

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.

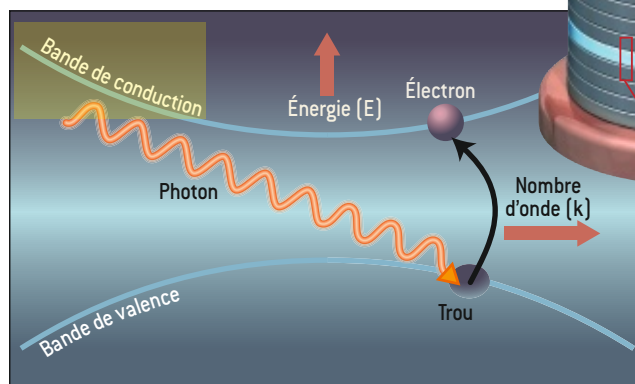
Notons enfin que pour les polaritons, qui mélangent exciton et photon, la relation de dispersion prend une forme très différente, avec un minimum très marqué en $k = 0$.

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.

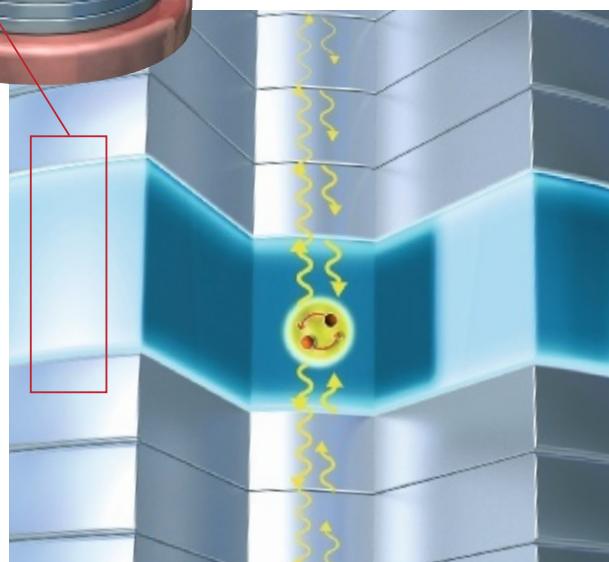
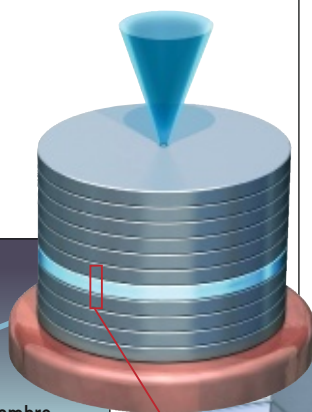
Un photon et une paire électron-trou piégés dans la même région

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-



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).



Bruno Bourgeois