

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. 201-301, 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.

On est loin d'avoir tout compris des lasers à polaritons. Normalement, la formation dans un fluide quantique d'un condensat de Bose-Einstein s'accompagne de la superfluidité, c'est-à-dire de la capacité à s'écouler sans frottements. Or ce ne semble pas être le cas avec les condensats de polaritons. Pourquoi ?

Une contrepartie importante de la faible masse effective des polaritons est que leur durée de vie est faible dans leur état fondamental : de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} seconde). Ce temps de vie bref a longtemps suggéré aux chercheurs que la condensation de Bose des polaritons ne pourrait pas être observée, car il s'agit en principe d'une transition de phase thermodynamique, décrite pour des particules ayant un temps de vie infini. Toutefois, avec les lasers à polaritons, on se trouve dans le cas particulier de systèmes où des particules sont continuellement injectées dans le piège par un pompage extérieur, tandis que d'autres le quittent à cause de leur durée de vie finie. Il s'agit donc d'un système en quasi-équilibre, et non pas à l'équilibre. Or d'un point de vue théorique, seule la condensation de Bose dans un système à l'équilibre a été étudiée en détail et... assez bien comprise. Une théorie efficace de la condensation de Bose dans un système ouvert manque encore.

Du point de vue expérimental, depuis 1997, de nombreux résultats ont été obtenus. Une étape importante a été franchie en 2005-2006 grâce aux travaux de l'équipe de Le Si Dang, à Grenoble, en collaboration avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne et notre laboratoire (le LASMEA). En particulier, le changement radical de l'émission lumineuse obtenue, une fois franchi le seuil de condensation, a été observé (voir la figure 2).

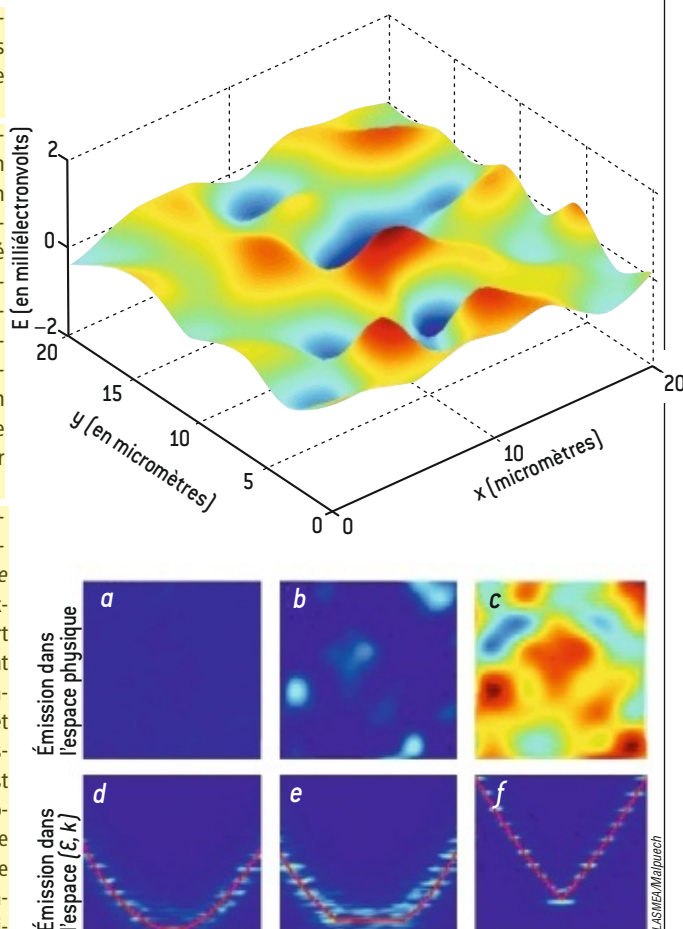
La condensation de Bose des polaritons a ensuite été observée par plusieurs autres équipes dans des microcavités à base de divers semi-conducteurs. Pour autant, un condensat de Bose-Einstein est en

principe superfluide, mais la superfluidité du condensat de polaritons n'a pas été clairement observée, ce qui intrigue les physiciens.

On montre que pour faire disparaître les frottements dans un condensat, il faut que la relation de dispersion cesse d'être parabolique pour devenir linéaire. Suggéré par Lev Landau en 1941 pour expliquer les propriétés de l'hélium superfluide, ce changement de la relation de dispersion traduit la minimisation de l'énergie d'interaction des particules du condensat entre elles au point de rendre possible leur propagation sans frottement.

Cette dispersion linéaire n'a cependant pas été observée expérimentalement (voir la figure b où une dispersion plate est visible). Pour expliquer cette déviation par rapport au cas idéal, deux hypothèses sont avancées. Selon l'équipe de Cambridge dirigée par P. Littlewood et celle de Trento dirigée par I. Carusotto, l'absence de superfluidité est liée à la durée de vie finie des polaritons, aspect qui est en effet une entorse à la théorie habituelle de la superfluidité. Mais nous ne sommes pas convaincus par cette explication, tant les modèles de la condensation de Bose dans les systèmes ouverts utilisés aujourd'hui paraissent arbitraires.

Nous proposons plutôt d'expliquer l'absence de superfluidité par l'inévitable désordre régnant au sein de la structure. La simple observation de l'émission laser au-dessous et au-dessus du seuil de condensation (voir la figure 2) révèle que le condensat n'est pas homogène dans l'espace, mais fragmenté. Pour exploiter cette idée, nous avons modélisé l'évolution dans le temps et l'espace du condensat dans un potentiel désordonné (ci-dessus en haut) imitant par son désordre les propriétés de la microcavité. Ces travaux montrent qu'à faible densité, l'émission est homogène dans l'espace et la dispersion parabolique (ci-dessus, a et d). C'est la phase « normale ». Pour les densités intermédiaires, lorsque la condensa-



LE POTENTIEL ALÉATOIRE qui caractérise une microcavité de tellure de cadmium (CdTe) est représenté en haut. Ci-dessus, les émissions lumineuses d'une telle cavité à mesure qu'augmente la densité de polaritons, au début faible (a et d), quand on a un verre d'Anderson (b et e) et quand les condensats se rejoignent et forment une phase superfluide à forte émission lumineuse (c et f, simulation).

tion débute, les polaritons remplissent les minima du potentiel désordonné et forment des lacs séparés les uns des autres. La relation de dispersion devient plate autour de $k = 0$ (ci-dessus, b et e). Une telle phase, cohérente, localisée et non superfluide est nommée verre d'Anderson. Nous pensons que c'est elle qui a été observée expérimentalement. Ensuite, lorsqu'on monte en densité, le niveau des lacs de condensat augmente à cause des interactions répulsives entre les particules. À un certain stade, les lacs se rejoignent pour former une mer, et le condensat devient superfluide (ci-dessus, c et f). On peut ainsi distinguer trois

phases différentes : la phase normale, le verre d'Anderson et la phase superfluide. D'après nos simulations, la phase superfluide se situe dans une gamme de températures et de densités accessible expérimentalement.

Nos conclusions ont été par la suite soutenues par l'observation en 2008, par une équipe de l'Université Stanford, de la dispersion linéaire caractéristique d'un superfluide dans une cavité réalisée à partir du semi-conducteur AsGa, de bien meilleure qualité que TeCd. D'autres travaux publiés en 2009 et 2010 rapportent des observations compatibles avec la formation d'un superfluide.