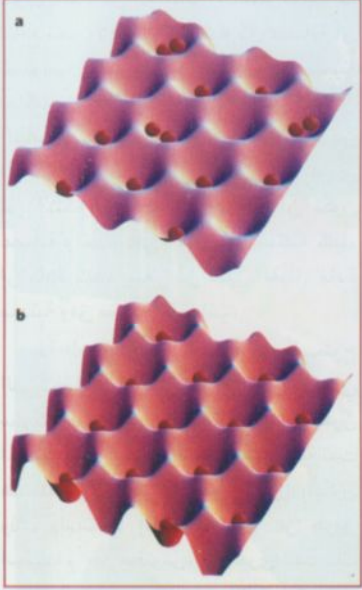


متى لا يكون المعدن معدناً



الشكل 3، التحول (معدن-عازل) يمثّل الشكل (a) ابار الكمون المنتظمة لحالة معدنية عادية لمادة ما ذات إلكترون واحد، (في المتوسط) لكل ذرة. (b) إذا كان الكمون الحاصر الهوى قليلاً (ابار أعمق)، فإن الإلكترونات تواجه صعوبة أكبر في الانزياح عن الموضع ومن ثم لا تكون نافذة -رغم ما تتنبأ به نظرية العصابات. هذه المادة هي أحد عوازل موط، على شاكلة الجرمانيوم المغطى بالقصدير الذي درسه كورتيه وزملاؤه [3].

الغاليوم، بل وحتى السليكون نفسه. وفي معظم الحالات تم استخدام نرات مطعّمة dopant لموافقة عدد الإلكترونات في نصف الناقل وإيصالها إلى النقطة التي تتوقع عندها نظرية العصابات معدناً. وحينما أظهرت الأدلة خلاف ذلك كانت تلازمات موط الإلكترونية ظنيناً طبيعياً.

ورغم الإخفاق الذي يحدث من حين لآخر، فإن نظرية بلوخ ويلسون العصابية تبقى مفيدة لفهم حتى المواد التي تخطئ فهمها. لا يمكن أن يكون للإلكترونات في الجوامد البلورية طاقات اعتباطية، ولا يمكن أن يكون لها نفس الطاقة. وعوضاً عن ذلك، فإن

توفر الاستثناءات من نظرية العصابات تربة خصبة لاختبار أفكار جديدة حول سلوك الإلكترونات في الجوامد. ولربما لم يدل بدلوه أحد أكثر من نيفيل موط N.Mott، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1977. فلقد أشار موط إلى أن التقريب approximation الجوهري لنظرية العصابات-التمثّل في أن كل إلكترون يتحرك بصورة مستقلة، ولا يستشعر تأثيرات الإلكترونات الأخرى إلا في المتوسط- سيخفق بصورة مزرية في بعض الحالات [4]. ويمكن للفيزيائيين في النهاية، وهم مسلحون بهذا التحقيق، أن يفهموا تلك المواد التي تدين بطبيعتها في العزل الكهربائي إلى التلازمات في حركات الإلكترونات المختلفة. تنشأ هذه التلازمات من التدافع الكولوني التقليدي بين الجسيمات التي تحمل شحنات متماثلة ليس إلا. لكن هذه التلازمات يمكن أن تكون حاسمة في مواد تتنافس فيها نزعان للإلكترونات هما أصلاً متوازنتان توازناً ضعيفاً. وهاتان النزعان هما: نزعة الرغبة بالتموضع مكانيًا من أجل تقليل التدافع الكولوني إلى حدّه الأدنى، ثم الحاجة للانزياح عن مواضعها من أجل تقليل الكلفة الناجمة في الطاقة الحركية عن الانحباس المكاني إلى أدنى حدّ.

عادة ما تسود نزعة الانزياح عن الموضع لدى المواد الكبيرة الحجم، وبذلك فهي تمارس النقل، لأن الحرية التي تقدمها الأبعاد الثلاثة تكون أكبر من القصاص الكولوني. ولا يكون الحال كذلك عند سطوح أنصاف النواقل، حيث تكون الإلكترونات محصورة في بعدين اثنين (الشكل 1). وفي الحقيقة، تم ابتداء عوازل موط على مدى العقد الماضي على سطوح العديد من أنصاف النواقل الشائعة، بما في ذلك كربيد السليكون، وزرنيخيد

الإجابة عن هذا السؤال هي، طبعاً، حينما يكون عازلاً. فالمواد التي ينبغي لها أن تنقل الكهرباء نظرياً -ولكنها لا تفعل- معروفة جيداً، لكن السلوك الشاذ لإحدى المواد سبب إعادة نظر خاصة.

كل طالب يعلم الفرق بين المعدن والعازل، فالأول ينقل الكهرباء والأخر لا يفعل ذلك. وتصبح الأمور أكثر أهمية إذا سألنا كيف ينشأ هذا الاختلاف. وبالرغم من أن السؤال بسيط وبشكل خلاب، فالجواب الدقيق والحاسم لم يتوفر إلا حوالي عام 1930، عندما استخدم فليكس بلوخ F. Bloch وألان ويلسون A. Wilson ميكانيك الكم الجديد لتكوين نظرية تميز المعادن عن العوازل [1، 2]. إن النجاح المذهل الذي حققته "نظرية العصابات للجوامد" band theory of solids، كما تعرف اليوم، جعلها حجر الزاوية للنظرية الحديثة للجوامد.

ولكن، في حالات قليلة بارزة للعيان، لا تصيب نظرية العصابات هذه جانب الصحة: فهناك، على سبيل المثال، مواد تعرف باسم عوازل موط Mott insulators تكون عازلة تجريبياً، ومع ذلك تصر نظرية العصابات بعناد على أنها معدنية. وفي رسالة إلى مجلة Physical Review Letters، يلقي كورتيه Cortes وزملاؤه [3] نظرة جديدة على واحدة من هذه المواد (تتمثل في سطح جرمانيوم مغطى بطبقة ممتّزة من نرات القصدير) كانت تحير النظريين والتجريبيين على حدّ سواء. وبالرغم من التوقعات المبنية على التشابه مع مواد مماثلة، فإن التجارب السابقة التي أجريت على هذه المنظومة أخفقت في تكريسها كعازل موط. وجاءت نتائج كورتيه وآخرين في النهاية لتضع هذه النبذة من اللغز في الموضع الصحيح.

الترتيب النوعي للإلكترونات ضمن الجامد يملئ مديات الطاقة المسموح بها-بمعنى عصابات للنظرية العصبية. فالإلكترونات يجب أن تشغل العصابات المتاحة بشكل سردي، بدءاً من العصابة الأخفض طاقياً ثم تتابع نحو الأعلى. وتستطيع كل عصابة أن تستوعب إلكترونين يمتلك كل منهما سبيناً يعاكس الآخر. وينتج عن ذلك أنه إذا كان الجامد أو الأخرى خلية الوحدة الواحدة من الجامد تخصيصاً تحتوي على عدد فردي من الإلكترونات، فعندئذٍ ينبغي أن تكون عصابة واحدة على الأقل غير ممتلئة كلياً. إن مادة كهذه ينبغي أن تكون، يقيناً، مادة معدنية وفق نظرية العصابات.

بدأ البحث وبصورة جديّة عن السطوح التي تحقق هذه الشروط، وإن تكن لا تبدي سلوكاً عازلاً، في التسعينيات من القرن الماضي. ففي إحدى التجارب التقليدية تمت هندسة عازل موط على سطح من السليكون وذلك باستنفاد إلكتروناته أولاً عن طريق استخدام بور مغترس. ثم جرى بعد ذلك امتزاز البوتاسيوم للإمداد بالإلكترونات إلى الحد الكافي الذي يحقق معيار بلوخ-يلسون للمعدن [5]. لكن المعطيات المأخوذة من مطيافية الإصدار الفوتوني (التي تستخدم الضوء لطرده الإلكترونات من المادة وتبيان توزيع طاقاتها) أظهرت وجود فرجة بين العصابات المملوءة والعصابات الفارغة. إن هذا التناقض مع نظرية العصابات أعطى دليلاً قوياً (تم تأكيده أخيراً بصورة نظرية [16]) بأن سطح السليكون المغطى بالبوتاسيوم هو عازل موط.

جرى أيضاً تطبيق استراتيجيّة أخرى مشابهة على سطح من الجرمانيوم، ولكن مع اختلافات مهمة. فبدلاً من تجميعية البور والبوتاسيوم، استخدمت طبقة تغطية وحيدة من الرصاص لتزويد العدد نفسه من الإلكترونات. وعندما برّدت منظومة الرصاص والجرمانيوم هذه إلى ما دون 100 كلفن، ظهرت فرجة طاقة صغيرة، لكنها كانت مصحوبة بميزات جديدة تتمثل في تشوّه دوري متعصّن لطبقة التغطية الرصاصية [7]. وعندما أضيفت بدلاً من ذلك ذرات قصدير (ذات العدد نفسه من إلكترونات التكافؤ الخاص بالرصاص)، لوحظ التعصّن نفسه، لكن الفرجة كانت غائبة بصورة غامضة [8]. لقد قام جدل مقنع [9] بأن التعصّن الذي شوهد عند درجات حرارة منخفضة في المنظومتين هو في الحقيقة تجمد طراز اهتزازي تعاني فيه ذرات القصدير، عند درجات حرارة أعلى، اهتزازات سريعة إلى الأعلى والأسفل. ولكن السؤال الأكبر (وهو: لماذا أبدت منظومة قصدير-جرمانيوم أنها ليست عازلاً من عوازل موط) بقي من دون حل.

إن مساهمة كورتيه وزملائه [3] في القصة ذات شقين. فهم، أولاً كرسوا كون الجرمانيوم المغطى بالقصدير هو بالفعل عازل من عوازل موط، ولكن عند درجات حرارة منخفضة جداً فقط. وهم ثانياً قدموا معطيات إصدار فوتوني ذات مئز زاوي تعطي صورة مفصلة خاصة للتحوّل من معدن إلى عازل، مضيفين بذلك وزناً إلى الاكتشافات السابقة في منظومات ثنائية

العدد ذات صلة. ونشير إلى أن دليلهم الأولي يتألف من أطيايف إصدار فوتوني، مأخوذة عند درجتَي حرارة 12 و140 كلفن تقيس في آن معا توزيع طاقة الإلكترونات وعزومها. فعند درجة الحرارة الأخفض تبدي الأطيايف افتتاح فرجة عازلة كالتّي تتكلم عنها الكتب المدرسية. هذا ويدعم المؤلفون هذه النتيجة باكتشاف ثانٍ مدهش: إذ يختفي التشوّه المتعصّن الذي وجد في تجارب سابقة [8] عند الدرجة 12 كلفن ويعود للظهور سطح منبسط متجانس.

إن مشاهدة الانتقالين الطوريين كليهما -الإلكتروني والبيئي- يجعل الصورة مقنعة بشكل خاص. وهناك تجربة أخيرة تقيس طيف "الإصدار الفوتوني العكسي inverse photoemission" (الذي يكشف توزيع الحالات الفارغة التي تملأ الفرجة تماماً) سوف تحسم الأمر. ومن أجل هذا علينا أن ننتظر تحسينات في الميز. وفي نفس الوقت تستردّ نتائج كورتيه وزملائه إحساس الانتظام لفهمنا المحدود، والمتنامي حول عوازل موط على السطوح. إن مثل هذا الفهم قد يساعد على حل ألغاز أخرى، بدءاً من الناقلية الفائقة عند درجات حرارة عالية وصولاً إلى الذرات الفائقة البرودة. ومع استمرار انكماش أبعاد النماذج الإلكترونية، قد تصبح نظرية موط نفسها حجر الزاوية الجديد في وصف سلوك الإلكترونات عند المقاييس الصغيرة جداً.

نُشر هذا الخبر في مجلة:

Nature, Vol 441, 18 May 2006