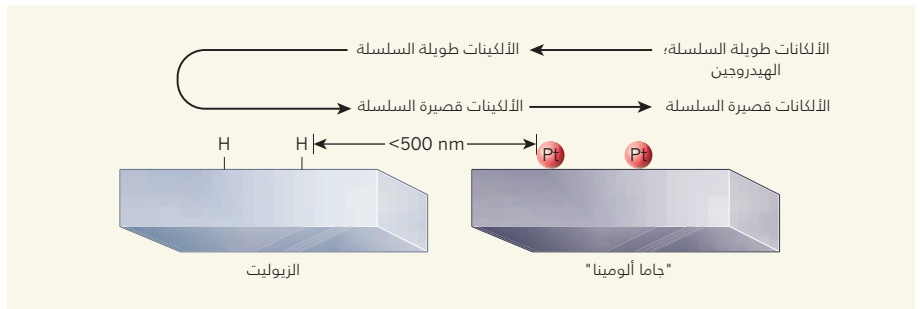


تخلص هذه الدراسة إلى نقطتين مهمتين، يمكن الاستفادة منهما: أولاً، يجب أن تتوحد استراتيجيات التحضير، وتقنيات الإظهار البصري الحديثة، والدراسات المتعمقة لعمليات التحفيز، وأن ترتبط تلك الاستراتيجيات مع بعضها البعض؛ لتحسين كفاءة المحفزات المعقدة متعددة الوظائف. ثانياً، غالباً ما تكون تأثيرات انتقال الكتلة بارزة، لدرجة أنها يمكن أن تتحكم في تحويل المواد المتفاعلة على المحفزات الصلبة⁶. ولهذا.. لا بد من أخذ هاتين النقطتين بعين الاعتبار، وتطويرهما للشكل الأمثل، وذلك ليس بالنسبة إلى المحفز الإجمالي، أو حجرة التفاعل الكلي فحسب، بل أيضاً بالنسبة إلى مواضع العامل المحفز على المقياس النانوي. وهذا يمثل تحدياً للقائمين على التجارب، والباحثين في الجوانب النظرية. وعلى نطاق أوسع، فإن طريقة زيسيفتش وزملائه - المتعلقة بعملية التحكم في البنية النانوية لمحفزات التكسير الهيدروجيني - قد تقيّد في عديد من العمليات الأخرى التي تُستخدم المحفزات الصلبة، بما في ذلك تحويل الموارد المتجددة (مثل الدهون، والزيوت، أو الكتلة الحيوية) إلى منتجات أكثر قيمة، أو "ترقية" الهيدروكربونات الثقيلة إلى مركبات أكثر إفادة. ■

روجر جليسر يعمل في معهد التكنولوجيا الكيميائية، جامعة لايبزيغ، لايبزيغ 04103، ألمانيا.
البريد الإلكتروني: roger.glaeser@uni-leipzig.de

1. van Veen, J. A. R., Minderhoud, J. K., Huve, L. G. & Stork, W. H. J. in *Handbook of Heterogeneous Catalysis* Vol. 6 (eds Ertl, G., Knözinger, H., Weitkamp, J. & Schüth, F.) 2778–2808 (Wiley-VCH, 2008).
2. Zečević, J. et al. *Nature* **528**, 245–248 (2015).
3. Weisz, P. B. *Adv. Catal.* **13**, 137–190 (1962).
4. Martens, J. A. et al. *Angew. Chem. Int. Edn* **34**, 2528–2530 (1995).
5. Garcia-Martinez, J. & Li, K. (eds) *Mesoporous Zeolites* (Wiley-VCH, 2015).
6. Kärger, J., Ruthven, D. M. & Theodorou, D. N. *Diffusion in Nanoporous Materials* Vol. 2, 807–837 (Wiley-VCH, 2012).



الشكل 2 | المسافات البينية بين المواضع النشطة لمحفزات التكسير الهيدروجيني. تتفاعل جزيئات مركب الألكان ذي السلاسل الكربونية الأطول مع الهيدروجين، وذلك في وجود حافز صلب؛ لإنتاج جزيئات ألكان أقصر. وتُسمى هذه العملية بالتكسير الهيدروجيني. ويتكون المحفز من معدن نبيل (مثل البلاتين Pt)، موجود على الداعم وهو مادة "جاما ألومينا"، ومادة صلبة مسامية، تُسمى "زئوليت"، حيث تحتوي على مواضع الحُض (المشار إليها بذرات الهيدروجين)، ويقوم المعدن بتحويل الألكانات طويلة السلسلة إلى ألكينات وسيطة طويلة السلسلة، ثم تنتشر هذه الألكينات بعدها في مواضع الحُض، حيث يتم تماثلها في التركيب، وتكسيدها إلى ألكينات قصيرة السلسلة، ثم تنتشر هذه الألكينات في مواضع البلاتين، حيث تتفاعل مع الهيدروجين لتشكيل الألكانات قصيرة السلسلة، مع ملاحظة أن الألكينات تنتشر بين مواضع المعدن والحُض بنسبة محدودة، إذا كانت المسافة بين المواضع أكبر من 500 نانومتر. وقد أُعد زيسيفتش وزملائه² محفزات ذات انتقائية تحفيزية مطورة، بالمقارنة بالمحفزات التقليدية، وذلك عن طريق التحكم في المسافة بين مواضع الحُض والمعدن على مقياس النانو.

بشكل مقنع - أنها صالحة للزئوليت ذي المسامات الكبيرة، وهو موضع دراسة زيسيفتش وزملائه. لذلك.. من الواضح أن النشاط الحفزي والانتقاء لا يعتمدان على المسافة بين المواضع النشطة والأبعاد الجزيئية للمواد المتفاعلة فحسب، بل يعتمدان أيضاً على إمكانية وصول الجزيئات إلى المواضع النشطة، وعلى معدل نقل الجزيئات بين المواضع. وقد تكون هذه العوامل أكثر أهمية عندما تتم معالجة مواد التغذية الأكثر تعقيداً، مثل الدهون والزيوت المستخلصة من الموارد المتجددة، أو عندما تحتوي المحفزات على أكثر من نوعين من المواضع النشطة، أو على نظم بنوية مسامية معقدة³. وفي مثل هذه الحالات.. يُعتبر إثبات فوائدها تقارب المواضع بالمقياس النانوي أكثر صعوبة بالمقارنة مع عملية التكسير الهيدروجيني البسيطة نسبياً للمواد الهيدروكربونية وحيدة العنصر الخاصة بمحفز "زئوليت-بلاطينيوم" ثنائي الوظيفة المدروس هنا.

فيزياء الكم

تشابك يتعدى إطار الأيونات المتماثلة

توسيع نطاق التحكم في الجسيمات الكمية يسمح بالتشابك والترابط غير التقليدي لأنواع مختلفة من الأيونات، ما يتيح فرصاً لتطوير تقنيات كمية جديدة.

توبياس شيتن

مثيل، ما سمح لهم باتخاذ الأيونات المحاصرة كميّة تجريبية لتكنولوجيا الكم، وتقييم إمكاناتها العملية من أجل توظيف التأثيرات الكمية في تطبيقات، مثل الساعات الذرية، والحوسبة الكمية. تتطلب ميكانيكا الكم أن تكون الأجسام قادرة على الوجود بحالتين مختلفتين في آن واحد، وإن تعارضتا. ولتصور مثل هذا التراكب، تخيل إبرة ممغنطة في بوصلة كمية افتراضية، تشير إلى الشمال والجنوب في الوقت نفسه؛ فربما اتجه الإبرة سيخلص عشوائياً إلى احتمال

التشابك ظاهرة متميزة، تؤدي إلى اشتراك جسيمين أو أكثر في حالة كمية واحدة، أي أنه لا يمكن وصف كل جسيم بشكل مستقل. وقد أشار تان وزملائه¹، وبالانس وزملائه² - في بحوث نشرها - إلى رصدهم لأول مرة أزواج من الأيونات المتشابكة المتضمنة نوعين ذريين مختلفين؛ إذ استخدموا هذه الأنظمة المتشابكة لاختبار التنبؤات المحيرة لميكانيكا الكم بدقة، لم يسبق لها

نشاط المحفز والعملية الانتقائية. كما أظهر الباحثون أن ما يحدث في عملية تحويل كل من مركب "n-ديكان" *n-decane*، والمركب ذي السلسلة الأطول "n-نانو ديكان" *n-nonadecane* إلى منتجات أخرى عن طريق التكسير، هو نفس ما يحدث في عملية استخدام المحفز، الذي تقوم فيها مادة "جاما ألومينا" بدعم البلاتين، وهذا ما يحدث عند تحقيق معيار درجة التقارب المحددة لتنشيط هذه التفاعلات، إلا أن عملية تحويل البريستان - وهو أحد مركبات الألكانات ذات الجزيئات كبيرة الحجم - تحدث بمعدل أقل مما كانت عليه في المركبات الأخرى، مما يدل على أن انتشار المركبات الوسيطة للتفاعل بين المواضع النشطة للمعدن والحُض يحد من النشاط التحفيزي في هذه الحالة.

وما يثير الدهشة في هذا الأمر هو أن غالبية المنتجات المُصاغة - متماثلة التركيب - المرغوبة، ومنتجات ثانوية قليلة غير المرغوبة الناتجة عن عملية التكسير، يتم تشكيلها من مركب "النانو ديكان" بشكل أكبر من مركب "الديكان"، وذلك عند استخدام محفز "بلاطين-ألومينا" بشكل أكبر منه عند استخدام محفز "بلاطين-زئوليت". وهذا يدل على أن انتقاء التفاعل للمنتجات المرغوبة يكون أعلى عند استخدام المحفز الأول، إلا أن مواضع المعدن والحُض متقاربة من بعضها البعض في المحفز الثاني أكثر مما هي عليه في المحفز الأول، وبالتالي يبدو أن الفرق في انتقائية المنتج يتناقض مع الفهم التقليدي لمعيار درجة التقارب. ويمكن تفسير هذا عند استغراق الجزيئات الهيدروكربونية ذات السلاسل الأطول قدرًا أكبر من الزمن في مركب الزئوليت ذي المسامات الدقيقة في المحفز الثاني، وبالتالي تمر بعمليات تكسير متعددة في مواضع الحُض.

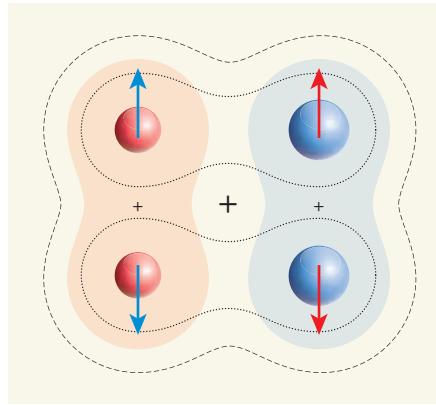
وعندما تستقر جزيئات البلاتين على مادة "جاما ألومينا"، بحيث تظل قريبة من المواضع الحمضية، تنتشر الألكينات الوسيطة الناتجة عن عملية التكسير الهيدروجيني باتجاه الزئوليت، وتتماثل في التركيب بسرعة. ويرى الباحثون أن تفاعلات الألكينات تحدث على مقربة من السطح الخارجي لبورات الزئوليت، بحيث يمكن أن تُلفظ بسهولة، وتُحمل من جديد إلى مواضع المعادن على مادة "جاما ألومينا". ورأى الباحثون أنفسهم³ أن هذه الآلية مسؤولة عن تفاعلات الهيدروكربونات طويلة السلسلة على الطبقات الخارجية للزئوليت ذي المسام متوسطة الحجم. وقد اتضح الآن -

النظري لمتباينة "بل" 2.236؛ كما يرصد الباحثون انتهاكاً بمقدار 2.228، مع نسبة شك تشير إلى أن القيمة تختلف بخمسة عشر انحرافاً معيارياً عن أي وصف قديم. إن تلك النتائج تؤكد أنه يمكن للعلم والهندسة على مستوى الكميات الفردية اكتشاف ووصف ميكانيكا الكم بدقة، لم يسبق لها مثيل، وبكفاءة تقترب من 100%. كما توضح كذلك بشكل رائع كيفية قياس ومقارنة الأداء الكمي الكلي لنظام ما، إذ إن قُرْب قدر الانتهاكات المُثبتة تجريبياً من الحدود النظرية يُتيح قياس جودة وأداء ودقة العمليات الكمية، وتمثيل كل منها برقم.

وإضافة إلى ذلك... تحسّن النتائج بشكل كبير من إمكانيات تصميم أجهزة تستخدم التراكب والتشابك، من خلال الأيونات المحاصرة، أو أنظمة أخرى ذات صلة، كمصادر يمكن الاعتماد عليها. ويمكن الآن لمهام مختلفة ضمن بروتوكول تجريبي عام أن تُخصص للنوع الذري الأنسب للغرض المطلوب، مثل الذاكرة الكمية، والقيام بالعمليات المنطقية ذات التأثير الضعيف على عناصر الذاكرة الكمية القريبة، والتواصل مع أجهزة مبنية على مَصْنَعات تكنولوجية أخرى، مثل الأجهزة الضوئية، أو الترانزستورية. يُمهد ذلك الطريق لتحليل طيفي دقيق، وساعات فائقة الدقة، وأجهزة محاكاة للنظم الكمية، كما يمكن أن تتيح النتائج تصميم حواسيب كمية عامة، قادرة على إجراء عدة مهام مترابطة ومتراكبة بالتوازي، ما يوفر أداء أفضل بكثير من المتاح حالياً باستخدام الحواسيب العادية، إذ يمكن - على سبيل المثال - بلوغ سرعات مضاعفة؛ لإجراء تطبيقات معينة. ■

توبياس شيتز يعمل في معهد الفيزياء بجامعة ألبرت لودفيج بفرايبورج، فرايبورج 79104، ألمانيا.
البريد الإلكتروني: tobias.schaetz@physik.uni-freiburg.de

1. Tan, T. R. et al. *Nature* **528**, 380–383 (2015).
2. Ballance, C. J. et al. *Nature* **528**, 384–386 (2015).
3. Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. *Phys. Rev. A* **47**, 777–780 (1935).
4. Aspect, A., Grangier, P. & Roger, G. *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91–94 (1982).
5. Rowe, M. A. et al. *Nature* **409**, 791–794 (2001).
6. Hensen, B. et al. *Nature* **526**, 682–686 (2015).



الشكل 1 | تشابك أيونين مختلفين. يمكن للأيونات الفردية أن توجد في حالة كمية واحدة من حالتَي التحرك المغزلي: إما أن تكون متجهة إلى أعلى (↑)، أو تكون متجهة إلى أسفل (↓). تسمح ميكانيكا الكم للأيونات بتكوين حالة تراكب (↑↓)، يمكن فيها للحالتين أن توجدًا في الوقت نفسه. أُعِدّ تان وزملاؤه، وبالانس وزملاؤه² أزواجًا متشابكة من الأيونات، مكونة من نوعين ذريين مختلفين، إما عناصر مختلفة، أو نظائر مختلفة من العنصر نفسه. ظهر كل أيون وكأنه في حالة تراكب (↑↓) - المناطق المظلمة - بيد أن التشابك يولد حالة مترابطة (↑↓↑↓)، تحدّها الخطوط المنقطعة الظاهرة في الرسم، بينما تشير الخطوط المنقطعة إلى الارتباطات المغزلية. وهو ما يعني أن قياس حالة أي أيون منهما يؤثر على حالة الآخر في اللحظة ذاتها؛ أي أن الأيونين اللذين اعُتبرا مستقلين في السابق، لا بد الآن من اعتبارهما كيانًا واحدًا.

الطبيعة. ومنذ ذلك الحين، تم استبعاد أي أوجه قصور محتملة في أي تجارب مجرّاة؛ للبحث عن انتهاكات متباينة "بل"⁵، إلا في حدود الخطأ الإحصائي. فمن جانبه، أشار تان وزملاؤه إلى حد انتهاك، تصل قيمته إلى 2.70، مع بعض الشكوك التي تستبعد أي وصف قديم للطبيعة، إذ تعادل نتائجهم الابتعاد بنحو 40 انحرافاً معيارياً عن القيمة التي يمكن الحصول عليها باستخدام التفسيرات القديمة. وبحساب الأخطاء التي حدثت أثناء الإعداد لدراسة بالانس وزملاؤه، وأخطاء قراءة النتائج فيها، يبلغ الحد الأقصى

الميكروبيوم

النباتات ومجتمعاتها المجهرية

إن العمليات واسعة النطاق، التي تُجرى لاستنبات البكتيريا المستوطنة لأوراق وجذور نباتات *Arabidopsis*، وكذلك رصد تتابع الجينوم الخاص بها، مهّدت الطريق للبحث في كيفية تكوين المجتمعات الميكروبية، وكيفية قيامها بعملها.

جوين إيه. بيتي

الميكروبات في صحة النباتات والحيوانات، ووجودها في لب الكثير من العمليات البيئية إلى تقديم مقترحات لإنشاء مبادرات دولية وأمركية² خاصة بدراسة الميكروبيوم؛ الأمر الذي سلط الضوء على الحاجة المُليحة لاستنبات وتنمية مجموعات من الكائنات، بغرض البحث التجريبي في كيفية عمل مجتمعاتها الأصلية وتكوينها¹. يصف باي وزملاؤه³ في بحث نشره مجموعات البكتيريا المُستنبطة، التي رُصدت تابعها الجينومي، والتي تمثل غالبية أنواع الميكروبيوم المرافقة في الأصل للجذور والأوراق في نبات *Arabidopsis*

تعيش مجموعات كبيرة متشابكة من الكائنات المجهرية في التربة، وفي البحار المحيطة بنا، وفي أجسامنا كذلك. وتكوّن هذه الكائنات - بمحتواها الجينومي - علاقات وطيدة مع النباتات التي تسكن معها، حيث يمكن لها أن تحسّن من امتصاص الغذاء فيها، وأن تعزز من نموها، ومقاومتها لمسببات الأمراض، وكذلك الآفات والضغوط البيئية. وقد أدّى إدراك الدور الجوهري - مؤخرًا - الذي تلعبه تلك

من احتمالين، غير معلوم، وغير محدد مسبقًا، أما في حالة وجود إربتين، فيمكن لهما أن تتشابك، وحين تتشابك الأجسام، تحدّد الحالة العشوائية تمامًا المرصودة لأي جسم منهم حالة الجسم الآخر في اللحظة ذاتها. لذا.. فنتيجة رصد الحالة لحظية، ولا تعتمد على المسافة بين الأجسام المتشابكة.

كان أينشتاين ضمن مؤسسي نظرية ميكانيكا الكم، لكنه أدرك هو وزملاؤه أن تبعات مسألة التشابك مناقضة بشدة للحسّ الحدسي، والمفاهيم المنطقية المستندة على الفهم الأصلي للطبيعة، ما دفعه هو وغيره إلى طرح بعض التجارب الإبداعية³، التي يمكن أن تُستخدم لإظهار أن نظريتهم كانت بعيدة عن الاكتمال، إلا أن المتطلبات العملية الأساسية اللازمة لإجراء تلك التجارب بدت وكأنها تتجاوز قدرات أيٍّ من الباحثين في ذلك الزمن، أو حتى في المستقبل، ما دفعهم لتسميتها "Gedankenexperiment"، أي "تجارب فكرية".

وبذلك.. تأتي أبحاث تان وزملاؤه، وبالانس وزملاؤه لإظهار دقة نظريات ميكانيكا الكم، حتى في حالة تشابك جسمين غير متطابقين؛ إذ قام تان وزملاؤه بتشبيك أيون بريليوم-9 (${}^9\text{Be}^+$) مع أيون مغنسيوم-25 (${}^{25}\text{Mg}^+$)، في حين استخدم بالانس وزملاؤه اثنين من نظائر الكالسيوم، ${}^{40}\text{Ca}^+$ و ${}^{43}\text{Ca}^+$. ولتتصوّر كيف قاموا بإحداث التشابك، افترض أن أيونات كل زوج هي بمثابة إبر مغمطة يمكن أن تشير إلى اتجاه واحد من اتجاهين. يشبه هذا السلوك سلوك جسيم يدور بعزم مغزلي بقيمة $\pm 1/2$ ، أو $-1/2$ ، تلك القيم غير المرتبطة ببعضها هي أحد الأشكال الكمية للعزم الزاوي.

ويُنشأ مجالات ضوئية مناسبة بواسطة أشعة ليزر، أو مجالات موجات ميكروويف، ينشأ تفاعل مغناطيسي حديدي يدفع الحركة المغزلية لتلك الأجسام المختلفة إلى التماثل. وبعبارة أخرى.. إذا أُعِدّ الأيون الأول بحيث تظل حركته المغزلية متجهة إلى أعلى نحو الشمال (↑)، فسيضع التفاعل المغناطيسي الحديدي حركة الأيون الثاني في الاتجاه نفسه (↑).

بطريقة مماثلة.. أُعِدّ الباحثون الحركة المغزلية الأولى في حالة من التراكب (↑↓)، عن طريق إبطال المجالات الإشعاعية التي تغيّر الحركة المغزلية، بعد الالتفاف 90 درجة، ثم استحثوا تفاعلًا مغناطيسيًا حديديًا، يضع الحركة المغزلية الثانية في حالة تراكب متشابكة مع الأولى، تتبع الترتيب المغناطيسي الحديدي (↓↑↑↓)؛ أي أن الجزء المتجه إلى أعلى (↑) في حالة التراكب الخاصة بالأيون الأول يتسبب في التفاف اتجاه الأيون الثاني إلى أعلى (↑)، والجزء المتجه إلى أسفل (↓) يتسبب في التفاف الأيون الثاني إلى أسفل (↓) (الشكل 1). وهنا، انضحت الطبيعة الكمية لتلك العلاقة الناشئة، وحين قام الباحثون برصد الحركة المغزلية للأيون الأول فقط؛ كانت النتيجة عشوائية تمامًا، لكنها حددت حركة الأيون الثاني في اللحظة ذاتها، فبالرصد... كانت حركة الثاني دائمًا مطابقة للأول.

من الممكن إيجاد ترابط بين عمليات رصد الأجسام التقليدية، خاصة مع وجود متغيرات مخفية، أو غير معروفة، لكن تقليدية. ويمكن استنباط الترابط الأضخم في شكل متباينة رياضية، تُسمى متباينة "بل" Bell. في التجارب الحالية، يُستخدم شكل مختلف منها، يُسمى متباينة "بل" CHSH، تبلغ قيمة الحد الأقصى للارتباطات التقليدية فيها 2، لكن التشابك يتطلب ارتباطات كمية تتجاوز هذا الحد؛ ما يعني أنه يمكن انتهاك متباينة "بل" بحد أقصى يقارب 2.828.

ويُجرى الاختبارات التجريبية لمثل تلك الانتهاكات للمرة الأولى⁴ في عام 1982، بُت أن التشابك ضروري لوصف