

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 : $E = \hbar^2 k^2 / 2m_{\text{eff}}$.

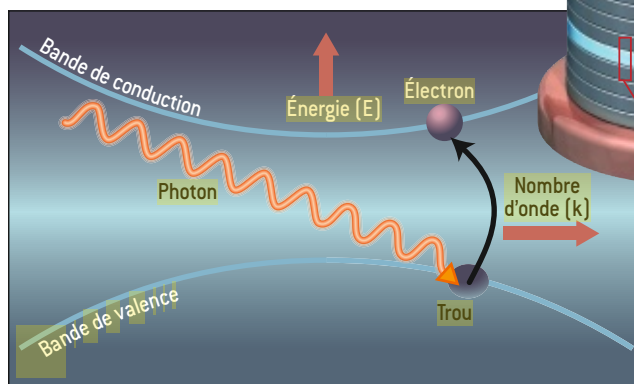
Or cette formule est celle de l'énergie cinétique d'une particule dans le vide. Ainsi, un électron peu mobile dans un solide se comporte à peu près comme une (quasi) particule dans le vide dotée d'une masse effective m_{eff} , dont la valeur traduit l'intensité de ses interactions avec le réseau cristallin.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

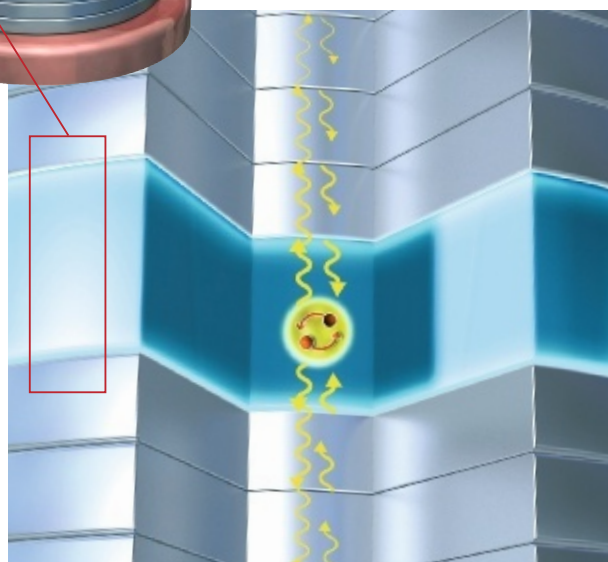
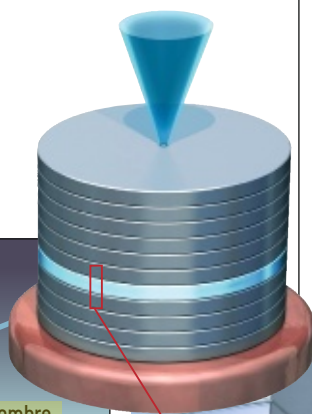
du piège et m_{eff} une masse effective qui dépend de la structure du piège, mais qui est de l'ordre de la masse de l'électron.

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.

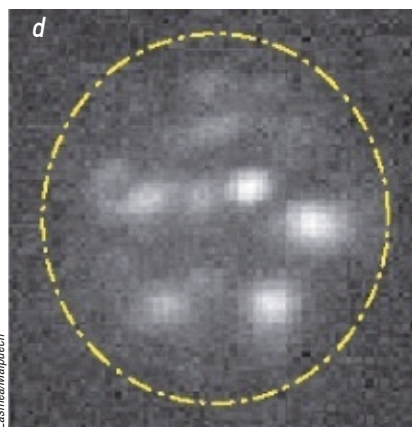
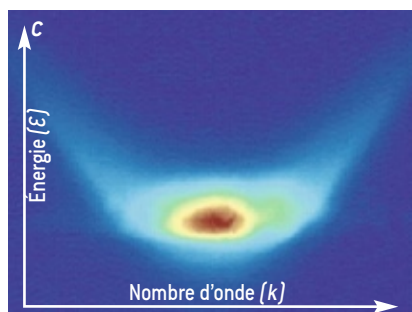
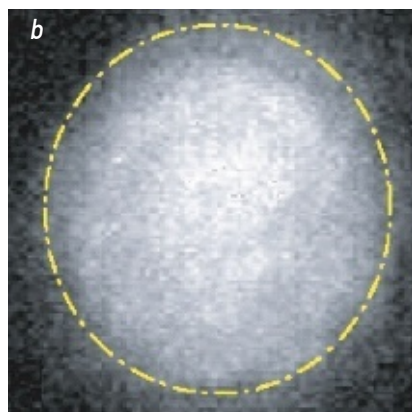
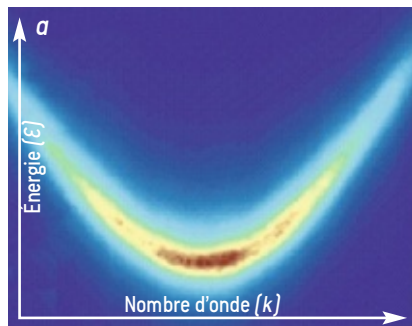
Cette cavité optique consiste en deux miroirs de Bragg se faisant face. Un miroir de Bragg est une succession de couches planes et transparentes d'indices de réfraction différents. Une telle structure réfléchit presque toute la lumière incidente, pour une longueur d'onde appropriée. Les déphasages entre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