commencer par spécifier la nature des deux composantes du polariton, l'exciton et le photon.

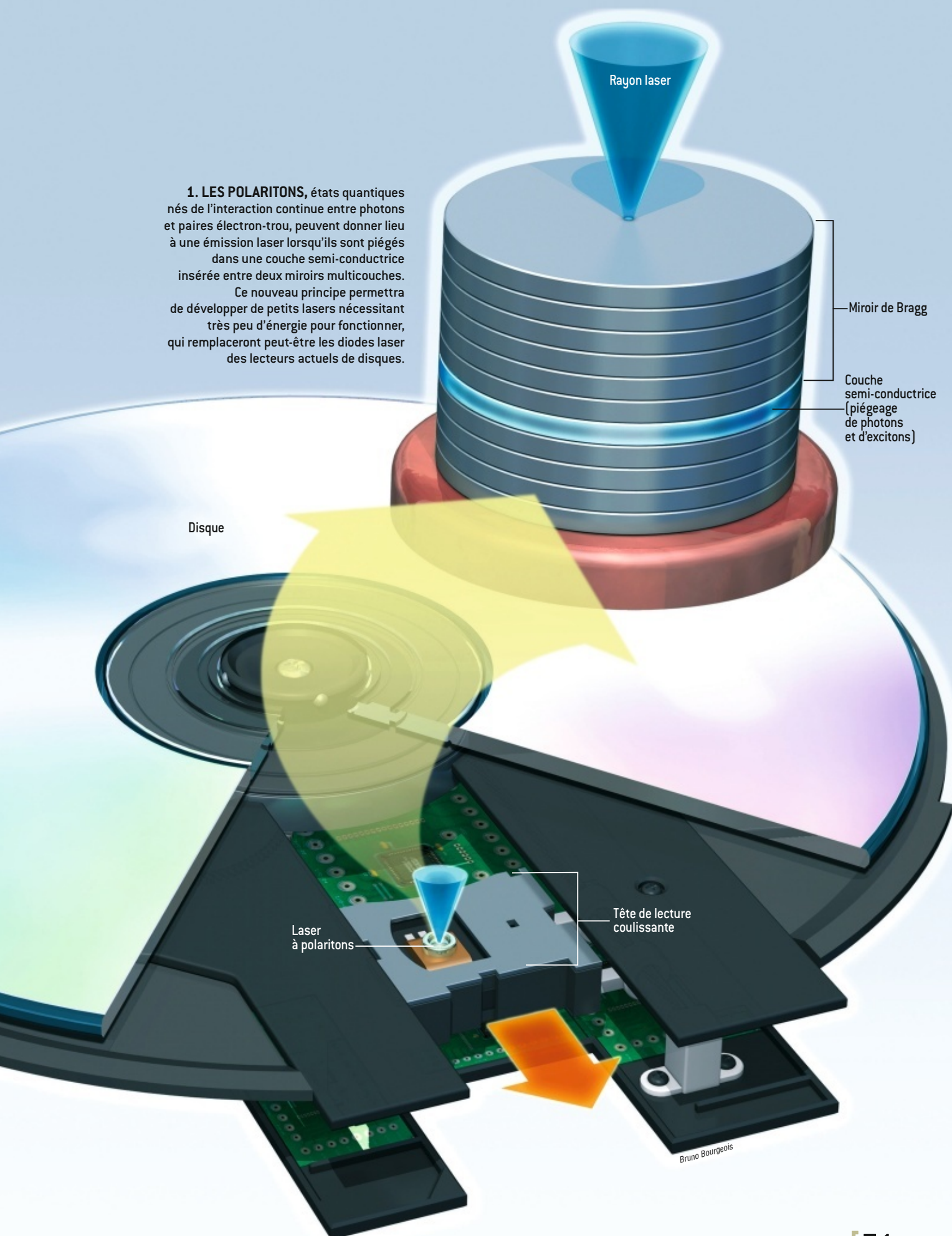
La lumière, rappelons-le, est de nature quantique : elle se manifeste à la fois comme une onde électromagnétique et comme un grain d'énergie, c'est-à-dire un photon. Les physiciens évoquent le photon chaque fois qu'ils discutent des interactions entre la lumière et des particules

L'ESSENTIEL

- ✓ Les excitons sont des « quasi-particules » qui représentent des états liés électron-trou au sein d'un semi-conducteur.
- ✓ En forçant les excitons à interagir fortement avec la lumière au sein de pièges spécifiques, on obtient des polaritons, qui sont des quasi-particules.
- ✓ La condensation de Bose-Einstein de ces quasi-particules est possible à température ambiante et s'accompagne d'un rayonnement laser.

1. LES POLARITONS, états quantiques nés de l'interaction continue entre photons et paires électron-trou, peuvent donner lieu à une émission laser lorsqu'ils sont piégés dans une couche semi-conductrice insérée entre deux miroirs multicouches.

Ce nouveau principe permettra de développer de petits lasers nécessitant très peu d'énergie pour fonctionner, qui remplaceront peut-être les diodes laser des lecteurs actuels de disques.



Le comportement des quasi-particules dans leurs pièges dépend de leur « relation de dispersion ». La notion de dispersion est d'origine optique : elle désigne le fait que les différentes couleurs qui composent la lumière se propagent à des vitesses différentes dans un matériau. De même, puisqu'à toute (quasi) particule quantique est associée une onde intrinsèque (dite de Broglie), cette particule se propage dans un matériau à une vitesse qui dépend de la fréquence ou de la longueur d'onde de son onde intrinsèque, puisque $\lambda = h/mv$, où λ est la longueur d'onde, m la masse, v sa vitesse et h est la constante de Planck.

Plutôt que la vitesse, les physiciens emploient le « nombre d'onde » k , qui lui est proportionnel : $k = mv/h$, où $h = h/(2\pi)$. La relation de dispersion lie l'énergie E de la particule à son nombre d'onde k .

En physique du solide, la relation de dispersion des électrons et des trous est compliquée, car elle dépend de ce que l'on nomme la structure de bandes. Mais lorsque k est proche de 0, elle devient presque

parabolique, c'est-à-dire de la forme : $E = \hbar^2 k^2 / 2m_{\text{eff}}$.

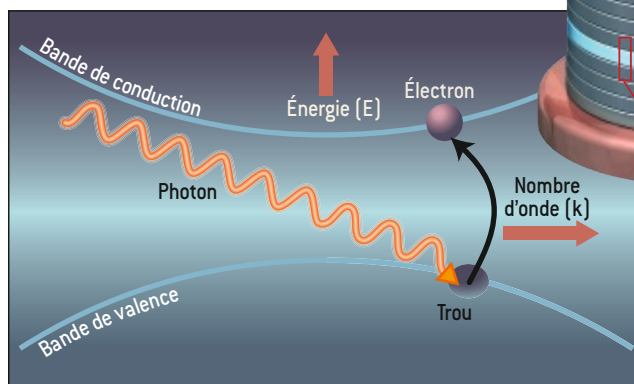
Or cette formule est celle de l'énergie cinétique d'une particule dans le vide. Ainsi, un électron peu mobile dans un solide se comporte à peu près comme une (quasi) particule dans le vide dotée d'une masse effective m_{eff} , dont la valeur traduit l'intensité de ses interactions avec le réseau cristallin. De même, un exciton peu mobile dans un solide se comporte comme une (quasi) particule dotée d'une certaine masse effective.

Les excitons qui nous intéressent sont dans un réseau cristallin qui les piège seulement dans la direction z . Dans un tel puits quantique, les énergies que peut avoir une quasi-particule sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent prendre que certaines valeurs précises : les niveaux d'énergie. Même si son énergie dans la direction z est fixe, un exciton reste libre dans le plan perpendiculaire à z (celui du piège), où il satisfait une relation de dispersion du type $E = \hbar^2 k_{\parallel}^2 / 2m_{\text{eff}}$. Dans cette formule, $k_{\parallel}$ est le nombre d'onde dans le plan

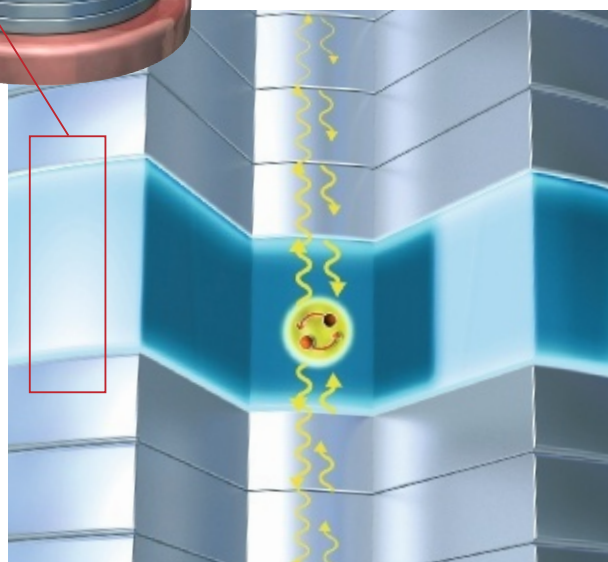
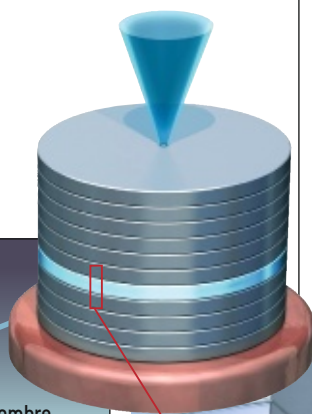
du piège et m_{eff} une masse effective qui dépend de la structure du piège, mais qui est de l'ordre de la masse de l'électron.

Pour les photons aussi, une cavité optique planaire est l'équivalent d'un puits quantique dans la direction z , et eux aussi s'y trouvent sur des niveaux d'énergie étagés et sont dotés d'une masse effective. Une fois de plus, la relation entre l'énergie d'un photon confiné et son nombre d'onde dans le plan n'est plus donnée par une relation du type $E = \hbar k$ comme dans le vide, mais de type $E = \hbar^2 k_{\parallel}^2 / 2m_{\text{eff}}$. La masse effective du photon est typiquement inférieure de cinq ordres de grandeur à celle de l'exciton.

Notons enfin que pour les polaritons, qui mélangent exciton et photon, la relation de dispersion prend une forme très différente, avec un minimum très marqué en $k = 0$.



L'arrivée d'un photon d'énergie appropriée fait passer l'un des électrons de la bande de valence à la bande de conduction (les deux dernières bandes d'énergies permises dans un semi-conducteur), où l'électron laisse un « trou ». L'« électron » et le « trou » ainsi créés se comportent comme des quasi-particules. Un exciton naît quand l'attraction électrostatique lie ces deux quasi-particules. Si leur nombre d'onde k (ou la vitesse) est peu élevé, toutes ces quasi-particules se retrouvent sur des niveaux d'énergie paraboliques (ci-dessus). L'interaction permanente d'un exciton avec le photon qu'il émet en s'annihilant, puis réabsorbe en se reformant, constitue un polariton (à droite).



de matière, par exemple des électrons. L'électron se comporte lui aussi à la fois comme une particule et comme une onde. Au sein des conducteurs et des semi-conducteurs, l'ensemble des électrons périphériques des atomes constitue une sorte d'onde électronique globale baignant tout le volume du matériau, que l'on nomme la « mer électronique ». C'est au sein de cette onde électronique que se propagent des excès ou des déficits d'une charge élémentaire, c'est-à-dire les « électrons » et les « trous » évoqués plus haut.

Un photon et une paire électron-trou piégés dans la même région

Tels l'électron et le proton de l'atome d'hydrogène, un électron (au sens de la physique du solide) et un trou peuvent se lier pour former au sein d'un matériau semi-conducteur une paire électron-trou, nommée aussi exciton. Pourquoi ce terme ? Parce que les excitons représentent une excitation par rapport à la situation où le réseau ne comporte ni électron libre ni trou.

La création de cette excitation nécessite de l'énergie, lumineuse par exemple. Ainsi, dans un spectre d'absorption – la mesure de la lumière absorbée par un matériau –, la présence d'un exciton se traduit par un pic d'absorption à une certaine énergie. Comme les atomes d'hydrogène auxquels ils ressemblent, les excitons apparaissent au sein d'un matériau (semi-conducteur) comme des structures électri-

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.

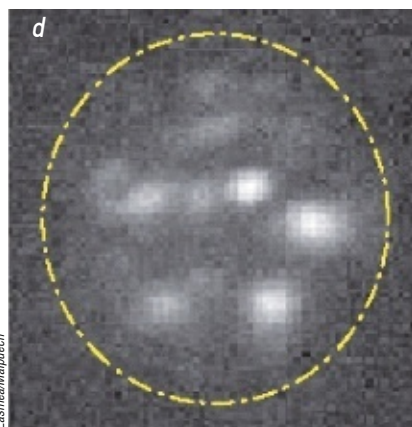
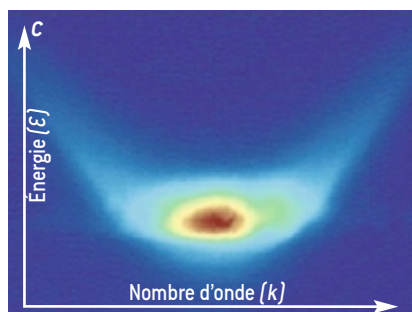
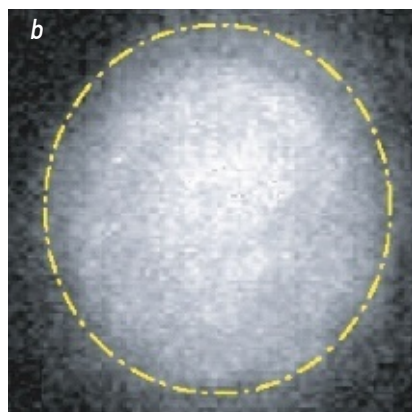
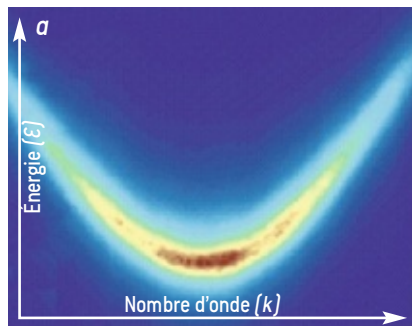
Cette cavité optique consiste en deux miroirs de Bragg se faisant face. Un miroir de Bragg est une succession de couches planes et transparentes d'indices de réfraction différents. Une telle structure réfléchit presque toute la lumière incidente, pour une longueur d'onde appropriée. Les déphasages entre 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.