

potentiel. On découvre alors que le claquage apparaît pour des valeurs de la force bien inférieure à celles que l'on calcule en considérant les atomes comme de petites billes «classiques».

Dans une expérience récemment menée à l'Université Yale, Mark Kasevich et ses collègues ont montré une spectaculaire application de ces oscillations de Bloch aux condensats de Bose-Einstein. La condensation de Bose-Einstein est un phénomène prédit par le physicien indien Satyendranath Bose et par Albert Einstein, en 1925, qui consiste en une accumulation d'un grand nombre d'atomes dans un même état quantique : l'état fondamental du piège. Tous les atomes perdent alors leur individualité et forment une sorte de «superatome», ayant la même position, la même vitesse et, plus généralement, toutes leurs propriétés physiques identiques. Leur température est alors extrêmement basse.

Un laser à atomes

Les physiciens de Yale ont placé un condensat d'atomes de rubidium dans une onde stationnaire laser verticale. Dans ce cas, la gravité joue le rôle de la force constante qui était induite de manière artificielle dans les expériences précédentes. Les atomes effectuent alors des oscillations de Bloch dans le réseau lumineux et restent confinés dans des sites espacés d'une demi longueur d'onde. En réduisant l'intensité lumineuse, on laisse fuir, par effet tunnel, une faible partie des ondes de matière, qui tombe sous l'action de la gravité. Chaque site se comporte alors comme un petit émetteur d'ondes de matière. Issus d'un même condensat de Bose-Einstein, tous ces émetteurs individuels sont initialement en phase. Ces ondes interfèrent alors constructivement à des instants précis, séparés par la période de Bloch. On obtient un laser à atomes

pulsé, c'est-à-dire une source d'atomes cohérente et brillante (les lasers classiques sont des sources cohérentes et brillantes de photons).

Les oscillations de Bloch des électrons et des atomes diffèrent par bien des ordres de grandeur. Les physiciens s'émerveillent que des systèmes aussi distincts que des atomes dans un champ lumineux et des électrons dans un solide aient des comportements similaires. La similitude des comportements corrobore l'universalité des lois de la physique quantique, et la dualité onde-particule.

Les applications des oscillations de Bloch sont nombreuses. Nous avons proposé, tout d'abord, d'utiliser la formule de Bloch pour déterminer précisément le rapport h/m : la période des oscillations de Bloch est égale à $2h/mg\lambda$, où h est la constante de Planck, m la masse de l'atome que l'on fait osciller et λ la longueur d'onde du laser qui crée le potentiel périodique. On peut aussi mesurer g , l'accélération de la pesanteur. Notre collègue François Biraben prépare cette expérience.

La méthode où l'onde stationnaire est balayée en fréquence permet aussi d'accélérer un gaz d'atomes ultrafroids sans le réchauffer. On pourra l'utiliser pour réaliser une fontaine atomique à partir d'un condensat de Bose-Einstein. De nombreuses autres situations peuvent être étudiées. En modifiant la configuration des faisceaux lumineux, on peut créer des potentiels plus complexes que ceux d'ondes stationnaires. On peut ainsi étudier le transport quantique des particules dans des potentiels quasi périodiques ou désordonnés.

Enfin on peut introduire des processus de relaxation contrôlés et, ainsi, étudier la transition entre les régimes quantiques et classiques. Tous ces exemples montrent que les atomes froids devraient apporter un éclairage nouveau sur le transport quantique.

Christophe SALOMON est directeur de recherche au Laboratoire Kastler-Brossel, à l'École normale supérieure de Paris. Maxime DAHAN est actuellement au Laboratoire Lawrence Berkeley, à Berkeley.

Felix BLOCH, *Zeitschrift für Physik*, vol. 52, p. 555, 1929.

Clarence ZENER, *Proceedings of Royal Society London Ser.*, A145, p. 523, 1934.

E. MENDEZ et G. BASTARD, *Physics Today*, vol. 46, p. 34, 1993.

M. BEN DAHAN, E. PEIK, J. REICHEL, Y. CASTIN et C. SALOMON, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 4 508, 1996.

S.R. WILKINSON, C.F. BHARUCHA, K.W. MADISON, Q. NIU et M.G. RAIZEN, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 4 512, 1996.

B.P. ANDERSON et A.M. KASEVICH, *Science*, vol. 282, p. 1686, 1998.

M. RAIZEN, C. SALOMON et Q. NIU, *New Light on Quantum Transport*, in *Physics Today*, 30 juillet 1997.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00



La couleur des oiseaux

MAURICE POMARÈDE

L'absorption de la lumière par les plumes, et les interférences de la lumière réfléchie sur leurs structures, engendrent les vives couleurs du paon, de la perruche, du colibri...

Les deux caractéristiques les plus admirables des oiseaux sont évidemment leurs couleurs et leurs chants. Ces deux qualités sont inégalement réparties : nombre de beaux oiseaux, tels les perroquets, les paons, les paradisiers, ont une voix sans attrait ; inversement les plus grands chanteurs, les fauvettes, les rossignols, ont une piètre apparence. Très rares sont ceux qui, tel le charbonneret, cumulent les riches couleurs et le chant mélodieux.

Qu'importe. L'évolution ne retient que l'utilité biologique : les couleurs, comme les chants, permettent aux animaux d'affirmer leur identité,

notamment au cours des parades nuptiales. C'est la raison pour laquelle on suppose que les couleurs vives conviennent surtout aux oiseaux des forêts tropicales : l'animal parade dans les clairières, exhibant ses couleurs vives, ou, au contraire, peut se tapir dans l'ombre, où ses couleurs s'éteignent, afin d'éviter les prédateurs.

Remarquablement variées, les couleurs sont toujours dues à des pigments et à des structures simples des plumes. Les pigments se mettent en place au cours de la mue, et ils contribuent directement ou indirectement aux couleurs des plumes : soit ils absorbent une partie de la lumière, soit ils diffractent la lumière. Nous verrons que

l'étude au microscope, optique ou électronique, révèle les mécanismes optiques mis en jeu.

Les pigments des oiseaux

Les organismes des oiseaux contiennent essentiellement deux types de pigments. Les uns sont des caroténoïdes, dont le plus connu est le bêta carotène (qui colore les carottes en rouge). Les oiseaux se les procurent en mangeant des végétaux et de petits animaux qui en contiennent. Ainsi le rouge des ailes des flamants provient d'un caroténoïde élaboré par une algue (*Dunaniella*) des lagunes ou des marais salants ; ces algues, qui rendent les eaux rougeâtres, sont consommées par de petites crevettes (*Artemia*), qui sont ensuite mangées par les flamants. Les caroténoïdes sont transformés chimiquement par l'organisme des flamants et fixés dans les plumes. Ils sont responsables des couleurs rouge, orangé, jaune, crème, selon leur nature chimique exacte et selon leur concentration dans les plumes.

Les autres couleurs du plumage sont dues aux mélanines. Brun ou noires, ces protéines sont synthétisées par la peau et mises en place dans les plumes en croissance par des cellules nommées mélanocytes. La répartition des mélanines, très précise, conduit à des dessins variés.

On connaît assez bien la synthèse des mélanines, dont le composé initial est un acide aminé, la tyrosine. Une chaîne de réactions chimiques conduit à la formation d'un polymère, l'eumélanine, ou mélanine noire. Quand



Photographies de Maurice Pomarède

1. LE PAON doit ses couleurs à la présence d'un pigment noir : la mélanine. En l'absence de ce pigment, il est blanc.

la polymérisation n'a pas lieu, des mélanines plus simples sont formées : ces phaéomélanines engendrent des couleurs allant du brun au roux.

Les mélanines sont à l'origine des couleurs des cheveux et des poils des mammifères. Les cheveux blanchissent quand la mélanine est absente ou dégradée. En s'associant à d'autres

molécules, les mélanines sont à l'origine de couleurs variées. Ainsi la robe du paon, que le mâle déploie en faisant la roue, les irisations du cou des pigeons ou des ailes du corbeau dépendent de la seule mélanine. Qu'une mutation l'élimine, et le paon, le pigeon ou le corbeau blanchissent (voir la figure 1).

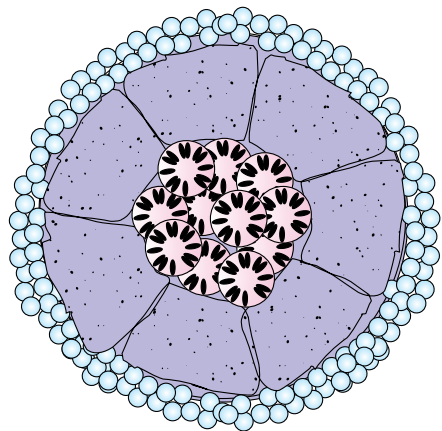
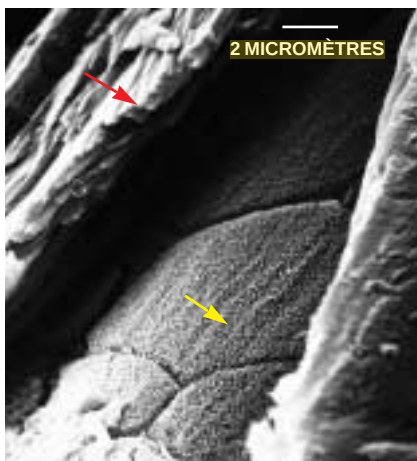
Les couleurs structurales des perruches

Les couleurs des oiseaux résultent toujours d'une décomposition de la lumière solaire ; plusieurs mécanismes sont possibles. Le premier est l'absorption d'une partie de la lumière par les pigments évoqués précédemment :



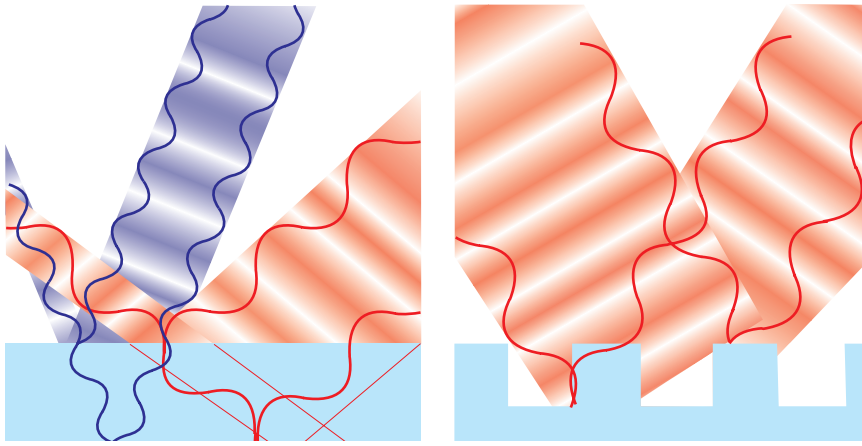
2. PLUME BLEUE D'UNE PERRUCHE : la couleur bleue est donnée par les barbes des plumes. Avec des barbules blanches, on voit

un bleu clair. Ce bleu devient plus foncé quand de la mélanine noire envahit les barbules.

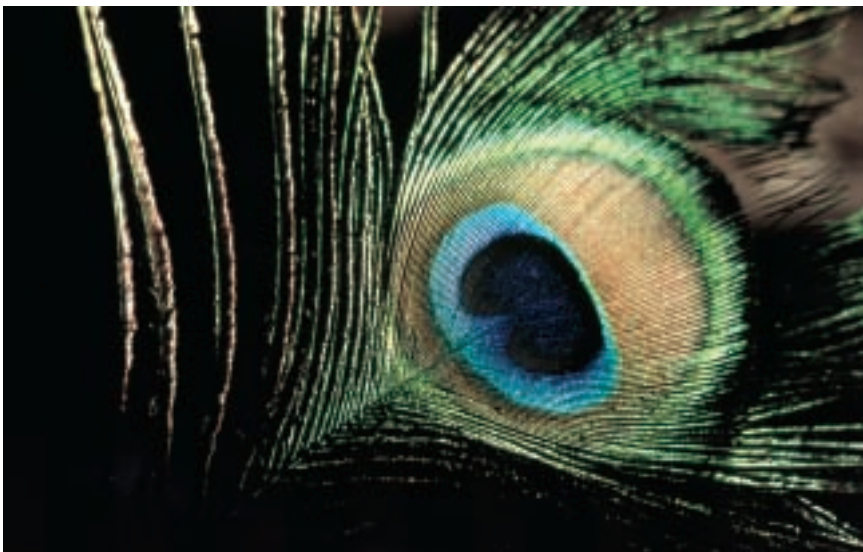
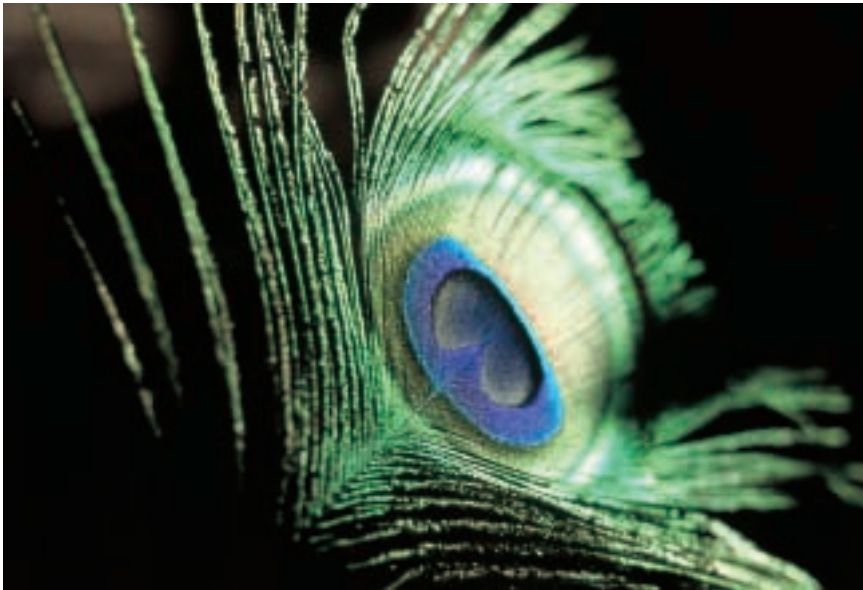


3. CETTE ÉCORCE DE BARBE de plume de perruche (flèche rouge à gauche) est déchirée : elle laisse apercevoir la couche « structurale », composée de cellules géantes (flèche jaune). Leurs granulosités sont dues aux « microgranules » de mélanine. Des restes de membranes subsistent dans le bas de la photographie. À droite, cette

section de barbe d'une plume du même type montre l'écorce, composée de cellules très minces (en bleu clair sur le schéma), la couche de cellules géantes (en violet sur le schéma), et la moelle, composée de cellules rondes (en rose) qui enferment, sous leur membrane, des macromolécules d'eumélanine noire.



4. LA LUMIÈRE réfléchi par la face supérieure d'une lame mince (à gauche) ou d'un réseau (à droite) interfère avec la lumière réfléchi par la face inférieure. Les interférences ne sont constructives que dans certaines directions, qui dépendent de la longueur d'onde. Ce phénomène explique certaines couleurs des plumes d'oiseaux. La présence de mélanine en profondeur supprime les rayons diffractés et évite la recombinaison avec la lumière qui interfère.



5. LES COULEURS D'UNE PLUME DE PAON résultent de sa structure finement divisée. Les variations des couleurs selon l'incidence de la lumière sont caractéristiques des couleurs structurales, dues aux microlamelles.

un pigment rouge, par exemple, est un corps qui absorbe une partie de la lumière solaire (le bleu et le vert, notamment) et renvoie du rouge vers notre œil.

À ces couleurs «pigmentaires» s'opposent les couleurs «structurales», qui naissent de la diffraction des rayonnements lumineux par des microstructures des plumes. Alors que les couleurs pigmentaires sont stables et souvent ternes, les couleurs structurales sont vives, et elles varient souvent selon l'incidence de la lumière. La couleur d'une plume change quand on la fait tourner dans la main : elle passe du bleu au violet, ou du rouge à l'orangé. Si le jaune du canari est d'origine pigmentaire, le bleu de la perruche ondulée et toutes les couleurs du paon sont d'origine structurale. On observe chez les oiseaux trois types de structures qui engendrent ces couleurs.

Vivant en Australie, mais fréquente en élevage, la perruche ondulée a pour couleur principale le vert, avec, aux ailes et à la queue, un dessin gris et noir donné par la mélanine. Par mutation, le vert de certains oiseaux est remplacé par du bleu, du gris, du jaune ou du violet. Comment toutes ces couleurs naissent-elles ? Examinons des sections de plumes au microscope en les éclairant sur un fond noir. Nous passerons ensuite à la microscopie électronique à balayage pour étudier les microstructures responsables des effets observés.

La micrographie de la figure 1, tout d'abord, montre clairement que le bleu naît dans les barbes. Pourquoi ce bleu, quand le seul pigment présent est le noir ou le brun ? Une micrographie électronique à balayage d'une coupe transversale montre que les barbes présentent une mince cuticule faite de cellules aplaties, une couche structurale faite de cellules géantes bourrées d'eumélanine, une moelle faite de cellules arrondies, à la périphérie desquelles se trouvent des macromolécules géantes d'eumélanine. Allongées et juxtaposées, ces macromolécules forment aussi la base de la couche structurale. C'est l'eumélanine, qui donne à la moelle de plume bleue une couleur noire.

Le bleu naît dans la couche structurale. Les microgranules d'eumélanine diffusent la lumière à la manière de la fumée de cigarette : les microgranules sont si petits qu'ils ne diffusent que les plus courtes longueurs

d'onde, c'est-à-dire le bleu. Quand les barbules des plumes sont incolores, comme sur la figure 2, le bleu est clair ; quand elles sont envahies de mélanine noire, le bleu est plus sombre (la lumière non diffusée étant plus absorbée). L'apparition de phaéomélanine dans les barbes et dans les barbules transforme le bleu en violet.

Enfin la présence d'un caroténoïde jaune, en surface des barbes, transforme le bleu en vert. La preuve en est apportée par les mutations qui bloquent l'accumulation du caroténoïde dans les plumes : les perruches ondulées sont alors bleues. Enfin, quand l'eumélanine disparaît, du jaune remplace le vert.

Ce système est caractéristique des psittacidés (aras, perroquets, perruches...), de sorte que des mutations qui atteignent le système de couleur conduisent à des phénotypes analogues chez tous ces oiseaux. On le retrouve chez beaucoup d'autres oiseaux (geais, diamants de Gould), où la couche structurale peut être circulaire ou discontinue. Les couleurs obtenues sont lumineuses.

Les couleurs du paon

Le cas du paon, aux mille couleurs, est différent de celui de la perruche ondulée. Quand on observe une plume de paon au microscope, on voit que toutes les couleurs naissent dans les barbules des plumes. Éclairé sur fond noir, un ocelle (les taches arrondies des paons) s'illumine comme un vitrail : chaque barbule apparaît comme une succession de taches lumineuses dont les couleurs varient selon leur position et selon l'angle d'incidence de la lumière (voir la figure 5).

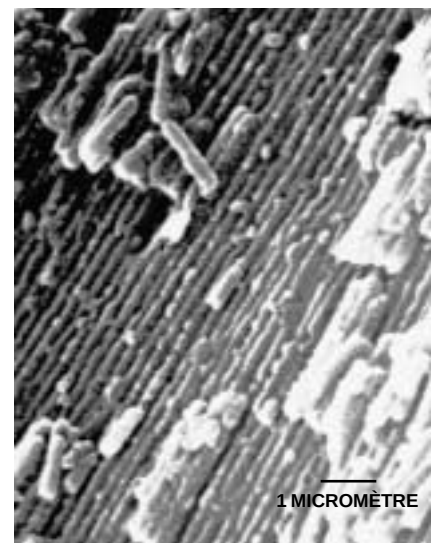
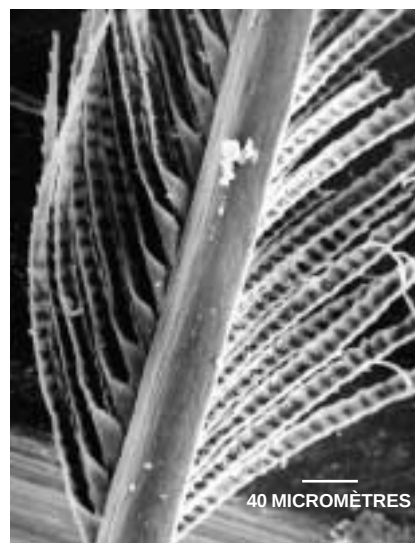
Les barbules sont d'étroites lames faites d'une succession de petites cuvette séparées par un seuil transversal. Le microscope électronique à balayage montre, au fond des cuvettes, de minces lamelles parallèles (voir la figure 6). Ces microlamelles, régulièrement écartées et très nombreuses, produisent diverses couleurs, parce qu'elles provoquent des interférences : les ondes réfléchies par les lamelles successives sont décalées ; quand le décalage est égal à un multiple impair de demi longueurs d'onde, la couleur correspondante disparaît, ce qui renforce la couleur complémentaire. Or la distance que parcourt la lumière pour aller d'une lamelle à la suivante dépend

de la direction d'incidence. Aussi, la couleur change-t-elle avec l'angle d'observation. La mélanine absorbe la lumière qui n'est pas réfléchi et limite les réflexions dans les lamelles. Les barbules colorées reposent sur des barbules noires, et les barbes de plume sont également noires. En l'absence de mélanine noire, une recombinaison de la lumière supprime les couleurs.

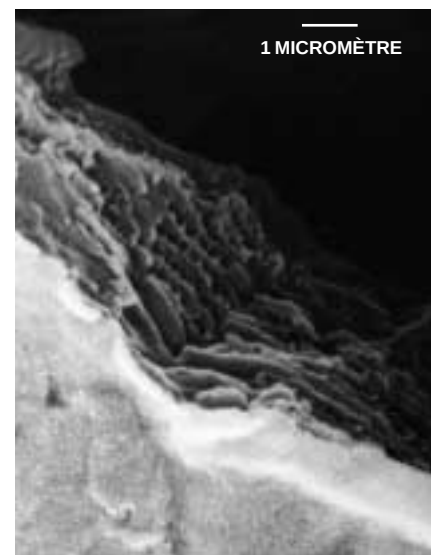
La production de couleurs par microlamelles est caractéristique des phasianidés (paons, faisans, lophophores...) et de nombreux oiseaux aux couleurs vives (paradisiers, trogonidés, nectarinidés), mais aussi des pigeons ou des corbeaux. Ces derniers, comme les coqs, présentent des plumes où les couleurs semblent ruisseler : qu'il

s'agisse du cou du pigeon ou de l'aile du corbeau, les irisations du plumage sont dues à des microlamelles présentes dans des barbules aplaties et parallèles.

On retrouve également des microlamelles dans les plumes des colibris, mais les barbules ont alors, généralement, une forme bien différente de celle des barbules des autres oiseaux : au lieu d'être des lames aplaties, elles sont pliées sur elles-mêmes et disposées en chevrons (voir la figure 7). Les microlamelles localisées dans le feuillet dorsal des barbules produisent la couleur, le feuillet ventral l'étale et la renforce sans doute à la manière des cata-dioptrés. Selon l'incidence de la lumière, deux couleurs peuvent se succéder, et une poitrine peut passer d'un



6. BARBULE DE PLUME DE PAON. Chaque barbule renferme une série de cuvettes (flèche jaune). À droite, on voit les microlamelles du fond de ces cuvettes.



7. SUR LES PLUMES DE COLIBRI (à gauche), les barbules sont pliées suivant leur longueur : on voit ici la face inférieure. Les microlamelles (à droite) décomposent la lumière et engendrent les couleurs.