

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).

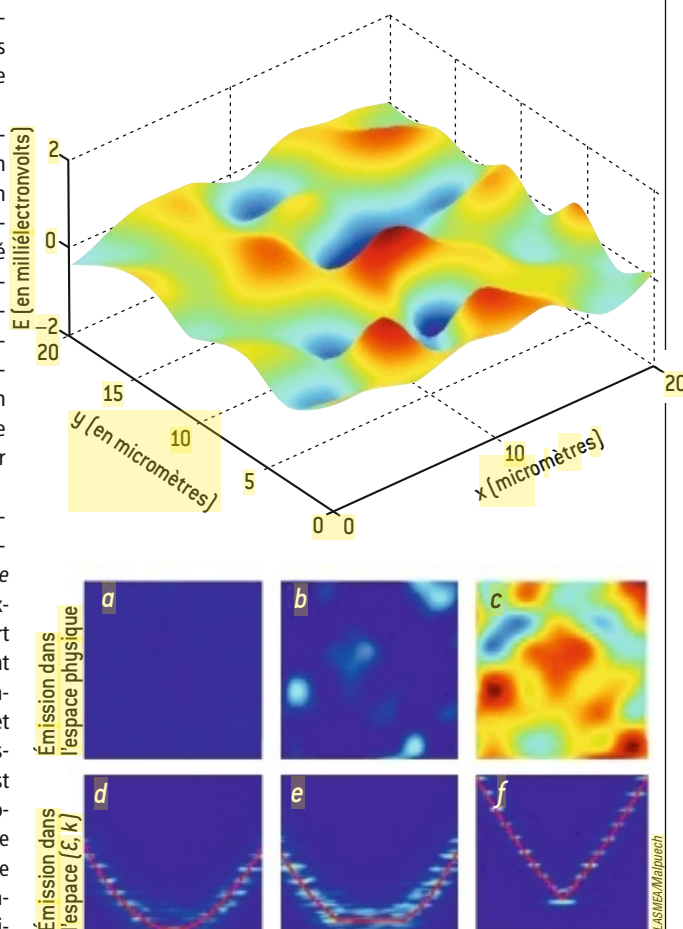
La condensation de Bose des polaritons a ensuite été observée par plusieurs autres équipes dans des microcavités à base de divers semi-conducteurs. Pour autant, un condensat de Bose-Einstein est en

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.

Le laser à polaritons n'est que le premier d'un ensemble de composants fondés sur les propriétés des polaritons. L'enjeu est la réalisation de circuits à polaritons qui ouvriraient la voie à un traitement de l'information ultra-rapide et entièrement optique.

Ce genre de composant nécessite toutefois la propagation et la manipulation de condensats sur plusieurs dizaines de micromètres.

Jusqu'à présent, le désordre présent dans les échantillons à microcavités et la trop brève durée de vie des polaritons ont limité les réalisations expérimentales, alors que de nombreux schémas de transistors ou d'interféromètres à polaritons ont été proposés.

Ces difficultés semblent en grande partie résolues par des travaux récents du Laboratoire de photonique et de nanostructures (CNRS,

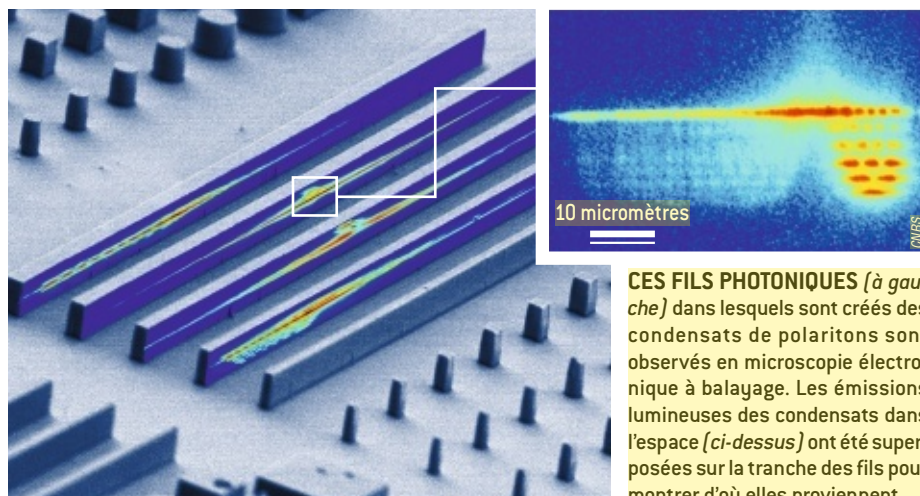
à Marcoussis) qui ont élaboré des microcavités en forme de fil (*ci-dessous*) où la durée de vie des polaritons est dix fois plus longue que dans les structures qui existaient jusqu'à présent. Elle peut de fait atteindre 100 picosecondes.

Ces travaux ont conduit, en collaboration avec notre laboratoire (LASMEA) et l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS/UPMC), à la création de condensats de po-

laritons qui s'étendent bien au-delà de la zone où ils ont été créés, tout en gardant leur cohérence spatiale. Ces condensats lumière-matière interagissent avec leur environnement, ce qui a permis aux chercheurs de les manipuler par des moyens optiques.

Pour les obtenir, on emploie un faisceau laser pour créer localement des paires électron-trou. Une fois ces dernières en nombre suffisant, elles se condensent dans un même état quantique. Alors que jusqu'à présent, ce phénomène restait localisé à la zone d'excitation, les chercheurs ont pu observer la présence de cet état quantique macroscopique sur toute la longueur du fil.

Les physiciens ont en outre montré que l'expansion du condensat est gouvernée par le potentiel répulsif qui s'exerce entre le condensat et les particules non condensées dans la zone d'excitation. L'utilisation de ce potentiel fournit d'ailleurs un moyen nouveau de contrôler l'étendue du condensat.



CES FILS PHOTONIQUES (*à gauche*) dans lesquels sont créés des condensats de polaritons sont observés en microscopie électronique à balayage. Les émissions lumineuses des condensats dans l'espace (*ci-dessus*) ont été superposées sur la tranche des fils pour montrer d'où elles proviennent.

En effet, les polaritons de cavité sont en partie constitués de photons qui peuvent être émis vers l'extérieur de la cavité à travers les miroirs de Bragg, qui ont une certaine capacité à transmettre de la lumière. Comme les polaritons condensés sont très nombreux à être dans le même état quantique, c'est aussi le cas pour les photons émis hors de la cavité à travers les miroirs de Bragg. En d'autres termes, la condensation de Bose-Einstein des polaritons s'accompagne d'un rayonnement monochromatique, cohérent et intense, bref d'un rayonnement laser. Pour les physiciens, il est remarquable que ce rayonnement laser ne doive rien au principe de l'inversion de population qu'exploitent les autres lasers...

Le principe des lasers à polaritons a été proposé en 1996 par Atac Imamoglu de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH). Leur intérêt, potentiellement immense, tient au fait que l'énergie minimale à leur apporter pour les faire fonctionner est extrêmement faible, par comparaison avec tous les autres lasers.

Ces avancées suggèrent qu'il est temps de tenter d'exploiter les lasers à polaritons sous la forme d'une nouvelle génération de composants optoélectroniques très peu gourmands en énergie.

L'ensemble des effets physiques évoqués et leurs applications potentielles pourraient être obtenus à température ambiante si des microcavités étaient réalisées à partir de semi-conducteurs dits « à grande bande interdite » en nitrure de gallium (NGa) ou en oxyde de zinc (ZnO). Toutefois, cela représente encore un défi technique.

Des condensats à température ambiante

La réalisation de microcavités en nitrure de gallium fonctionnant en régime de couplage fort a déjà fait l'objet de trois projets européens en huit ans. C'est ainsi que l'observation du régime de couplage fort à 300 kelvins (la température ambiante) dans une structure en nitrure de gallium a été rapportée dès 2003. La qualité des structures a été par la suite fortement améliorée, de sorte

que le premier rayonnement d'un laser à polaritons fonctionnant à température ambiante a été obtenu en 2007. L'observation de la condensation de Bose-Einstein à cette température est revendiquée par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, des Universités de Southampton et de Cambridge, ainsi que par ceux de notre laboratoire.

Une étape reste à franchir avant d'obtenir des composants viables commercialement : la mise en circuit de ces structures. Notre laboratoire a déposé un brevet proposant un schéma d'injection efficace et développé en collaboration avec l'Université de Rome un simulateur du laser à polaritons pompé électriquement, simulateur qui inclut le transport des porteurs de charge électrique à partir des contacts, la formation des excitons et des polaritons, et la condensation de ces quasi-particules. Nos résultats suggèrent que des lasers à polaritons, fonctionnant avec beaucoup moins d'énergie que les photodiodes actuelles, arriveront sur le marché dans un futur proche. ■