

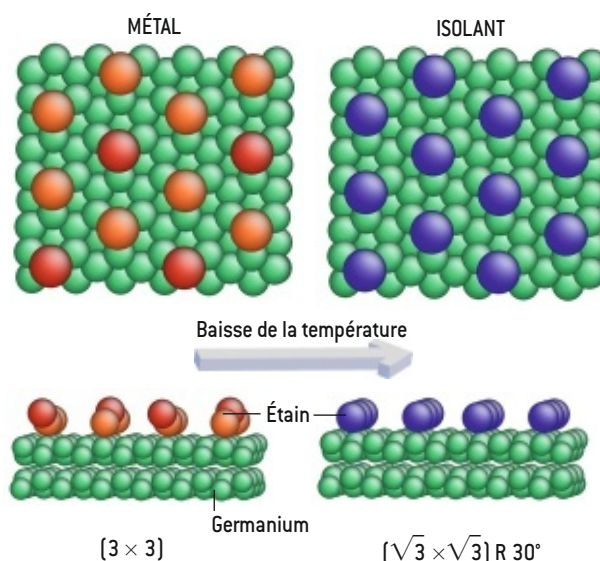
UNE TRANSITION DE PHASE LIÉE À LA STRUCTURE DU MATÉRIAU

La structure cristalline d'un matériau a une grande influence sur ses propriétés électroniques, car une modification de la géométrie du réseau peut affecter directement la structure des bandes. Ce couplage entre la structure cristalline et la structure de bande s'observe par exemple dans le cas du système constitué d'une monocouche d'étain (*en rouge ou en bleu*) déposée sur un substrat de germanium (*en vert*) lorsque la température diminue.

On constate en effet que l'arrangement, ou « reconstruction », noté (3×3) caractérise le système pour les hautes températures et en fait un conducteur. La

maille du réseau atomique de cette reconstruction comprend donc trois atomes d'étain, dont deux sont à la même hauteur et le troisième est surélevé (*ci-contre à gauche*).

Quand la température diminue, le réseau cristallin se réorganise toutefois et adopte la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$, qui en fait un isolant (*ci-contre à droite*). La maille de cette reconstruction ne comprend qu'un seul atome d'étain, et tous les atomes d'étain sont désormais disposés sur le même plan. Dans cette géométrie, les interactions entre électrons deviennent trop fortes pour pouvoir être vaincues avec l'énergie cinétique des électrons, qui ne circulent plus.



A. Mascaraque et A. Tejeda

dans notre système : la reconstruction (3×3) de la phase à haute température est plus grande que la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ adoptée par le système à basse température. La transition que nous avons observée n'étant ni celle d'Anderson ni celle de Peierls, il s'agit bien d'une transition de Mott.

Notre découverte, c'est-à-dire la certitude de l'existence d'une transition de Mott en surface, a été suivie de nombreux travaux sur ce thème. Ainsi, Gianni Profeta et ses collègues et Erio Tosatti, de l'École internationale de Trieste (SISSA), en Italie, ont confirmé par des calculs l'existence d'un état fondamental isolant de Mott pour des systèmes étain sur germanium ou étain sur silicium, qui seraient en plus antiferromagnétiques. Cela signifie que dans ces systèmes, les spins des atomes voisins tendent à s'aligner, mais avec des orientations opposées, au contraire de ce qui est le cas dans les milieux ferromagnétiques. Ces chercheurs proposent que l'augmentation du désordre dans le système (mesuré par l'entropie) est le moteur de la transition métal-isolant.

En 2007, Silvio Modesti et ses collègues, du Laboratoire national pour les technologies avancées et les nanosciences à Trieste, en Italie, ont observé l'état isolant de Mott pour le système étain sur silicium. La structure se révèle semblable à celle du système étain sur germanium,

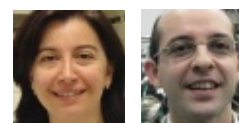
de sorte que la théorie des bandes en fait aussi un système métallique. La photoémission à haute résolution et la spectroscopie locale par microscope à effet tunnel montrent au contraire que ce système présente une transition de Mott et devient isolant au-dessous de 150 kelvins.

Le mécanisme exact de la transition reste à élucider

Tous ces exemples d'isolants de Mott suggèrent qu'un mécanisme général de transition de Mott en surface existe, et qu'il est susceptible de se déclencher aussi sur d'autres surfaces obtenues par dépôt d'une couche métallique sur un substrat semi-conducteur. À ce propos, des études de 2008 et 2009 de Harumo Morikawa, à Séoul, de Stefano Colonna, à Rome, et de leurs collègues confirment la présence d'états peu conducteurs dans les systèmes étain sur germanium à basse température. Cela renforce l'impression que les systèmes à base d'étain sur germanium et étain sur silicium constituent une sorte de prototype de matériau à transition de Mott.

Vers où tout cela mène-t-il ? Si nous disposons grâce à ces avancées d'une classe de systèmes d'étude de la transition de Mott, il reste à élucider son mécanisme exact. Nous élaborons actuellement un modèle de la dynamique de la transition,

LES AUTEURS



Arantzazu MASCARAQUE est professeur de physique à l'Université Complutense de Madrid, en Espagne.



Antonio TEJEDA est physicien à l'Institut Jean Lamour du CNRS, à Nancy.

BIBLIOGRAPHIE

L. Chaput *et al.*, Giant alkali-metal-induced lattice relaxation as the driving force of the insulating phase of alkali-metal/Si(111):B, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, 187603, 2011.

R. Cortès *et al.*, Observation of a Mott insulating ground state for Sn/Ge(111) at low temperature, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, 126103, 2006.

G. Profeta et E. Tosatti, Triangular Mott-Hubbard insulator phases of Sn/Si(111) and Sn/Ge(111) surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 086401, 2007.

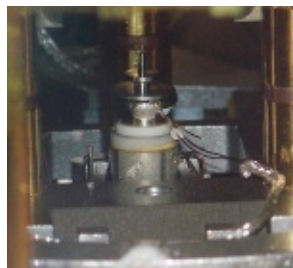
S. Modesti *et al.*, Insulating ground state of Sn/Si(111)-(3x3) R30°, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 126401, 2007.

Le microscope à effet tunnel révèle la topographie d'une surface à l'échelle atomique. Sa pointe effilée se déplace très près de la surface sans entrer en contact avec elle. Des actionneurs piézo-électriques rendent ce mouvement précis à l'échelle atomique (l'angström, soit 10^{-10} mètre). Dans ces conditions, on applique une minuscule différence de potentiel électrique entre la pointe et la surface, ce qui produit un courant par effet tunnel. En d'autres termes, quelques électrons issus de la surface franchissent la barrière d'énergie qui les sépare de la pointe et la rejoignent. Ce courant est utilisé, par l'ordinateur qui contrôle le microscope, comme signal dans

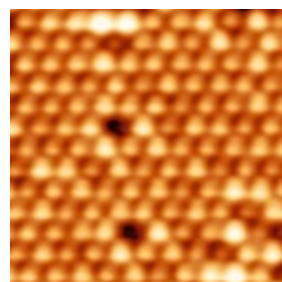
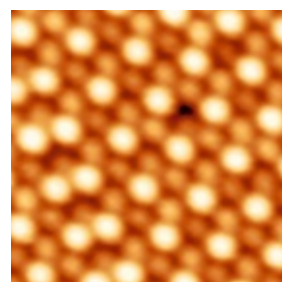
une boucle de rétroaction, qui permet de maintenir constant le courant tunnel, de même que la distance entre la pointe et la surface.

L'enregistrement des mouvements de la pointe au cours du balayage de la surface produit alors des profils de densité électronique, qui permettent de construire une image des orbitales de surface, sorte de photographie des structures électroniques de la surface. Le microscope révèle ainsi la reconstruction notée (3×3) du système étain sur germanium, où les atomes d'étain ont deux altitudes différentes (*en haut à droite*), et la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ où les mêmes atomes se trouvent dans un même plan (*en bas à droite*).

Ainsi, si l'on considère que les positions atomiques et celles des orbitales sont liées, un microscope à effet tunnel permet de « voir » les atomes d'une surface.



Ci-dessus, la tête d'un microscope à effet tunnel au-dessus de la chambre à vide, où l'on place l'échantillon. À droite, les reconstructions du système étain/germanium.



A. Mascaraque et A. Tejeda



A. Mascaraque et A. Tejeda

4. LE MICROSCOPE À EFFET TUNNEL

de l'Institut Jean Lamour, à l'Université de Nancy. C'est l'un des rares dans le monde à autoriser l'étude de la structure à la fois cristallographique et électronique d'une surface sans qu'il soit besoin d'exposer cette dernière à la pression atmosphérique. Il opère dans une gamme de températures allant de la température ambiante à celle de l'hélium liquide (quatre kelvins) et comprend trois cloches à vide ultrapoussé interconnectées mais indépendantes, entre lesquelles un dispositif permet de déplacer l'échantillon étudié.

capable d'expliquer tous les résultats expérimentaux évoqués. Ce modèle sera un point de départ pour étudier la stabilité en fonction de la température des phases métalliques au voisinage des conditions qui permettent l'apparition d'isolants de Mott. Il permettra ainsi de mieux comprendre les phénomènes physiques complexes qui font que nos matériaux s'éloignent des comportements simples prévus par le modèle des électrons quasi libres.

Nous espérons que nous pourrions alors examiner de près les différences éventuelles entre transitions de Mott en surface et en volume comme dans les isolants de Mott classiques. Cette quête est d'autant plus passionnante que les isolants de Mott ont des caractéristiques proches de celles des supraconducteurs à haute température...

Des transistors à isolants de Mott ?

Plus concret, un autre débouché de tous ces travaux pourrait être d'intéressantes réalisations en nano-ingénierie des surfaces. Si, comme le prédisent certains modèles théoriques, un supraconducteur bidimensionnel pouvait être réalisé par dopage d'étain sur du germanium, il reposerait alors sur le semi-conducteur germanium, c'est-à-dire sur un substrat

compatible avec les dispositifs électroniques actuels. De nombreuses applications deviendraient alors envisageables.

De ce point de vue, les isolants de Mott ont déjà trouvé des applications potentielles là où les semi-conducteurs n'en ont pas. Dans un brevet, Shinichiro Iwai, de l'Université de Tohoku, et ses collègues proposent par exemple d'utiliser des isolants de Mott dans un convertisseur de signaux photoélectriques à cadence très élevée (de l'ordre du térahertz), là où les dispositifs à base de silicium ou de germanium ne sont plus fonctionnels.

De leur côté, Dennis Newns, des Laboratoires IBM, et ses collègues ont réalisé des transistors à effet de champ à l'aide d'isolants de Mott de taille nanométrique, échelle à laquelle les techniques actuelles fondées sur substrat de silicium ne fonctionnent plus bien. On sait que le principe opérationnel d'un transistor consiste à changer un canal conducteur en un canal isolant en fonction d'un certain potentiel électrique. Dans un transistor à transition de Mott, ce potentiel sert à créer des porteurs de charges dans le canal, qui suffisent pour doper l'isolant de Mott et le transformer en conducteur. Puisque les transistors sont à la base de tous nos dispositifs électroniques actuels, aurons-nous un jour des transistors à transition de Mott dans nos radios, nos voitures et nos portables ? ■