

# 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.

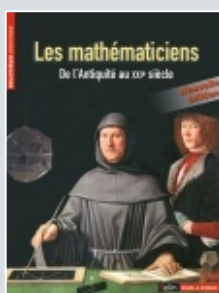
224 pages • 19 euros • 075110



### 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<sup>e</sup> 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

**L**es 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

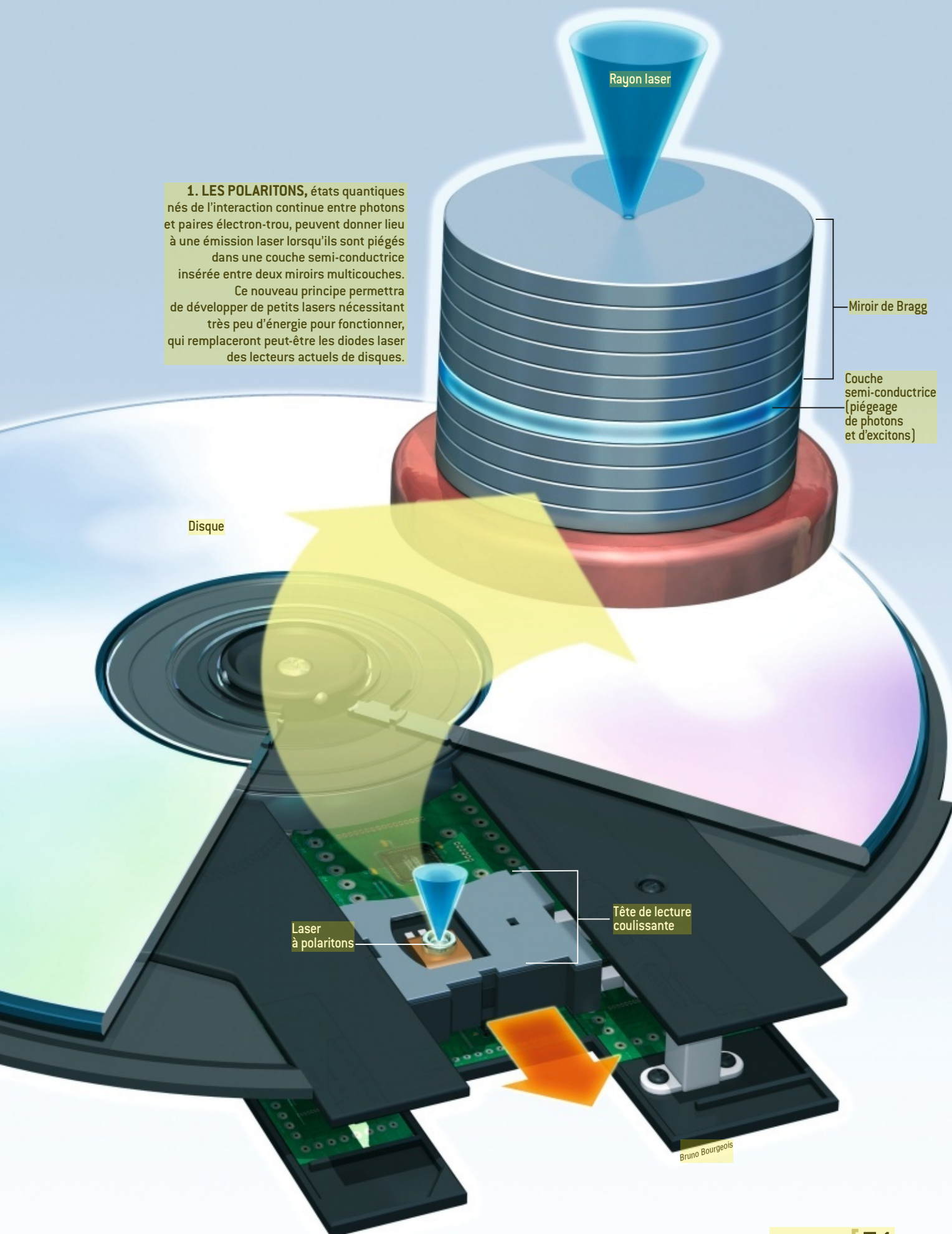
Comment obtient-on des polaritons ? En superposant un piège à excitons à un piège à photons. Pour comprendre ce que cela signifie, il nous faut commencer par spécifier la nature des deux composantes du polariton, l'exciton et le photon.

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

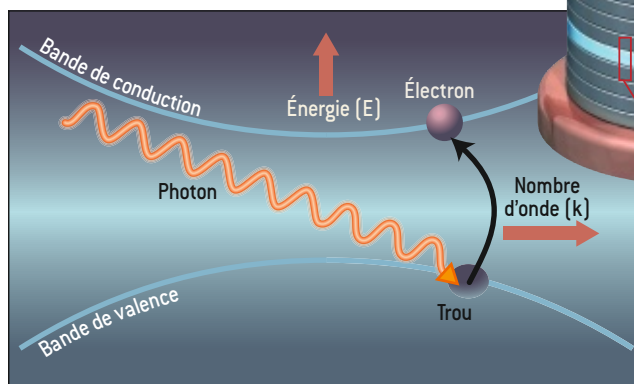
Or cette formule est celle de l'énergie cinétique d'une particule dans le vide. Ainsi, un électron peu mobile dans un solide se comporte à peu près comme une (quasi) particule dans le vide dotée d'une masse effective  $m_{\text{eff}}$ , dont la valeur traduit l'intensité de ses interactions avec le réseau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

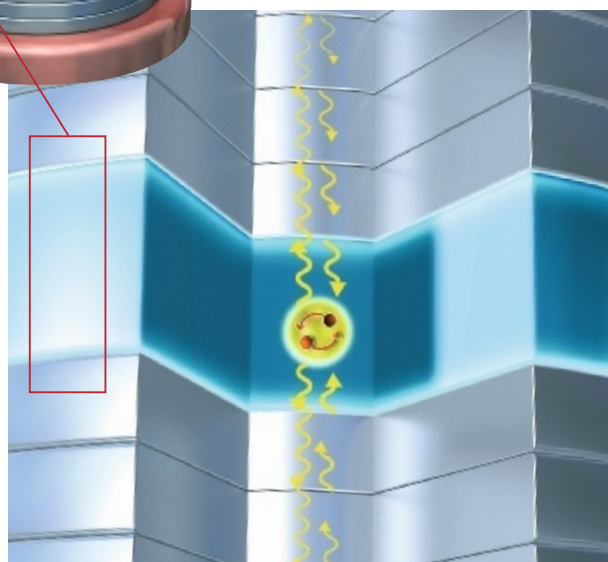
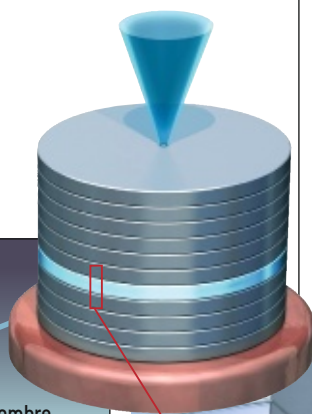
du piège et  $m_{\text{eff}}$  une masse effective qui dépend de la structure du piège, mais qui est de l'ordre de la masse de l'électron.

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).



Bruno Bourgeois

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-