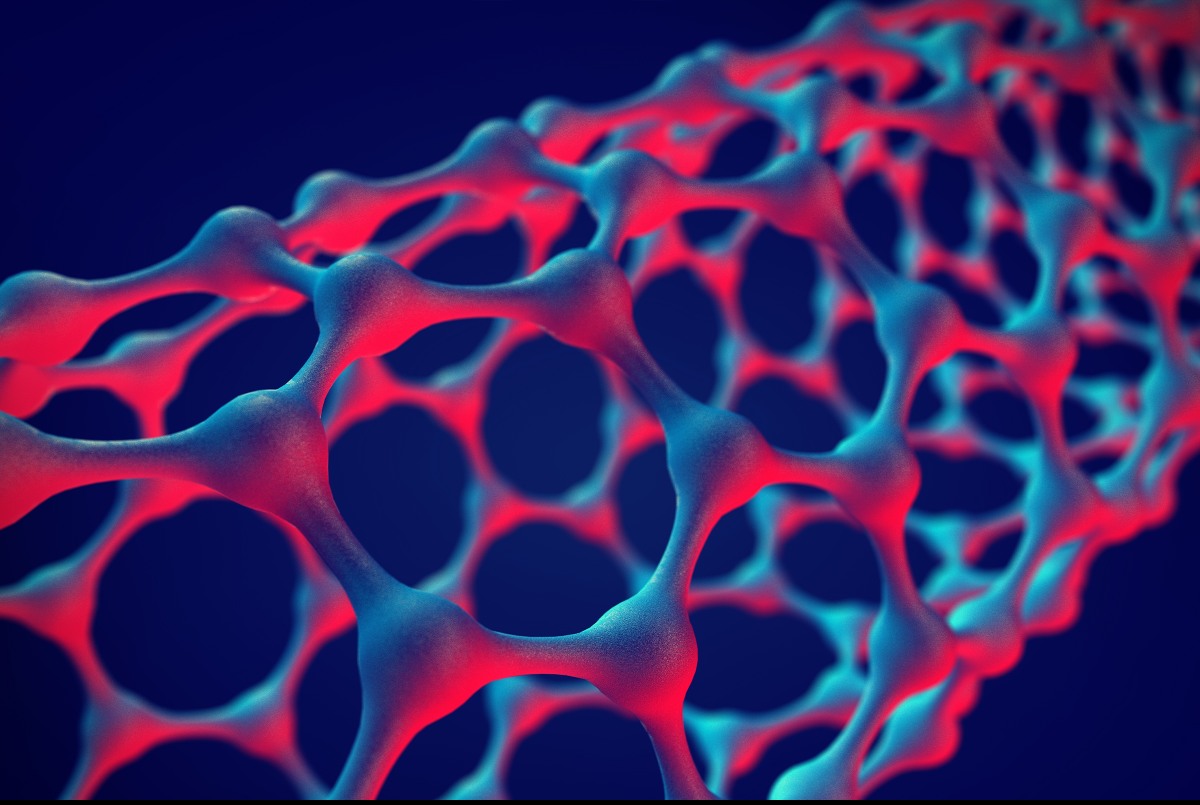


مقدمة قصيرة جدًا

فيليب موريارتي

تكنولوجيا النانو

ترجمة لاميس عبد الحافظ سعيد

تكنولوجيا النانو

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فيليب موريارتي

ترجمة
لاميس عبد الحافظ سعيد

مراجعة
شيماء طه الريدي

هنـــداوي

تكنولوجيا النانو

فيليب موريارتي

Nanotechnology

Philip Moriarty

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، ونديسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٦ ٣٧٣٣ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢٢.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٤.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر جامعة أكسفورد.

Copyright © Philip Moriarty 2022. *Nanotechnology* was originally published in English in 2022. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Hindawi Foundation is responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

المحتويات

تمهيد	٧
١- مرحبًا بك في عالم الأقزام النانوية	١١
٢- عالَم الكمِّ محاصرًا	٢٧
٣- التفكيك التنازُلي، والبناء التصاعدي	٥٣
٤- المعلومات أصل الموجودات	٧٩
٥- الآلات النانوية	٩٧
٦- هل باتت الروبوتات النانوية على مقربة؟	١١١
قراءات إضافية	١٢١
قائمة الصور	١٢٧

تمهيد

«نانو: كلمة مُشتقة من فعل يوناني معناه «جذب التمويل للأبحاث».»

أُقرُّ بأني مُتخصص في علوم النانو، لكني لا أُنكر أني أُحب تعريف كلمة «نانو» الساخر المذكور أعلاه الذي صاغه جورج سميث، أستاذ علم المواد المُتفرغ بجامعة أكسفورد. تُسلِّط نبرة سميث المُتهكِّمة الضوءَ على مسألة مُهمة تُهدد أيَّ مقدمة تتعرَّض للجانب العلمي والتكنولوجي للعالَم المُتناهي الصِّغر؛ فالقابعون على الجانب المتشكك يجادلون بأن تكنولوجيا النانو ليست أكثر من مجرد تطبيق عملي للكيمياء المُتقدمة وفيزياء الجوامد وعلم المواد، أو جميعها معًا، حتى باتت كلمة «نانو» المُنتشرة الآن على نطاق واسع بوصفها بادئةً تسبق كثيرًا من المُصطلحات، أداةً تسويقية جذَّابة أكثرَ منها توصيفًا علميًّا. وقد عبَّر كيفين كيلهر عن هذا بأسلوب ينمُّ عن بُعد نظر في مقاله «لهذا السبب لم يَعُد أحد يتحدَّث عن تكنولوجيا النانو» المنشور في مجلة «تايم» في أكتوبر ٢٠١٥ قائلًا:

> من بين كل صيحات وهوس الاستثمار خلال العقود القليلة الأخيرة، لم ينتهِ أيٌّ منها بالخيبة والفشل الذريع مثلما فعل جنون الاستثمار في أسهم شركات تكنولوجيا النانو. قبل عشر سنوات كان أصحاب رأس المال المُغامر يتسابقون للاستثمار فيها، وازدهر كثيرٌ من الشركات الناشئة التي تحمِل كلمة «نانو» ضمن اسمها، بل وأُطلقت بضعة صناديق تمويلية في مجال تكنولوجيا النانو أملًا في اللحاق برَكْب هذا المجال الصاعد.
>
> واليوم؟ لم يَعُد أحد في أسواق الأوراق المالية يتحمَّس عندما يسمع عبارة «تكنولوجيا النانو».

حتى علماء النانو أنفسهم سئموا الضجَّةَ المُبالَغ فيها المُثارة حول علوم النانو. بعد أن طُلب منِّي تأليف هذا الكتاب بقليل، نُشرت ورقة علمية عن المادة المُعجزة الجرافين (انظر الفصل الثالث) في دورية «إيه سي إس نانو» العلمية المرموقة الصادرة عن الجمعية الكيميائية الأمريكية، وكان عنوان البحث لاذعًا حدَّ البراعة: «هل يرفع من قدرة الجرافين على الحفز الكهربي أي هراء نضعه فيها؟» (إل وانج، زد سوفر، إم بوميرا، دورية «إيه سي إس نانو» ١٤، ٢١ (٢٠٢٠)).

منذ ظهور علم النانو في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن الماضي، كان لدى مُجتمع علماء المجال استعدادٌ بالِغ لتقديم وعود مُبالَغ فيها عن الإمكانيات التطبيقية لاكتشافات النانو في الواقع، سواء كان الحديث عن الاكتشافات الجوهرية للمجال أو الأبحاث العادية. وفي الوقت ذاته قُرِنت كلمة «نانو» بمجموعةٍ لا تُحصى من الأسماء والأفعال، وغالبًا ما كان ذلك محاولةً لإضفاء بريقٍ عصري مُلائم على بحث أو طلب تمويل: فلدَينا جسيماتٌ نانوية، وأنابيب نانوية، وعناقيد نانوية، وفقاعات نانوية، ورقائق نانوية، ومكعَّبات نانوية، وجيتارات نانوية، والقرصنة النانوية، والنحت النانوي، والطب النانوي، والإلكترونيات النانوية، وتكنولوجيا النانو الحيوية، والبناطيل النانوية؛ بل ولدَينا حتى عائلة من الخضراوات النانوية (كرنب نانوي، وبروكلي نانوي، وقرنبيط نانوي وجزَر نانوي؛ وليس هذا من قبيل المزاح)، وهذه المصطلحات صيغت واستُخدمت في المقالات العلمية أو في مقالات تبسيط العلوم أو كليهما، التي تتحدَّث عن التطورات في تكنولوجيا النانو. وهذه القائمة لا تشمل كلَّ الأمثلة بالتأكيد. (يُمكننا أن نعتبرها عينةً «نانوسكوبية» من الأمثلة لا أكثر.)

يقتبس ديفيد بيروبي في كتابه «صيحة النانو» (عن دار «بروميثيوس بوكس» للنشر عام ٢٠٠٦) تصريحًا للسيناتور الأمريكي رون وايدن أثناء حديثه في إحدى جلسات الاستماع لمشروع قانون أبحاث وتطوير تكنولوجيا النانو للقرن الحادي والعشرين (الذي وقَّعه الرئيس جورج بوش الابن في ديسمبر ٢٠٠٣) يقول فيه:

> الدعابة المنتشرة الآن في الوسط العِلمي هي أن الجميع باتوا يعملون على مستوى النانو. فكما كان الجميع في التسعينيات يضعون «دوت كوم» في نهايات الأسماء التجارية، يُضيف الجميع الآن وصف «نانو» إلى مَبحثهم العلمي.

يبدو إذن أنه حتى قبل عقدَين (في وقت تأليف هذا الكتاب) كنا قد سمِعنا ما يكفي وزيادة من المُسمَّيات المصحوبة بكلمة «نانو» الطنَّانة. قد يكون من المنطقي إذن أن نتساءل

إن كانت تكنولوجيا النانو ليست أكثرَ من مجرد خدعة ووهْم. أهي حقًّا مجرد حالة من الضجة والغلو والغطرسة؟ أم إنَّ ثمَّة شيئًا جوهريًّا يتم وراء الكواليس ولا نراه؟ أيُمكن أن تكون كل هذه المليارات من الجنيهات/الدولارات/اليوروهات (اختر العملة التي تشاء) التي أنفقتها الحكومات حول العالم للاستثمار، ومراكز الأبحاث المُعتمدة التي ظهرت بين عشيةٍ وضحاها كما يبدو، والتزايد المطرد في الدوريات العلمية التي تحمل كلمة «نانو» بطريقةٍ أو بأخرى في اسمِها، هل يمكن أن يكون كل ذلك خدعة؟

ستقدم هذه «المقدمة القصيرة جدًّا» الحُجج الداعمة لتكنولوجيا النانو في مواجهة كل هذا التهكُّم. وبغضِّ النظر عن الانتقادات المُبررة التي قد تُوجَّه في استخدام هذه الكلمة، سنرى أن العلوم والتكنولوجيا على المستوى النانوي — وسنتناول بشيءٍ من التفصيل ما تعنيه هذه العبارة عمليًّا — تُعَد مع ذلك مجالات بالِغة التشويق ورائدة، بل وثورية، للبحث والتطوير. فجزء هائل من العالَم المحيط بنا، بما في ذلك كل جوانب تكنولوجيا الحوسبة التي ظهرت في القرن الحادي والعشرين، ينطوي على العلوم والهندسة على مستوى النانومتر.

لقد باتت تكنولوجيا النانو الآن الأساس الذي يدعم الكيفيةَ التي نسبِر بها أغوار المادة ونتحكَّم فيها بطرقٍ لم نكن نتخيَّلها حتى قبل جيلٍ من الآن، بداية من الأساسيات حتى التطبيقات العملية، ومن أدقِّ مسائل ميكانيكا الكم حتى ارتداد كُرات التنس. إن هذا الكتاب هو محاولتي للوقوف على جوهر عِلم النانو، وتوضيح أسباب اختلاف علوم النانو عن مجالات العلوم التقليدية — وإن كانت مزيجًا منها أيضًا — وتسليط الضوء على بعضٍ من أروع الجوانب البحثية في هذا المجال. تتراوح هذه الجوانب من معالجة المادة الموجَّهة بالكمبيوتر على مستوى الروابط الكيميائية المُفردة، وحتى تطويرِ آلاتٍ نانوية تعمل عن طريق تسخير علماء النانو مبادئَ التصميم في الطبيعة.

وفي مجالٍ يتطوَّر بمثل هذه السرعة كتكنولوجيا النانو، لا يسعني سوى تقديم لمحةٍ سريعة عن أحدثِ ما ورد فيه وقت تأليف الكتاب. كان هدفي أن تكون الأمثلة التي تَخيَّرتها لتناول هذا العلم أحدثَ ما يمكن، لكن أعتقد أنه إذا اقتضتِ الحاجة يومًا نشْرَ طبعةٍ جديدة من هذا الكتاب، فسيكون هذا في القريب العاجل.

بصفتي قارئًا نهِمًا لهذه السلسلة، فقد سُرِرت حين تلقيتُ دعوة من لاثا مينون، مُحرِّر تكليف أول في دار نشر جامعة أكسفورد، لكتابة مقدمة قصيرة جدًّا لتكنولوجيا النانو. كان ذلك منذ أربعة أعوام. لذا أودُّ أن أُعبِّر عن خالص امتناني للاثا وزميلها جيد

ديكسون، مُحرر المشروعات في دار نشر جامعة أكسفورد، لصبرهما الجمِّ على إخلافي لمواعيد التسليم طوال هذه المدة. فتعديلات لاثا وتعقيباتها لم يكن لي غِنًى عنها طوال الوقت، سواء فيما يتعلَّق بإيجاد النبرة الصحيحة للسلسلة أو حذف استطراداتي الثرثارة البعيدة عن الموضوع. فهذه السلسلة تتطلَّب الدخولَ في صلب الموضوع بأسرعِ ما يمكن — وهو ما لا أُجيده تمامًا — وقد ساعدت تعديلات لاثا وجيد ومقترحاتهما المفيدة جدًّا في تقليص كتابي إلى الحجم المطلوب. وممتنٌّ للغاية كذلك للمُراجعين المجهولي الاسم الذين راجعوا المُقترح الأوَّلي للكتاب وكذلك المُسوَّدة النهائية لتعليقاتهم ونصائحهم التي أفادتني كثيرًا.

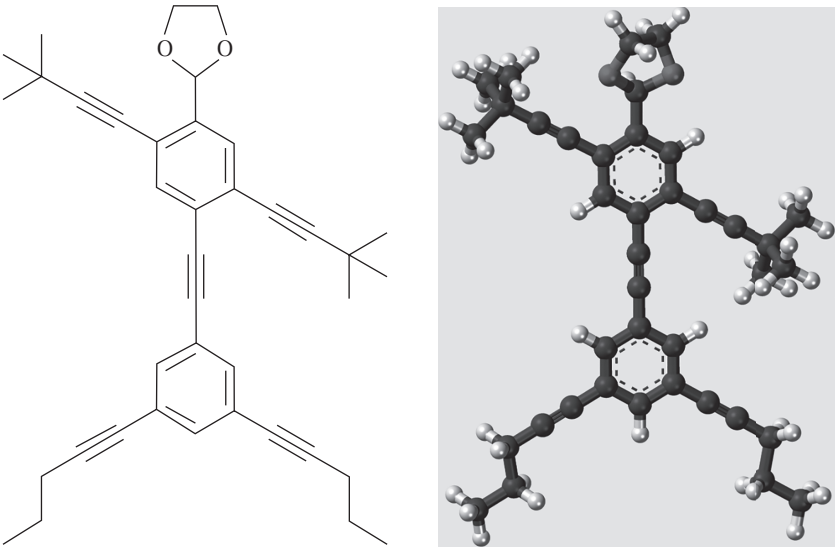
فيليب موريارتي
نوتنجهام، مارس ٢٠٢٢

الفصل الأول

مرحبًا بك في عالم الأقزام النانوية

«النانوبوتيان» هي عائلة من الجزيئات الكيميائية تأخُذ شكل الأجسام البشرية، من تصميم وتنفيذ ستيفاني إتش شانتو وجيمس إم تور، بمركز علوم وتكنولوجيا النانو بجامعة رايس. تُشكِّل هذه الجزيئات مثالًا واضحًا على التحكُّم الرائع الذي صار متاحًا الآن في وحدات البناء الذرية والجزيئية. ويوضح شكل ١-١ أحد أفراد هذه العائلة، وهو «النانوكيد». يبلغ طول النانوكيد نانومترين فقط، ليكون بذلك أصغر ١٠٠ مليون مرة تقريبًا من سكَّان جزيرة «ليليبوت» الأقزام الذين لا يتجاوز طولهم ستَّ بوصات، في رائعة جوناثان سويفت الخالدة «رحلات جاليفر». أو لصياغة الأمر في سياقٍ أكثر معاصرة، النقطة في نهاية هذه الجملة يبلغ قطرها نحو ١٥٠ ألف نانوكيد. وبعملية ليست ميكروسكوبية بل نانوسكوبية، وضعت كل ذرة من ذرات النانوكيد في مكانها من خلال تفاعلات تخليقية يقع عليها الاختيار تبعًا لما يجدُر وصفه بأنه مُخطط جزيئي، وينتج عن هذه العملية الكيميائية مليارات على مليارات من جزيئات النانوبوتيان المتطابقة المنبثقة من الحساء الكيميائي.

من المُثير للإعجاب أيضًا أن النصفَين العلوي والسفلي لهيكل النانوكيد الجزيئي خُلِّق كلٌّ منهما على حدة، ثم «خُيِّطا» معًا عند الخصر، وكأنه وحش فرانكشتاين بأبعادٍ نانومترية. ويعتبر هذا إنجازًا مذهلًا للتخليق الكيميائي؛ إذ استعان بطريقةٍ دعاها البعض بالجراحة الجزيئية. ولكن لا يزال كثير من مُنتقدي تكنولوجيا النانو يزعمون أنه رغم ما يتَّسم به النانوكيد وأقرباؤه من إبهار وروعة، فلا يُوجَد الكثير مما قد يُعَد «جديدًا» فعلًا هنا. أليست تكنولوجيا النانو مجرَّد كيمياء متنكرة؟ أليس الأمر كله حالةً من الجهل الجماعي كما في قصة «ملابس الإمبراطور الجديدة» لكن على نطاقٍ أصغر؟ أليست الضجَّة المُثارة حولها أكبر من القيمة العلمية الحقيقية؟



شكل ١-١: «نانوكيد»، أحد أفراد عائلة جزيئات النانوبوتيان، صنعه ستيفاني إتش شانتو وجيمس إم تور من مركز علوم وتكنولوجيا النانو بجامعة رايس. موضَّح على اليسار مُخطط للروابط الكيميائية، وعلى اليمين مُوضَّح التركيب الجزيئي المقابل له، حيث تُمثَّل ذرات الكربون والهيدروجين والأكسجين بكراتٍ سوداء وبيضاء ورمادية على الترتيب.

إن هدفي في هذا الكتاب هو تجاوز الغلو، والتركيز على المبادئ العلمية الأساسية الكامنة في قلب علوم النانو، وتوضيح أن تكنولوجيا النانو علمٌ جديد ومشوق ومختلف بالرغم من انتقادات الرافضين لها (الصائبة أحيانًا). فبمقدورنا الآن تصوير كل ذرة على حدة ووضعها في مكانها بدقة؛ بل إن أحدثَ ما وصلت إليه تكنولوجيا النانو يتضمَّن الاستهداف الحاسوبي لروابط كيميائية مُفردة داخل جزيء واحد، وهو مستوًى من التحكُّم كان يبدو هدفًا مُستحيلًا قبل بضعة عقود. علاوة على ذلك، تتحوَّل هذه التطوُّرات العلمية على نحوٍ متزايد إلى تطوُّرات تكنولوجية (والعكس بالعكس)، لتخرج لنا قائمة من المنتجات تتنامى بلا انقطاعٍ تضم كلَّ شيء، من كريمات الوقاية من الشمس وحتى أجهزة الكمبيوتر المحمولة، ومن أجهزة تنقية المياه وحتى كرات الجولف، ومن الخلايا الشمسية إلى الأقمشة

الذكية التي لا تُصيبها البقع أبدًا. وكما سنرى، أحيانًا ما تكون التطوُّرات التي تتحقق في تكنولوجيا النانو جديرةً بالضجة التي تُثيرها.

ولكن قبل أن نبدأ جولتنا الشاملة والسريعة في عالم النانو، يجب أن نُعرِّف ما نَعنيه بمصطلحَي «تكنولوجيا النانو» و«علوم النانو». تبدو هذه البداية مناسبةً تمامًا، إلا أن الاستقرار على تعريفٍ متَّفق عليه عالميًّا لتكنولوجيا النانو تبيَّن أنه مسألة صعبة إلى حدٍّ كبير. فكلمة «نانو» تُشير إلى وحدة النانومتر، ومقدارها ١٠-٩ متر. يعادل هذا الرقم نصف طول النانوكيد، أو لنُقارنه بشيءٍ عامٍّ أكثر، لو كان قطر بلية اللعب يُساوي نانومترًا واحدًا، لبلغ قطر الأرض حوالي متر. وكمقارنة مفيدة أخرى لتصوُّر مقدار «النانو»، خُذ في علمك أن سُمك الورقة يبلُغ نحو ١٠٠ ألف نانومتر. غير أن علوم النانو تشمل دراسة بِنى وأجهزة قد يكون عرضها أكبرَ بكثيرٍ من نانومتر واحد. كيف يمكننا إذن أن نتخيَّر الحد الأعلى (والأدنى في الواقع) للأحجام للتمييز بين علوم النانو وتكنولوجيا النانو من جهة، وتكنولوجيا الميكرو مثلًا من جهةٍ أخرى؟ اقترح البعض أن يكون الحد الأعلى للحجم في تكنولوجيا النانو ١٠٠ نانومتر. غير أن الأمر هنا لا يخلو من المشكلات كذلك؛ إذ قد نتساءل: «لِمَ لا يكون الحد ٥٠٠ نانومتر؟ أو حتى ١٠١ نانومتر؟ أو ٩٩ نانومترًا؟»

بدلًا من التحذلُق ومحاولة تعريف علوم النانو في إطار نطاقات طولية معيَّنة بلا طائل، طرحت الجمعية الملكية بلندن التعريف التالي في مقالٍ مُهم نُشِر في عام ٢٠٠٤:

> علوم النانو هي دراسة ظواهر المواد وآليات معالجتها في نطاق أبعاد الذرَّات والجزيئات والجزيئات الضخمة، «حيث تختلف خواص المادة اختلافًا كبيرًا عن خواصِّها في نطاقِ أبعادٍ أكبر». أما تقنيات النانو فهي تصميم وتوصيف وإنتاج وتطبيق البِنى والأجهزة والأنظمة من خلال التحكُّم في شكلها وحجمها في نطاق النانومتر.

لقد ركَّزت على الجملة المِفتاحية هنا، التي، رغم أنها ما زالت غامضةً إلى حدٍّ ما، فإنها تلمس صميمَ ما يُميز علوم وتكنولوجيا النانو. فمن خلال تغيير حجم جسمٍ ما ببساطة على مستوى الذرات أو الجزيئات، أو الجزيئات الضخمة الواردة ضِمن تعريف الجمعية الملكية المذكور أعلاه، يمكن تغيير خواصِّه جذريًّا. وكما سنرى لاحقًا، فهذه التغيرات القائمة على الحجم قد تكون مذهلةً للغاية عندما يُصبح حجم جُسَيمٍ نانوي مُماثلًا للطول الموجي لإلكتروناته؛ وذلك حين تلعب فيزياء الكم دورًا محوريًّا.

رغم أن الأفضل إذن أن نتجنَّب تعريفات علوم النانو في إطار حدود صارمة للنطاقات الطولية، فمِن «القواعد الأساسية» المُفيدة في هذا المقام أنه إذا لم يكن بالإمكان دراسة التركيب أو العملية محل الاهتمام باستخدام الفحص المجهري الضوئي العادي، فهي إذن نانوسكوبية وليست ميكروسكوبية. وسنرى بعد قليلٍ أن مجال تكنولوجيا النانو يَدين بأغلب أصوله — إن لم يكن كلها — لاختراع نوعٍ جديد تمامًا من الميكروسكوبات الفائقة الوضوح بوسعها تمييز الذرات والجزيئات كلٌّ على حدة، لكن من دون استخدام أي أدواتٍ بصرية إطلاقًا (أي لا عدسات ولا مرايا … وما إلى ذلك).

ينبع الابتكار الحقيقي من تجاوز الحدود التقليدية، وهذا ما تتفوَّق فيه علوم النانو وتكنولوجيا النانو؛ فعلى المستوى النانومتري، تتلاشى الحدود المُصطنَعة (والتاريخية في معظمها) بين الفيزياء والكيمياء والأحياء وعلم المواد. فعند فحص التركيب الإلكتروني لذرةٍ مفردة، أو التلاعُب بروابط كيميائية فردية داخل جزيءٍ ما، أيندرج عملُنا ذاك تحت الفيزياء أم الكيمياء أم علم المواد؟ ماذا لو كنا نؤثِّر على جزءٍ معيَّن من جزيء أحد البروتينات بواسطة قوةٍ ما لكي نقيس مُقاومته الميكانيكية، أو نُحاول مطَّ خيط حمضٍ نووي ونرصد استجابته؟ أيندرِج هذا تحت علم الأحياء أم الفيزياء أم الكيمياء؟ أم إنه مجال بحثي مُتعدد التخصُّصات، يُمثل مزيجًا محفزًا للفكر، وثوريًّا في أفضل الأحوال، من العلوم التقليدية، تنبثِق منه رؤًى ونظريات لن تُتاح ببساطة لو عِلقنا في صومعة تخصُّص مُعيَّن بمعزل عن البقية؟

إن التداخل المعرفي هو حجر الأساس لتكنولوجيا النانو، لكن كل علماء النانو يأتون إلى المجال حامِلين متاعهم من تخصُّصهم الأصلي. فمجموعتنا البحثية المُتخصِّصة في علوم النانو في جامعة نوتنجهام، على سبيل المثال، تتألف بشكلٍ شِبه كاملٍ من فيزيائيين، إلا أن أغلب (إن لم يكن كل) عملِنا البحثي يمكن وصفه بالمِثل بأنه ينتمي إلى الكيمياء الفيزيائية أو علم الأسطح أو علم المواد. لكن «نشأتي» على الفيزياء تعني أن تركيزي خلال الكتاب سيميل أكثرَ قليلًا نحو الجوانب الفيزيائية من تكنولوجيا النانو، وإن كنتُ بالتأكيد لن أُعرِض عن العلوم الحيوية.

بعد الإعلان عن انحيازي هذا، فلنبدأ الآن جولتنا السريعة في عالم النانو بتقديم الأداة المُميزة التي سبق أن أشرتُ إليها أعلاه، وهي مجهر المسبار الماسح. لميكروسكوبات المسبار أهميةٌ بالِغة للتمكن من رسم خريطةٍ للمادة والتحكُّم فيها على المستوى الذري ودون الجزيئي. وبالفعل يزعم كثيرٌ من علماء النانو على اختلاف مشاربهم وخلفياتهم العلمية

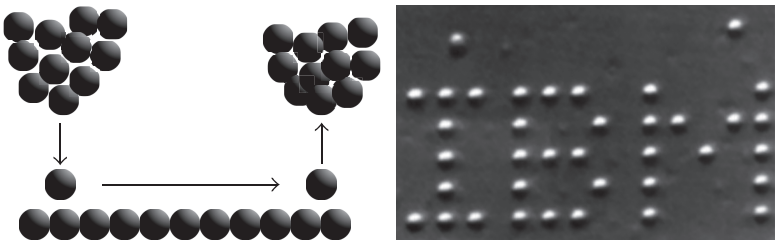
— وهو زعم له ما يُبرِّره — أن عام ١٩٨١ هو عام انطلاق تكنولوجيا النانو، نتيجةً لاختراع ميكروسكوب المسبار الماسح في ذلك العام في مُختبرات أبحاث شركة آي بي إم في مدينة روشليكون، بزيورخ. لا تسمح لنا ميكروسكوبات المسبار الماسح بقياس القوى بين الذرَّات والجزيئات فحسب، بل تسمح أيضًا بالتحكُّم في هذه التفاعُلات بين الذرية وبين الجزيئية؛ لنتمكَّن من تحريك المادة بدقةٍ متناهية تُضاهي دقةَ حجم الذرات (بل وأدق من ذلك).

يُمكننا، باستخدام مجهر مسباري حديث الطراز، أن ندفع الذرات ونجذبها وننكزها ونهمزها ونلتقِطها كلٌّ منها على حِدة، وكل ذلك من خلال تحكُّم حاسوبي وبدقةٍ تعجز قدرات أي جهازٍ علمي آخر عن مُضاهاتها. لكن ما معنى أن ندفع ذرةً أو نجذبها؟ ما القوى التي تدخل في هذه العملية؟ كم من الطاقة تحتاج؟ وكيف لنا أن نبذل قوًى ونوجِّهها في مثل هذا الحيز الضئيل؟

استشعار القوة

من الناحية المفاهيمية، يُمكن اعتبار ميكروسكوب المسبار، من منظورٍ معين، أقلَّ تعقيدًا بكثير من نظيره الضوئي التقليدي. فبدلًا من تحييد موجات الضوء بالطريقة الصحيحة تمامًا لتكوين صورةٍ مكبَّرة، يُتيح لنا ميكروسكوب المسبار الماسح رؤيةَ الذرات الفردية وتحريكها، عن طريق تحريك رأسٍ مُدبَّب متناهي الدقة جيئةً وذهابًا على سطحِ عينة (انظر شكل ١-٢). في البداية يكون الرأس عبارة عن سلكٍ معدني مسنون (غالبًا ما يكون من مادة التنجستين، وإن كان من الشائع استخدام الذهب ومزيج من البلاتين والإريديوم أيضًا.) لكن كثيرًا ما سوف تلتحِم ذرة من سطح العيِّنة بطرف هذا الرأس، سواء عمدًا أو بالخطأ؛ وعندما تجري هذه العملية وفقًا لتخطيطٍ وتنفيذٍ مُحكَمَين، فإنها تُسمَّى التشكيل الوظيفي للرأس، وتُوفِّر درجةً عالية من التحكُّم في البِنية الذرية للرأس.

الصورة على اليمين في شكل ١-٢ هي أول تطبيق عمَلي للكتابة باستخدام الذرات، نفَّذه دون آيجلر وإريك شفايتزر من معامل أبحاث آي بي إم عام ١٩٩٠. كل وحدة لامعة هي ذرة زينون (على سطح فائق البرودة من النيكل) وُضعت في موضعها باستخدام استراتيجية «الانزلاق» الموضَّحة في الرسم الكاريكاتيري. تُوضِّح الأسهم في هذا الرسم كيف يتحدَّد موضع كل ذرةٍ على حدة، من خلال تغيير المسافة الفاصلة بين الرأس والعينة، ومن ثم التحكُّم بمقدار القوة المتبادلة بين المسبار والذرة محل المُعالجة. في البداية يُقرَّب الرأس من العينة — مما يزيد التفاعل بينَه وبين الذرة المستهدفة — ثم يُحرَّك موازيًا للسطح



شكل ١-٢: يستطيع ميكروسكوب المسبار الماسح تصوير المادة والتحكُّم فيها بدقةٍ ذرية مُتناهية، عن طريق تحريك رأسٍ فائق الحدة، يلتحم بذرَّةٍ مفردة، على مقربةٍ شديدة من سطحٍ ما.

لمسافةٍ ثابتة فيأخذ الذرة معه. في نهاية خطوة المعالجة، يتراجع الرأس عائدًا إلى ارتفاعه الأوَّلي (ارتفاع التصوير). وعن طريق إبقاء المسافة بين المسبار والسطح صغيرة جدًّا — أقل من واحد نانومتر في العموم؛ أي بضعة أقطار ذرية أو أقل — يمكن رسم خريطة للتفاعُلات بين الذرَّات الموجودة عند رأس المسبار، والذرَّات عند سطح العينة أسفل منه ذرةً بذرة. بل يمكن في الواقع أن تُصبح دِقة التباين أفضلَ بكثير من التباين في ذرةٍ واحدة؛ فكما سنرى بعد قليل، فإن أحدث التطوُّرات في المجال يرسم خريطة للبِنية الكيميائية، أي الروابط الكيميائية، «داخل» الجزيئات المُفردة.

يعتمد شكل التفاعُل بين المسبار والعينة على ما نريد توصيفه وقياسه تحديدًا. وتوجَد الآن عائلة مُتنامية من الميكروسكوبات المسبارية، كلٌّ منها مصمَّم بدقة ليستغلَّ واحدة أو أكثر من القوى والتفاعلات القائمة بين الذرَّات، أو الجزيئات أو الجسيمات النانوية (وهي كُتَل بالِغة الصغر من المادة تتراوح بين بضع ذرات إلى بضعة آلاف منها؛ وسنتناول هذا باستفاضة أكثر لاحقًا) أو بينها جميعًا.

يُصنِّف الفيزيائيون القوى إلى أربع فئاتٍ أساسية: قوى الجاذبية والقوى النووية القوية، والقوى النووية الضعيفة، والقوى الكهرومغناطيسية. لكن حين يتعلَّق الأمر بنطاق الأبعاد النانوية، غالبًا ما تكون التفاعُلات الكهرومغناطيسية هي المُهيمنة بهامشٍ لا بأس به. ويُمكننا بحسبةٍ تقريبية بسيطة أن نُوضِّح مدى قِلة تأثير الجاذبية، على سبيل المثال، على التفاعل بين ذرتَين أو جُزيئين. يُمكننا بمعادلة بسيطة، تُعرَف باسم قانون كولوم،

حساب مقدار القوة الكهروستاتيكية F_{el}، بين شحنتَين مُتماثلتَين، q، تفصل بينهما المسافة r. (k هنا ثابت.)

$$F_{el} = kq^2/r^2$$

لنتخيَّل مثلًا ذرتَين إحداهما فقدت إلكترونًا والأخرى اكتسبت إلكترونًا، وصار لديهما مُحصِّلة شحنة، وبذلك أصبحت كلتاهما أيونًا. ومن الأمثلة الجيدة على هذا مثال الأيونين Na^+ وCl^-؛ حيث الأول أيون صوديوم ذو مُحصِّلة شحنة موجبة والآخر أيون كلور ذو مُحصلة شحنة سالبة؛ وذلك نظرًا لفقدان الأول إلكترونًا واكتساب الآخر إلكترونًا. سنفترِض أن الأيونين Na^+ وCl^- تفصل بينهما المسافة ذاتها التي تفصل بينهما في بلورة NaCl (ملح الطعام)؛ أي ٠,٢٣٦ نانومتر.

يمكن بسهولةٍ حساب القوة الكهروستاتيكية بين الأيونَين Na^+ وCl^- إذا عوَّضنا بالقِيَم المناسبة في المعادلة أعلاه. إذا قُمنا بذلك فسنجد أن مقدار القوة حوالي ٤ نانونيوتن (nN). وهذه القيمة ضئيلة جدًّا مقارنةً بوزن الإنسان العادي البالِغ مثلًا (إذ تبلغ مئات النيوتنات). لكن هذه القوة النانوية هائلة إذا ما قُورنت بقوة الجذب بين الذرات.

لحساب قوة الجاذبية المناظرة F_g، بين أيونَي Na^+ وCl^-، سنستخدِم قانون نيوتن للجذب، الذي يُشبه قانون القوة الكهرومغناطيسية كثيرًا في صيغته:

$$F_g = Gm_{Na}m_{Cl}/r^2,$$

حيث r هي المسافة مرة أخرى، وm_{Na} وm_{Cl} هما كتلتا أيونَي الصوديوم والكلور على الترتيب، وG ثابت يُعرَف باسمِ ثابت الجذب العام. تبلغ قوة الجاذبية بين هذه الذرات $١٠^{-٤٢}$ نيوتن؛ وهي قيمة أصغر من أن نتصوَّرها. إذا أخذنا النسبة بين القوة الكهروستاتيكية وقوى الجاذبية بين الأيونين Na^+ وCl^-، نجد أن r^2 في كلٍّ منهما تلغي إحداهما الأخرى، ونحصل في النهاية على معاملٍ قيمته $١٠^{٣٣}$. وهذا ليس مجرد رقمٍ كبير، بل هو رقمٌ ضخم لدرجة مُذهلة وصادمة (وذلك لأن كتلة الذرات ضئيلة جدًّا بالفعل). الدور الوحيد الذي تلعبه الجاذبية في تجارب علوم النانو في المعتاد هو الحفاظ على ثبات المعدَّات — والعلماء — على الأرض بقوة (لأنها أجسام ذات كتلةٍ كبيرة تتكون من عددٍ لا يُحصى من الذرات والجزيئات).

ينطبق الأمر ذاته على القوى النووية القوية والضعيفة، التي تتَّسم بتأثيرٍ قوي للغاية بين بروتونات ونيوترونات النواة الذرية؛ فنطاقات القوى والطاقة التي ندرُسها ونستخدِمها في تكنولوجيا النانو لا تقترِب بأي حالٍ من الحد النووي. قبل الدخول في مقارنةٍ تفصيلية بين المستوى النانوي والمستوى النووي، يجب أن نستعرِض أنسب الوحدات التي يمكن استخدامها لقياس الطاقة. برغم أن الوحدة القياسية لقياس الطاقة هي الجول، فإن هذه الوحدة على مقياس النانومتر والمقياس دون الذري تُعطي قيمةً تقريبية للغاية لدرجةٍ تجعلها غير ذات نفع. لذا نستخدِم بدلًا منه وحدةَ الإلكترون فولت (eV) لقياس الطاقة؛ حيث ١ إلكترون فولت هي الطاقة التي يكتسبها الإلكترون عندما يتسارع خلال فرق جهد قدره ١ فولت. ولكن ما هو أهم بكثيرٍ من تعريف الكتب للإلكترون فولت، في سياق تكنولوجيا النانو، أن طاقة الرابطة الكيميائية العادية تساوي نحو بضعةٍ من الإلكترون فولت؛ فانقسام زوج من الذرات يتطلَّب دفعةً من الطاقة بهذه القيمة. وهذا يختلف جذريًّا عن مئات الملايين من الإلكترون فولت (ما يعادل نحو ١٠٠ ميجا إلكترون فولت) التي تُميز طاقة الارتباط بين مكونات النواة الذرية.

هذا يعني أن تكنولوجيا النانو تضرب بجذورها كلِّها في دراسة ومعالجة التفاعلات الكهرومغناطيسية (بما فيها القوى الكهروستاتيكية) بين الذرَّات والجزيئات؛ لذا فلا حاجةَ لنا هنا للالتفات إلى الجاذبية ولا القوى النووية القوية أو الضعيفة. بدلًا من ذلك ينصبُّ جلُّ تركيزنا على القوى الكهرومغناطيسية المُتبادلة بين «الإلكترونات». لكن جزءًا كبيرًا للغاية من العالَم من حولنا محكوم في الأساس بالتفاعُلات بين الإلكترونات، وهذا يشمل كل جهازٍ إلكتروني أو كهربائي؛ بما في ذلك كل هاتف ذكي وكل كمبيوتر محمول وكل جهازٍ في المطبخ.

لماذا الألماس أقسى من الطين؟ بسبب القوة النسبية لروابط الألماس الكيميائية؛ أي قوة التفاعلات بين الإلكترونات. لماذا الزجاج شفَّاف بينما الذهب ذهبي اللون؟ بسبب تفاعل الضوء الذي يُعتبر موجة كهرومغناطيسية (أو عدم تفاعُله نسبيًّا)، مع «الإلكترونات» في كلٍّ منهما. لماذا يُعَد الحديد مادة مغناطيسية بينما الألومنيوم يبدو وكأنه لا يُلقي بالًا لتأثير أي مغناطيس في الجوار؟ بسبب الخواص الميكانيكية الكمومية للإلكترونات. لماذا يوصل سلك نحاسي الكهرباء في حين لا يحمل البلاستيك الذي يُغلِّفه أيَّ تيار كهربي؟ مرة أخرى، تكمن الإجابة في توزيع الإلكترونات في كلٍّ من المادتَين.

إن التفاعُلات بين الإلكترونات هي أساس العالم المادي بما في ذلك تكنولوجيا المعلومات بكل جوانبها؛ ولذا يُولي قدرٌ هائل من علوم وتكنولوجيا النانو اهتمامًا خاصًّا لقياس

سلوك الإلكترونات وتعديله. فمن خلال التحكُّم في الإلكترونات وحبسها، يُمكننا «ضبط» خواص أي مادة، كتغيير لونها وقوَّتها وتوصيلها للكهرباء، وقُدرتها التفاعلية الكيميائية، واستجابتها لعددٍ من المؤثرات كالحرارة والضوء والشد. وتكنولوجيا النانو تمنحنا الأدوات اللازمة لتصميم وتنفيذ مواد تُطلَب لأغراضٍ مُعينة، تم التحكُّم في بِنيتها النانوية أو الذرية أو الجزيئية، أو جميعها، من الأسفل إلى الأعلى؛ أي ذرة تلوَ الأخرى. والوصول إلى هذا المستوى من الدقة يتطلَّب التحكُّم في القوى بين الذرية وفهمٍ عميق لكيفية اعتماد هذه القوى على المسافات بين الذرات بالضبط.

عند هذه النقطة، سوف ألتفت إلى اقتباسٍ ملائم لحديثنا للغاية لريتشارد فاينمان، الفيزيائي والحكَّاء وعازف طبول البونجو الشهير من القرن العشرين. يحظى فاينمان بذكرٍ شِبه دائم في معرض أي حديثٍ عن تكنولوجيا النانو، وذلك بفضل خُطبةٍ تميَّزت ببُعد النظر، كان قد ألقاها بعد العشاء أمام الجمعية الفيزيائية الأمريكية عام ١٩٥٩، عنوانها «هناك مُتَّسع كبير في القاع»، تنبَّأ خلالها تنبؤًا مثيرًا للاهتمام بذلك النوع من معالجة الذرات المفردة، الذي لم يَعُد ممكنًا فحسب، بل بات أساسيًّا على نحو متزايد في كثير من مناحي علوم وتكنولوجيا النانو. وقد بات الاقتباس من هذه الخطبة عند تناول تكنولوجيا النانو أمرًا متكررًا حدَّ الملل؛ لذا سأتغاضى عن هذا المصدر بالذات الآن. وسأتوجَّه بدلًا من ذلك إلى كتاب فاينمان الشهير «محاضرات في الفيزياء»؛ حيث يصِف التركيبَ الذريَّ للمادة وطبيعة التفاعُلات بين الذرَّات باعتبارها أهمَّ معلومة علمية اكتشفتها البشرية:

> إن حلَّت على البشرية فاجعةٌ ما دُمِّرت على أثرها كل معارفنا العلمية، ولم تنجُ إلا جملةً واحدة تُورَّث للأجيال التالية من المخلوقات، فما الجملة التي من شأنها أن تحوي أكبرَ قدْر من المعرفة في أقل عددٍ من الكلمات؟ أعتقد أنها الفرضية الذرية (أو الحقيقة الذرية، أو سَمِّها ما شئت) القائلة بأن كل شيءٍ يتكوَّن من ذرات؛ وهي جسيمات صغيرة تتحرك حركة دائمة، فيجذب بعضها بعضًا عندما تكون المسافة الفاصلة بينها صغيرة، لكنها تتنافر عند انضغاط بعضها داخل بعض.

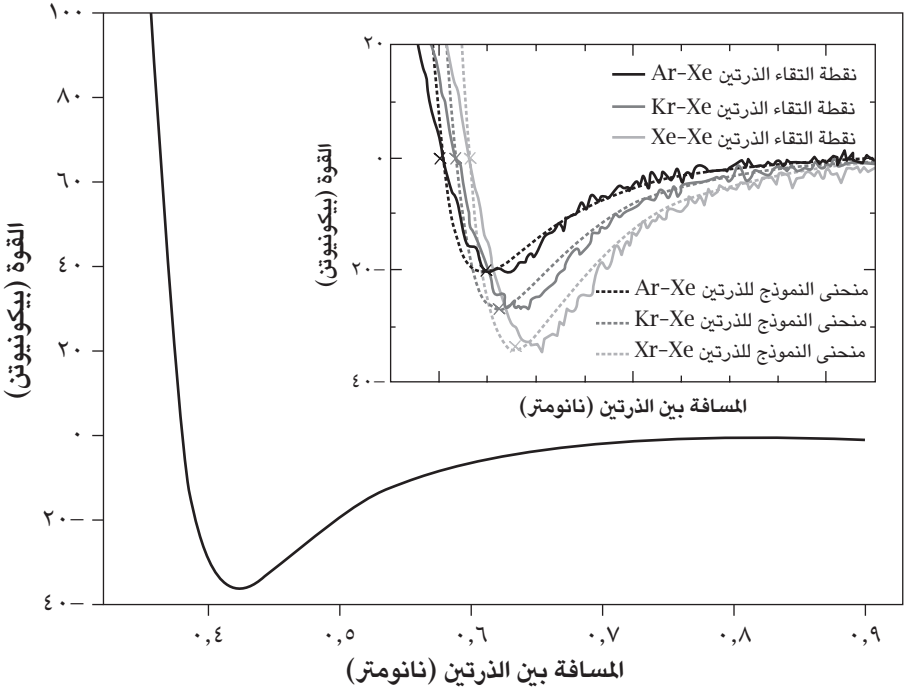
لماذا تتجاذب الذرَّات عندما «تكون المسافة الفاصلة بينها صغيرة» لكنها تتنافر عند «انضغاط بعضها في بعض»، على حدِّ تعبير فاينمان؟ إجابة هذا السؤال محوريةٌ لتكنولوجيا النانو.

روابط قريبة

يوضح الرسم البياني الرئيسي في شكل ١-٣ مدى التغيُّر الذي يطرأ على القوة بين ذرتَي زينون مع تغيُّر المسافة r الفاصلة بينهما. وقد اخترت الزينون تحديدًا لمكانته البالغة الأهمية في تاريخ تكنولوجيا النانو؛ فهو أول ذرة نجحنا في وضعها في مكانها بدقة باستخدام التحكم الحاسوبي (انظر شكل ١-٢). عندما تكون قيم r كبيرة، يكون التفاعل بين ذرات الزينون ضعيفًا جدًّا؛ إذ تكون القوة (وطاقة الوضع) المُرتبطة بهذا التفاعل بينها محدودةً جدًّا، وتستمرُّ في التناقُص وتظلُّ تقترب من الصفر كلما تزايدت المسافة بين الذرَّات. أما إذا قُرِّبت الذرات بعضها من بعض، بدلًا عن ذلك، فإنها تُشعِر بتفاعل تجاذُبي فيما بينها، وتزداد القوة سالبيةً حتى تصِل إلى أدنى حدٍّ لها. (عندما تكون القوة سالبةً فهذا يُشير إلى تجاذب، بينما يُولِّد التنافر قوةً موجبة.) ومع تقريب الذرتَين أكثر، تبدأ القوة في الازدياد حتى تصل قيمتها إلى صفر مجددًا، وعند هذا الحد تُصبح الذرتان على «مسافة الاتزان». عندئذٍ تصبح الذرتان قريبتَين كفايةً للتفاعُل معًا، لكن دون محصلة قوة؛ إذ يحدُث توازن بين القوى المؤثِّرة عليهما. (وسأوضح بعد قليل مصدر هذه القوى المتضادة.) ومسافة الاتزان هي ما يُحدِّد «طول الرابطة» بين ذرتَين أو جزيئَين متفاعلَين.

إذا حاوَلْنا الآن تقريبَ الذرتَين أكثر من ذلك؛ أي تقليل المسافة بينهما إلى ما دون قيمة مسافة الاتزان، تُصبح القوة موجبةً وتتزايد بسرعة هائلة مع أقل تغيير في المسافة بين الذرتَين. فالتفاعل يُحدِث تنافرًا شديدًا؛ حتى إن حركة الذرتَين بعضهما نحو بعض لمسافة طفيفة — ليست دون النانومتر فقط، بل دون الأنجستروم كذلك — تتسبَّب في تزايدٍ هائل في القوة (والطاقة). (الأنجستروم يساوي ٠٫١ نانومتر. وهي وحدة يستخدمها العلماء المُهتمون بدراسة التركيب الذري للمواد على نطاقٍ واسع؛ لأن أطوال الروابط الكيميائية تبلُغ في المعتاد بضعة أنجستروِمات.) وهذا المزيج من التجاذُب والتنافر في التفاعل هو ما يُعطي الشكل المُميز لمنحنى القوة في مقابل المسافة الموضَّح في الشكل ١-٣. فإذا أردنا كسر الرابطة الكيميائية، نحتاج إذن إلى توفير قدرٍ كافٍ من الطاقة — ولتكن مثلًا في صورة حرارة أو ضوء (أي إشعاع كهرومغناطيسي) أو حتى قوة ميكانيكية موجَّهة بدقة كما سنرى بعد قليل — حتى يُسمَح للذرتَين بالتغلُّب على التفاعل المتبادل بينهما والإفلات إحداهما من الأخرى.

تم حساب شكل ١-٣ من خلال معادلة تجريبية في غاية البساطة لتوصيف التأثيرات المُتبادلة بين الذرَّات تُعرف باسم جهد لينارد-جونز، نسبةً إلى عالِم الرياضيات والفيزياء



شكل ١-٣: التغيُّر في القوة المتبادلة بين ذرتين بتغيُّر المسافة بينهما، محسوب باستخدام نموذج لينارد-جونز للجهد الموضَّح في النص. يوضح الشكل المدرَج داخله قياسات تجريبية مكافئة، معنونة بـ «نقطة التقاء الذرتَين»، ومقارنة كلٍّ منها بجهد لينارد-جونز المناسب للقوة بين الذرية في ثلاثة أزواجٍ مختلفة من ذرات الغازات الخاملة: زينون-زينون، وكربتون-زينون، وأرجون-زينون.

النظرية البريطاني جون إدوارد لينارد-جونز. يُستخدَم نموذج جهد لينارد-جونز كثيرًا جدًّا لتمثيل التفاعُلات المتبادلة بين ذرات الغازات الخاملة كالزينون، وهو غاز نبيل. قد تتساءل هنا لماذا يُوجَد تفاعُل بين ذرتَي الزينون أصلًا ما دام أنها ذرات خاملة، وهو سؤال منطقي. كثيرًا ما نستخدِم الغازات الخاملة في التطبيقات التي تستلزِم بالضرورة عدم حدوث تفاعُل كيميائي؛ لأن الغازات الخاملة لها أغلفة تكافؤ أو أغلفة إلكترونية كاملة. علاوة على ذلك، لا تُوجَد محصلة شحنة؛ لأننا نتعامل مع ذرات متعادلة (وليس أيونات

مثل Na^+ وCl^-). ولكن يظل التجاذب بين ذرات الزينون قائمًا على حدٍّ وصف فاينمان. فما السبب؟

تُصوِّر الذرات في العموم كأنها نظام شمسي مُصغر، به نواة في المركز وإلكترونات تدور حولها في مدارات مُحدَّدة بدقة. وهذا ما يُعرف بنموذج بور، نسبةً إلى الفيزيائي الدانماركي نيلز بور، وهو تصوُّر للذرة ظهر قبل الآن بأكثر من قرنٍ بقليل. ورغم أن هذا النموذج ليس بلا جدوى تمامًا — إذ ما زال كثير من العلماء يُصوِّرون الذرة بهذا الشكل في الغالِب — فإن به أخطاء فادحة. فالإلكترونات لا تدور ككواكب صغيرة تدور حول نجم. وتُخبرنا ميكانيكا الكم أن أفضل طريقةٍ لتصوير الإلكترونات هي وصفها كسُحب احتمالية يعتمد شكلها العام على طاقة الإلكترون. سنتحدَّث أكثر وبمزيدٍ من التفصيل عن دور ميكانيكا الكم في تكنولوجيا النانو في الفصل القادم، أما الآن فالجانب الأساسي من ميكانيكا الكم المُرتبط بحديثنا عن القوى بين الذرِّية هو أن «التذبذب» هو السمة الأساسية لما يحدُث في العالم النانوي. فالسحابة الاحتمالية التي تصِف مواضع الإلكترونات تعني أننا يمكن أن نجد الإلكترونات في مواضعَ مختلفة تمامًا عبر الذرة، على عكس المدارات المُحدَّدة المعتادة في نموذج بور.

تعني اضطرابات الإلكترونات بدورها إمكانيةَ حدوث خلل في توزيع الشحنة الكهربية داخل الذرة في أي لحظة، مما يتسبَّب في تكوُّن ثنائي قطب كهربي؛ أي انفصال الشحنات إلى مُحصلة شحنة سالبة وأخرى موجبة. ففي المناطق التي ترتفع فيها احتمالية إيجاد إلكترون، تكون سالبية شحنة الذرة أعلى قليلًا، أما عندما تؤدي الاضطرابات إلى انخفاض احتمالية إيجاد إلكترون في منطقةٍ ما فهذا يعني أن المنطقة ستكون مُحصلة شحنتها موجبة. وتَكوُّن ثنائي قطب على ذرةٍ ما (أو جزيء) يستحثُّ تكوُّن ثنائي قطب معاكس في ذرة أخرى، مما يَنتج عنه تجاذب. وهذا التأثير هو ما يُعرف بقوى لندن التشتتية، نسبةً إلى الفيزيائي فريتز لندن الذي فسَّر أصلَ قوة التجاذب هذه عام ١٩٣٠، وهي مسئولة عن التجاذب الذي يحدُث حتى بين الذرات المتعادلة كهربيًّا. (لا بد أن أُنوِّه إلى أنه رغم أن ظاهرة ثنائي القطب المُستحث هي التفسير المعتدُّ به لظهور قوى لندن التشتُّتية، فإن نموذج لندن الذي طُرح عام ١٩٣٠ أعقدُ من هذا بكثير؛ إذ يشمل حسابات ميكانيكية كمومية تفصيلية تذهب إلى أبعد من مفهوم التفاعل بين ثنائيات القطب بكثير.)

إن كان لجزيءٍ ما ثنائي قطب بالفعل — كجزيء الماء (H_2O) أو فلوريد الهيدروجين (HF) مثلًا — فإن ثمة خللًا «استاتيكيًّا» في توزيع الشحنة بالفعل، مما سينتُج عنه نوعٌ

إضافي من التفاعل بين ثنائيات القطب يعمل إلى جانب التفاعل الناتج عن قوى التشتُّت. بالمثل، تختلف حالة الأيونات — أو الروابط الأيونية، حيث يحدث انتقال لشحنة إلكترونية — عن الذرات والجزيئات المُتعادلة كهربيًّا؛ إذ سيحدث فيها تفاعل إلكتروستاتيكي قوي على أساس الشحنة التي يحمِلها كلُّ نوع منها. أما إن كانت الرابطة التساهمية — وهي رابطة يحدُث فيها تشارك في الإلكترونات — هي المُهيمنة على التفاعل، فلا بد إذن أن نأخذ في الاعتبار كيف ستتراكب السحابتان الإلكترونيتان وتتمازجان حتى يتسنَّى لنا تكوين فهم مُتكامل لكيمياء وفيزياء الكم.

تتألف الروابط الكيميائية في العموم من مزيجٍ من كل هذه التأثيرات؛ إذ نجد أن روابط قليلة جدًّا هي التي تعتبر تساهُمية بالكامل أو أيونية بالكامل على سبيل المثال. ولكن بالرغم من كل هذه التعقيدات، فإن القوة الكهرومغناطيسية هي ما يحكم التفاعل بين الذرات في كل الحالات، كما أنها جميعًا تتبع نفس الشكل العام لمنحنى الطاقة مقابل المسافة، الذي يتتبَّع ما يسمَّى «بئر الجهد»، الذي يُحدِّد مقدار الطاقة اللازمة لفصل ذرتَين إحداهما عن الأخرى (أو مدى قوة التفاعل بينهما)، وأدنى قيمة في هذه البئر تظهر عند مسافةٍ قدرُها طول الرابطة في حالة الاتزان، حيث مُحصلة القوة تساوي صفرًا. يلاحَظ في شكل ١-٣ التشابُه بين المنحنيات، وكذلك تغيُّر موضع القيمة الصغرى في منحنى القوة مقابل الزمن في كل حالة (وهذه القيمة تُمثل المسافة بين الذرتَين في حالة الاتزان.) (رُصدت هذه البيانات التجريبية باستخدام مجهر القوة الذرية، وهي مأخوذة من أعمال شيجيكي كاواي (بالمركز الدولي لهندسة البِنية النانوية للمواد، تسوكوبا، اليابان) ومعاونيه.)

لقد غطَّينا جزئية «... يجذب بعضها بعضًا عندما تكون المسافة الفاصلة بينها صغيرة ...» من الجملة العلمية الأكثر بلاغة في رأي فاينمان. لكن ماذا عن قوله «... تتنافر عند انضغاط بعضها داخل بعض» في توصيف التفاعُل بين الذرِّي؟ فكيف يحدُث هذا؟

باولي يُقاوم الدفع

يرجع التفاعل التجاذُبي الذي يُقرِّب بين الذرات أساسًا إلى التفاعل بين شحنات «متباينة». لذا قد تتصوَّر أن التنافُر بين ذرتَين (أو جُزيئين) عندما يُصبحان على مسافة أقل من مسافة الاتزان يرجع ببساطةٍ إلى تنافر شحنات «متشابهة». وهذا بالفعل جزء مما يُسبِّب التنافر، لكنه يبعد كثيرًا عن القصة الكاملة. فالسبب الأساسي الذي يجعل ذرتَين أو جزيئين

يقاومان بشدة تقريبهما لمسافةٍ أقل من طول الرابطة عند الاتزان يرجع في الحقيقة لواحدة من القواعد الأساسية في ميكانيكا الكم؛ ألا وهي: مبدأ باولي للاستبعاد.

يعتبر مبدأ باولي إحدى الركائز التي يقوم عليها كوننا بأكمله. فلولا مبدأ باولي للاستبعاد، لما كان لدَينا الجدول الدوري للعناصر، ولتصرَّفت المادة بطريقة مختلفة تمامًا. فمبدأ باولي للاستبعاد هو السبب الأساسي الذي يمنعك عن أن تخترق كرسيك وأنت جالس — أو تخترق الأرض إن تصادف وكنت واقفًا — بينما تقرأ هذه الجملة. يعود أصل هذا المبدأ إلى نظرية الحقل الكمومي، ويتطلَّب الأمر مزيجًا من الفيزياء النسبية وميكانيكا الكم لفهمه فهمًا كاملًا إلى حدٍّ معقول. ولِحُسن الحظ لا نحتاج إلى التعمُّق في هذا الموضوع كثيرًا لتحقيق مقصدنا هنا. فيمكن التعبير عن مبدأ باولي للاستبعاد بطريقةٍ أبسط كثيرًا كالآتي: لا يمكن لإلكترونَين أن يشغلا الحالة الكمومية نفسها. (إن مجال مبدأ الاستبعاد أكبرُ بكثير من ذلك في الحقيقة؛ لأنه لا ينطبق على الإلكترونات فقط، بل على فئة كاملة من الجسيمات الكمومية تسمَّى بالفرميونات. وكما أكَّدنا عدة مرات فيما سبق، ينصبُّ تركيزنا الأساسي في تكنولوجيا النانو على الإلكترونات.)

هذا يعني أن الإلكترونات ستبذل كلَّ ما في وسعها لتجنُّب بعضها إن كان لها جميعًا نفس الخصائص الكمومية (وأخص بالذكر منها خاصيةً تُعرف باسم اللفِّ المغزلي، وهي المسئولة عن المغناطيسية (النانوية) التي سنتناولها في الفصل الرابع). تبدو الإلكترونات في ضوء هذا المبدأ كأنها كائنات في غاية الانطوائية. ومبدأ باولي للاستبعاد هو المسئول عن أغلب التنافر الذي يحدث بين ذرتَين أو جُزيئين عند تقريبهما لمسافة أقل من المسافة الطبيعية المُستقرة. ومبدأ باولي للاستبعاد هو أيضًا ما يتسبَّب في قوة رد الفعل التي تمنعك من المشي خلال الأجسام الأخرى أو اختراقها. فالقوى على مستوى النانو لها تأثير يمتدُّ إلى العالم الماكروسكوبي المرئي من حولنا (بل وأبعد من ذلك.)

أكثر من مجرد نظرية

على الرغم من أن نظرية تفسير القوى بين الذرية والقوى بين الجزيئية المُوضَّحة أعلاه مُدعَّمة بأدلةٍ تجريبية تضمَّنت استخدام تجمعات هائلة من الذرات أو الجسيمات المتفاعلة (في الحالة الصلبة أو السائلة أو الغازية)، لم نتمكن من سبر هذه التفاعلات ذرةً بذرة إلا مع ظهور ميكروسكوب المسبار الماسح في بداية الثمانينيات. وقد بات ميكروسكوب المسبار الماسح الآن يُتيح لنا بصورةٍ روتينية قياسَ القوى المتبادلة بين الذرات والجزيئات

ليس فقط بدقة ذرية، بل بدقة دون ذرية. لا أعني بكلمة «دون ذرية» أننا نسبر التركيب النووي للذرة — تذكَّر أننا على بُعد قِيَم أُسِّية كبيرة عن مستويات الطاقة المعتادة في القوى التي تؤثِّر على الجسيمات داخل النواة — لكني أعني أننا نستطيع أن نتبيَّن التفاوتات في القوة والطاقة في مستوياتٍ أصغر بكثيرٍ من قطر ذرة.

هذا المستوى الاستثنائي من الدقَّة الذي بات الآن مُمكنًا في ضوء أحدثِ ما توصَّلت إليه علوم النانو موضَّح في الشكل المدرَج داخل شكل ١-٣. لقد صار بالإمكان الآن سبرُ نموذج جهد لينارد جونز — وكل النماذج الأخرى لتوصيف التفاعلات بين الذرات والجزيئات بالطبع — بقُدرة على التحكُّم في المسافة بين الذرية حتى مستوى البيكومتر (١٠-١٢ أمتار)، وهي دقةٌ تُعادل نحو واحد على مائة من قطر الذرة. وهذه القدرة على رسم خريطة للمادة ومعالجتها بهذا المستوى الاستثنائي من التفصيل باتت الآن تُستخدَم روتينيًّا في معامل علوم النانو وتكنولوجيا النانو حول العالم. وأتاح هذا رؤًى أعمق للعالم الكمومي الذي يقوم عليه جزء ضخم من تكنولوجيا النانو؛ إذ أتاح أبحاثًا كانت حتى عدة عقود مضت في عِداد «التجارب التخيلية» التي من المُستبعَد أن نتمكن من تنفيذها معمليًّا أبدًا.

الفصل الثاني

عالَم الكمِّ محاصرًا

حتى ظهور مجهر المسبار الماسح لم يكن لدَينا تحكُّم مباشر في البِنية الذرية والجزيئية أو في التفاعلات التي تُعَد أساس العالم النانوسكوبي. وبالرغم من إمكانية استخدام تفاعلات كيميائية معقَّدة ومنمَّقة لتخليق مجموعة كبيرة من البِنى النانوية/الأجسام النانوية المُفصَّلة حسب الحاجة — ولا شك أن النانوكيد الوارد ذكرُه في الفصل الأول يُعَد استعراضًا رائعًا لقوة الكيمياء التخليقية (وسنرى قريبًا جدًّا أمثلة أخرى لإمكانيات التخليق الكيميائي المُبهرة) — وحدَه ميكروسكوب المسبار الماسح مَن يستطيع معالجة المادة بالطريقة الموضَّحة في شكل ٢-١.

يوضح ذلك الشكل بضع لقطاتٍ مما أسماه مُبتكروه أصغر فيلم في العالم، وهم فريقٌ بقيادة أندرياس هاينرخ في معامل أبحاث شركة آي بي إم في ألمادن. (هاينرخ — الذي يشغل حاليًّا منصب مدير مركز علوم النانو الكمومية (كيو إن إس) في سيول، بكوريا الجنوبية — هو مَن خَلَف دون آيجلر في منصبه في معامل ألمادن، وكان خيرَ خَلَف. فقد كان آيجلر، بمعاونة زميله إريك شفايتزر، أولَ مَن نجح في مُعالجة الذرَّات لصُنع شعار شركة آي بي إم الموضَّح في الفصل السابق.) كل نقطة مُضيئة في الأطر الموضحة أعلاه هي جزيء مفرد من أول أكسيد الكربون وُضِع في مكانه باستخدام رأس مجهر مسبار ماسح. لم تُصوَّر هذه الأطر فحسب، بل رُسِمت باستخدام مجهر المسبار الماسح، جُزَيئًا تلوَ الآخر. بثَّ فريق هاينرخ الحياة في شبيه نانوكيد، صُنِع بواسطة ميكروسكوب المسبار الماسح من خلال تقنية «الحركة المُتقطعة» التقليدية لصُنع الأفلام، وجرَت العملية في بيئةٍ فائقة التفريغ — في ضغطٍ لا يختلف كثيرًا عن الضغط في الفضاء — لضمان خلو التجربة من جميع المُلوثات المُمكنة، وفي درجة حرارة تعلو الصفر المُطلَق بنحو أربع درجات (لضمان أن الطاقة الحرارية لن تقلقل جزيئات أول أكسيد الكربون فتتحرك من مكانها).

شكل ٢-١: لقطات من فيلم «صبي مع ذرَّته»، أصغر فيديو صُنع بتقنية الحركة المُتقطعة في العالم، من تنفيذ فريق من علماء النانو في معامل أبحاث شركة آي بي إم (في ألمادن) بقيادة أندرياس هاينرخ.

ورغم أن فيلم «صبي مع ذرَّتِه» يُعَد استعراضًا مبهرًا للإمكانيات المُتطوِّرة التي أتاحها المسبار الماسح للتحكُّم في الوحدات البنائية للمادة، فإن علوم النانو تهتمُّ بالطبع بما هو أكثر من المرح والألعاب والفيديوهات الرائجة. فقُدرتنا على تصنيع بِنًى نانوية ذرةً تلوَ الأخرى باستغلال القوى بين الذرِّية (وبين الجزيئية) وتوجيهها تعني أننا نستطيع بناء حاويات للإلكترونات حسب الطلب. ولكل الأسباب التي ناقشناها في الفصل الأول، ما إن نتمكَّن من تطويق الإلكترونات وحصرها كيفما نريد، يُمكننا تحديد الخواص المطلوبة في المادة — بل وضبطها بدقَّة — على نحوٍ لم يكن من المُمكن تخيُّله قبل بزوغ فجر تكنولوجيا النانو.

إن التحكُّم في الإلكترونات بهذه الطريقة لا يُوصف بأقل من أنه تحقيق لأساسيات فيزياء الكم في المعمل. إن الحدود الفاصلة بين مجالَي تكنولوجيا الكم وتكنولوجيا النانو مبهمةٌ على نحوٍ شِبه دائم؛ فما إن نعمل في نطاق النانو، لا بد في العموم أن نأخذ في الاعتبار الطبيعة الكمومية للمادة؛ ولهذا فكثيرًا ما يمكن استخدام مُصطلَحي «نانو» و«كمومي» بالتبادل. (في الواقع يعتبر فريق هاينرخ في صدارة العامِلين على الأبحاث التي تجري على المجال الجامع بين تكنولوجيا الكم والنانو.) لكن لماذا يُوجَد هذا التداخُل الجوهري بين ميكانيكا الكم وتكنولوجيا النانو؟

تصنيع الموجات: التلاقي بين النانو وتكنولوجيا الكم

تكمُن فكرةُ أن المادة، في الظروف المناسبة، تُظهر خصائصَ موجية في جوهر ميكانيكا الكم. وليس المقصود بهذا أن المادة — سواء كانت جسيمات دون ذرية، أو ذرات، أو

جزيئات، أو كرات بلياردو، أو كتبًا — هي موجات؛ كأن نقول مثلًا إن الإلكترونات نفسها تنتشِر كما تنتشر تموُّجات المياه على سطح بِركة. المقصود هو أن المادة تتصرَّف كما لو كانت موجة. ويعتمد مدى ظهور الخصائص الموجية جذريًّا على حجم الجسم. ولهذا السبب غالبًا ما تكون العلاقة بين تكنولوجيا النانو وفيزياء الكم علاقةً ترادُفية؛ فالظواهر الكمومية موجودة في كل مكان في نطاق النانو.

في قفزة هائلة للإبداع والخيال العِلمِيَّين، وضع الفيزيائي الفرنسي لويس دي بروي فرضيته (في أطروحته لنيل درجة الدكتوراه التي قام بها في عام ١٩٢٤) القائلة إنه مثلما يُمكن اعتبار الضوء، الذي يسلك سلوك الموجات بوضوح، أشبه بسَيلٍ من الجُسيمات (أي الفوتونات)، كذلك يمكن للمادة، التي نتخيَّلها في المعتاد جسيماتٍ بحجم «كرات البلياردو»، أن تسلك سلوكَ الموجات. وقد كانت هذه النظرية الثورية مذهلة لبساطة المعادلة التي تحمِل اسم دي بروي، التي تُعَد من أعمدة فيزياء الكم:

$$\lambda = h/p$$

في هذه المعادلة، λ هي الطول الموجي المُصاحب للجُسيم المادي المُحدَّد محل الدراسة، وh هي ثابت بلانك — وهو عماد آخر من أعمدة ميكانيكا الكم (وسنتناوله بتفصيلٍ أكثر قريبًا جدًّا) — وp هي كمية تحرُّك الجسيم. لا تسلك المادة سلوك الموجات في العالَم الماكروسكوبي من حولنا — فأنت لا تتعرَّض للحيود مثلًا عندما تمرُّ عبر الباب — لأننا ببساطة أكبر حجمًا مما يتطلَّبه ذلك. ووضع بعض الأرقام داخل معادلة دي بروي المذكورة أعلاه من شأنه أن يُبيِّن الأهمية المحورية لمسألة الحجم في عالَم الكم (وإن كان لا بد من التأكيد أن ما يلي مجرد حسبة مُرتجلة بالِغة التبسيط بغرض التوضيح فقط.)

لنأخُذ مثلًا إنسانًا متوسط الكتلة، ولتكن كتلته ٧٦ كيلوجرامًا (يتفاوت هذا الرقم نوعًا ما من دولةٍ إلى أخرى، وقد اخترت متوسط الكتلة المُعتمد في بريطانيا) يمشي بسرعة ١٫٥ متر في الثانية. كمية تحرك هذا الشخص المتوسط تساوي، ببساطة، حاصل ضرب كتلته في سرعته؛ أي إن كمية تحرُّكه p تساوي ١١٤ كيلوجرامًا في الثانية. ما ينبغي إدراكه الآن هو أن ثابت بلانك رقم صغير جدًّا في الحقيقة؛ إذ يبلغ ٦٫٦٣ × ١٠$^{-٣٤}$ جول ثانية. إذا عوَّضنا بقيم p وh هذه في معادلة دي بروي، فسنجد أن الطول الموجي المُصاحب للإنسان العادي في منتهى الصغر: ١٠$^{-٣٦}$ أمتار. وهذا الطول أقلُّ من الطول المَوجي للضوء المرئي بنحو ٢٩ قيمة أُسِّية.

ثمَّة مقارنة مُذهلة أكثر لو تأمَّلنا التفاوت الهائل في الحجم بيننا وبين الكون المنظور. فالأخير قُطره يبلغ نحو ١٠[٢٧]، بينما أقف أنا حافيَ القدمَين بطول ١٫٧٨ متر؛ وهو طول متوسط بامتياز. بتعبير آخر، الاختلاف في الحجم بين الإنسان والكون المنظور بأكمله يبدو ضئيلًا مقارنةً بالاختلاف بين حجمنا وطول موجة دي بروي المصاحب لنا، الذي قيمته ١٠[٣٦]. وهذا هو السبب الأساسي الذي يجعل البشر لا يتصرَّفون كجُسيمات كمية؛ فنحن أكبر حجمًا مما يتطلَّبه ذلك.

غير أن العالَم صغير جدًّا في نطاق النانو بالفعل. فلنُكرر حسبتنا البسيطة على إلكترون، وكتلته ٩٫١١ × ١٠[−٣١] كيلوجرامات. ما القيمة التي سنختارها للسرعة؟ ثمة تنوُّع كبير في الإجابات عن سؤال «ما سرعة الإلكترون؟» (وهو سؤال يُشبه قليلًا النسخة الميكانيكية الكمية من سؤال «ما طول قطعة الخيط هذه؟») بحسب السياق. وسنختار سياقًا ملائمًا لنطاق اهتمامنا المنصبِّ على تكنولوجيا النانو. في عام ٢٠١٥، حدَّد فريق دولي من الباحِثين بقيادة راينهارد كينبرجر، أستاذ فيزياء الليزر والأشعة السينية بجامعة ميونيخ التقنية، سرعةَ إلكترون يتحرَّك داخل طبقة بالِغة الرقة من الماغنسيوم، سُمكها بضع ذرَّات فقط، فكانت ٥٠٠٠ كيلومتر في الثانية تقريبًا. إن أخذنا حاصل ضرب كتلة الإلكترون وسرعته، نجد أن كمية تحرُّكه صغيرة إلى حدٍّ لا يُمكن تصوُّره بالمقارنة بإنسان يتجوَّل بسرعة المشي العادية؛ إذ تبلغ ٤٫٦ × ١٠[−٢٤] كيلوجرامات في الثانية. وهذا يعني أن الطول الموجي الذي افترضه دي بروي المصاحب للإلكترون المذكور يبلغ نحو ٠٫١٤ نانومتر؛ وهي قيمة تناظر قطر ذرة. والاتساق بين طول موجة الإلكترون وقطر الذرة بالغُ الأهمية. فكما أن موجات الضوء تتعرَّض للحيود بفعل الأجسام ذات الأبعاد المقاربة لطولها الموجي (مما ينتج عنه ألوان الطيف التي تظهر على الوجه السفلي للأقراص المضغوطة على سبيل المثال)، فإن حزمةً من الإلكترونات تسقط على سطح بلورة ستتعرَّض للحيود بفعل البِنية البلورية الذرية.

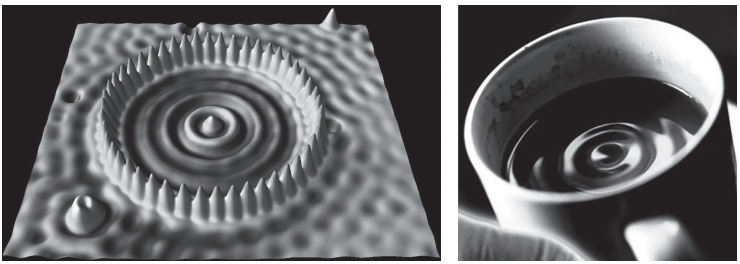
كان هذا النوع من الحيود تحديدًا هو ما قدَّم الدليل التجريبي الأول والدامغ على الطبيعة الموجية للإلكترونات، والمادة بأكملها بالتبعية. وفي تجربة رائدة نفَّذها العالِمان كلينتون دافيسون وليستر جيرمر، بشركة «ويسترن إليكتريك» (التي صارت فيما بعدُ «بيل لابز») منذ قرن، تعرَّضت إلكترونات للحيود من خلال بلورة نيكل لتشكل نمط حيود على شاشة فلورية. قبل اختراع مجهر المسبار الماسح بزمنٍ طويل، كان حيود الإلكترونات يُستخدَم لتحديد طريقةِ توزيع الذرات في المادة. (هذا لا يعني أن الفحص

بمجهر المسبار الماسح حلَّ محل حيود الإلكترونات. بل على العكس تمامًا؛ فالمسبار الماسح وحيود الإلكترونات يُكمِّل كلٌّ منهما الآخر لإمدادنا بالمعلومات المطلوبة عن البِنية الذرية والجزيئية والنانوية للمادة.)

قد يُزعَم أن تَكوُّن أنماط الحيود ليس دليلًا مباشرًا على وجود موجات للمادة؛ فما نراه هو قيمٌ عظمى وقِيَم صغرى تُفسَّر بأنها ناشئة عن سلوك موجي، لكن ألا يُحتمَل أن يكون مصدر النمط شيئًا آخر؟ ثمَّة أسباب عديدة تجعلنا نُفسِّر منشأ نمط الحيود بأنه من تداخُل الموجات، لكن أبرز الأدلة على الخواص الموجية للمادة تأتي مُجددًا من الفحص بمجهر المسبار الماسح. لنلقي نظرةً عن كثبٍ على تلك اللقطات من فيلم «صبي مع ذرَّته». لاحظ كيف أن ترتيب ذرات أول أكسيد الكربون في كل لقطة محاطٌ بنمط من التموجات؛ حيث يصوِّر ميكروسكوب المسبار تداخل الموجات الإلكترونية. لقد صار بإمكاننا أن نرى السلوك الموجي للمادة أمام أعيُننا على شاشة كمبيوتر.

الأفضل من ذلك أن مجهر المسبار الماسح يُتيح لنا إنشاء حاويات للموجات الإلكترونية. فالذرَّات والجزيئات يمكن ترتيبها حسب الرغبة (فلا تخضع لأي قيود إلا من القوى بين الذرية والقوى بين الجزيئية على سطح العينة) بحيث تعكس الموجات وتُقيِّدها في حيزٍ مكاني معين. والمثال الأيقوني على هذا النوع من التقييد هو السياج الكمومي الموضَّح في شكل ٢-٢؛ حيث بُنيت حلقة ذات أبعاد نانوية من الذرات لحبس الإلكترونات داخلها. وكما كانت الحال مع شعار شركة آي بي إم في الفصل الأول، شيَّدت مجموعة دون آيجلر هذا السياج في معامل آي بي إم البحثية في ألمادن (إلا أن العمل هذه المرة كان بقيادة مايك كرومي، ويعمل الآن في جامعة بيركلي، وفيه استُخدِمت ذرات حديد على النحاس بدلًا من الزينون على النيكل.) وقد أُدرِجت أيضًا صورةٌ للموجات الموقوفة التي تتكوَّن عند هزِّ كوب القهوة برفقٍ على سبيل المقارنة. ربما تكون قد شاهدت هذا النمط المُميز الذي يتكوَّن من دوائر متَّحدة المركز يتكوَّن في كوب القهوة أو الشاي الخاص بك بينما تنتظر مغادرة القطار المحطةَ. فاهتزازات عربة القطار تنتقِل إلى السائل مما يتسبَّب في اهتزازه بالتبعية، ويُشكِّل تأرجُح السائل ذهابًا وإيابًا موجةً موقوفة؛ لأن القهوة «محبوسة» داخل الكوب.

يمكننا أن نرى من نواحٍ عديدة أن الفيزياء التي ينشأ عنها النمط داخل السياج الكمومي مُشابهة جدًّا لذلك. فالموجات الإلكترونية تنعكس من سياج الذرات المحيط بها، وترتد جيئةً وذهابًا، وتتداخل مكوِّنة نمط الموجات الموقوفة الذي نراه داخل السياج.



شكل ٢-٢: على اليسار: سياج كمومي يتكوَّن من ٤٨ ذرة حديد على سطح بلورة من النحاس، وُضِعت كلٌّ منها في مكانها باستخدام رأس ميكروسكوب ماسح نافذ. يبلُغ قطر هذا السياج نحو ١٠ نانومترات، وقد صنعه مايك كرومي وزملاؤه في معامل أبحاث آي بي إم عام ١٩٩٣. ويمكن رؤية أدلة دامغة على وجود الخصائص الموجية للمادة في النطاق النانوي داخل هذه الحلقة من ذرَّات الحديد. على اليمين: موجة موقوفة تكوَّنت داخل كوب قهوة يتعرَّض للاهتزاز. النمط المتكون على سطح القهوة مطابق رياضيًّا للنمط المتكون داخل السياج الكمومي.

ويظل النمط واحدًا تمامًا، برغم الفارق الهائل في نطاق الأطوال (النانومتر في مقابل السنتيمتر)، ودرجات الحرارة (٤ كلفنات في مقابل درجة حرارة الغرفة، أي حوالي ٣٠٠ كلفن)، والضغط (بيئة فائقة التفريغ في مقابل الغلاف الجوي)، والمادة (النحاس الصلب في مقابل القهوة السائلة). (بل إنه النوع نفسه من الأنماط رياضيًّا؛ ويُعرف باسم دالة بيسيل.) ومن الجدير بالملاحظة هنا أن العامل المشترك الوحيد بين القهوة داخل كوبها والإلكترونات داخل سياجها هو التماثل في الحيز الذي يطوقهما؛ إذ يتخذ شكل دائرة في كلتا الحالتين.

بالرغم من التماثل الرياضي، فإن الموجة الموقوفة داخل السياج الكمومي لها شكل مختلف تمامًا عن نظيرتها الماكروسكوبية في كوب القهوة. ففي كوب القهوة، تُنتِج حركة السائل موجاتٍ حقيقية ملموسة. أما على المستوى الكمومي، فإن النمط المُتكوِّن داخل السياج هو نمط الموجة «الاحتمالية». فالقمم والقيعان، على الترتيب، تُمثل مناطقَ ذات احتمالية مرتفعة ومناطق ذات احتمالية مُنخفضة لإيجاد إلكترونات. والمجهر النافذ الماسح حسَّاس إلى حدٍّ مُذهل لوجود الإلكترونات أو غيابها تحت الرأس؛ لذلك يُمكنه أن يرصد التفاوت في الاحتمالية — أو الكثافة الاحتمالية — لا على مستوى الذرَّات فحسب، بل بتبايُن أصغر بكثيرٍ من حجم الذرة. وعلى عكس القهوة، يكون النمط المرصود داخل

السياج الكمومي نمطًا ثابتًا؛ أي موجة مُتجمِّدة في الزمن لا تتغير. وفوق ذلك، ومع كل ذاك الحديث عن سمات النصوص العلمية المبسطة لفيزياء الكم من عدم اليقين والعشوائية وعدم القابلية للتنبُّؤ، فإن هذا النمط يُعبِّر عن تفاوتٍ احتمالي يمكن التنبُّؤ به بنجاح تام.

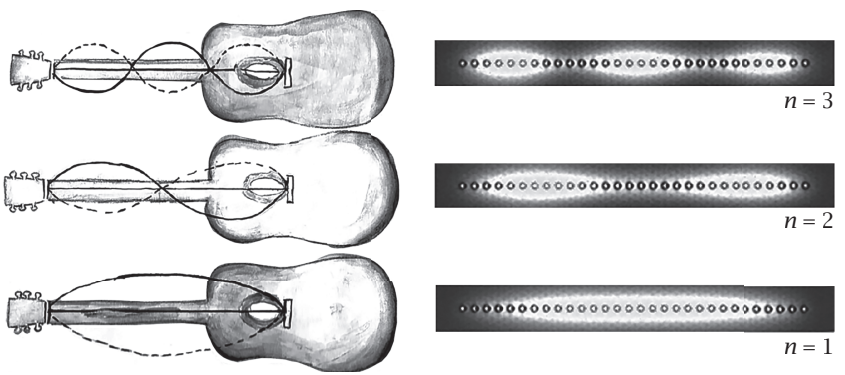
وكما قد تتصوَّر، إذا غيَّرنا شكل الحاوية، فإن النمط الذي تُكوِّنه الإلكترونات المحبوسة سيتغيَّر ليعبِّر عن التماثُل الجديد. ولكن ما قد يكون أهم من ذلك أن «طاقات» الإلكترونات تعتمد على شكلٍ وحجم البنية النانوية التي تحتويها. ولعل أفضل طريقةٍ لفهم ذلك هي من خلال تأمُّل المقابلات بين النطاق النانوي والعالم الماكروسكوبي مرة أخرى. فميكانيكا الكم في جوهرها نظريةٌ تتناول الموجات. ولذلك، فإن الكثير مما نفهمه عن الظواهر الموجية في العالم من حولنا يمكن تقليصه ليُساعدنا في تفسير سلوك المادة في نطاق النانو. وقد رأينا هذا بالفعل في الموجات داخل كوب القهوة. لنأخُذ الآن مثالًا أبسط، ألا وهو وتر الجيتار.

عندما ننقُر وترًا من أوتار الجيتار، فإننا نُثير موجاتٍ تظل قممها وقيعانها على موضعها على امتداد طول الوتر (وموضح مثال على هذا شكل ٢-٣)؛ وتُسمى هذه الموجات بالموجات الموقوفة، وتختلف عن الموجات المرتحلة، وهي النسخة الأحادية الأبعاد المُماثلة للموجات الموقوفة الثنائية الأبعاد التي رأيناها في السياج الكمومي وكوب القهوة في شكل ٢-٢. يأتي صوت الجيتار المُميز من مزيج من الموجات الموقوفة (أو النغمات التوافقية) العديدة؛ حيث يمكن أن يتردَّد صداه. ويُعزى اختلاف نفس النغمة، ولتكن مثلًا نغمة «دو الوسطى»، على الجيتار عنها في البيانو والكمان، أو أي آلة وترية أخرى تُفضِّلها، إلى أن كلَّ آلة لها مزيجها المُميز من النغمات التوافقية. فجرس ونغمة أي موسيقى — بل وأي صوت — يعتمد كليًّا على توليفات النغمات التوافقية.

الموجات والدوال الموجية في نطاق النانو

ما علاقة كل هذا بتكنولوجيا النانو وفيزياء الكم؟ له علاقة كبيرة. فمثلما ترتفع حدَّة النغمة الناتجة عن وتر الجيتار عند تقصير طول الوتر، تتغير طاقة الإلكترونات أيضًا بتقييد الموجات المُصاحبة لها في حيزٍ مكاني أصغر. فكلما قصر طول الوتر المُتذبذب، ارتفعت حدة الصوت؛ وكلما صغرت البنية النانوية، زادت طاقة الإلكترون. وباستخدام ميكروسكوب أنبوبي ماسح، يُمكننا بناء «أوتار» نانوية الأبعاد لتقييد الموجات الإلكترونية داخلها والتحكُّم في طاقتها بالتبعية. إلى جانب أن طاقة الإلكترون تكون مُنفصلة؛ أي

مُكمَّاة، كما يحدث في الذرَّات، مع الفارق أن البنية النانوية يُمكنها بسهولة أن تحوي عشرات أو مئات أو حتى آلاف الذرات. وبالرغم من أن الجدول الدوري يُقدم لنا مجموعةً كبيرة من الذرات المختلفة للاختيار من بينها، فإن طاقات الإلكترونات في كلٍّ منها تكون ثابتةً بفعل الجهد الذي تُحدِّده النواة الذرية. لكن على العكس، تُتيح لنا تكنولوجيا النانو بناء «ذرات اصطناعية»؛ وهي بنًى نانوية ذات مستويات طاقة إلكترونية مُنفصلة قابلة للتوليف والضبط. تُعرف هذه الذرات الاصطناعية بأسماء مُتنوِّعة أيضًا، مثل النقاط الكمومية، والعناقيد النانوية، والجسيمات النانوية، والبلورات النانوية، ويمكن أن تُستخدَم لتشكيل بنًى وأجهزة ومواد حسب الطلب، باستخدام طريقة التصميم من أسفل لأعلى.



شكل ٢-٣: ثمة تَشابُهات كبيرة جدًّا بين الموجات الموقوفة التي تتكوَّن على أوتار الجيتار والموجات الاحتمالية المُصاحبة للإلكترونات في البِنى النانوية. الصور على اليمين في كل حالة توضح سلسلة (أو وترًا) من ٣٠ ذرة إنديوم، أُنشِئت باستخدام المجهر النافذ الماسح.

ثمة مثال رائع للغاية على هذا موضح في شكل ٢-٣، وهو مأخوذ من مجموعة أعمال ستيفان فولش البحثية في معهد باول-دروده لإلكترونيات الجوامد في برلين. صنع فريق فولش «وترًا» أحاديَّ الأبعاد من ذرات الإنديوم، ثم رصدوا الموجات الاحتمالية للإلكترونات المحبوسة باستخدام المجهر النافذ الماسح نفسه الذي صنع هذه البنية النانوية. يتراكب على هذا الوتر الذري المُوضَّح في شكل ٢-٣ قيمٌ مُتباينة للتوصيلية على امتداد طول الوتر؛ والتوصيلية هي تدفُّق الإلكترونات بين رأس المجهر النافذ الماسح والسلسلة. تتناسب

التوصيلية طرديًّا مع الكثافة الاحتمالية؛ فكلما كانت منطقةٌ ما أكثرَ سطوعًا، زادت احتمالية إيجاد إلكترون فيها. يتطابق هذا النمط المُكوَّن من قِمَم وقيعان (أو عُقَد وبطون بلغة الموجات) على الوتر النانوي الموضَّح في شكل ٢-٣، مع النمط الذي نجده في أنساق الذبذبة العديدة (وتُعرف أيضًا بتردُّدات الرنين، أو النغمات التوافُقية، أو الأنساق الطبيعية للذبذبة)، التي تتكوَّن في وتر ماكروسكوبي مثبَّت من كِلا طرفيه. بعبارة أخرى، تُشاهَد نفس أنماط الموجات الموقوفة في المستوى الكمومي التي تُشاهَد في وتر جيتار مُتذبذب، وهذا دليل مباشر بصري ومحسوس لا على الطبيعة الموجية للمادة فحسب، بل أيضًا على الفاعلية الملحوظة للفيزياء الرياضية في توصيف أنظمة مُتباينة كهذه تقع في نطاقات شديدة التفاوت من الأطوال.

رغم وجود أوجه تشابُهٍ كثيرة جدًّا بين فيزياء وتر الجيتار وفيزياء الوتر النانوي؛ فهناك فارق أساسي بينهما هو ما يتسبَّب في قدْر كبير من «الغرابة» التي تُحيط بعالم الكم. فالموجات الإلكترونية على الوتر النانوي توَصَّف من خلالِ ما يُعرف في ميكانيكا الكم بـ «الدوال الموجية». ورغم الأهمية المحورية للدوال الموجية في ميكانيكا الكم، فإنها ليست بالشيء الذي يمكن رصده مباشرةً في أي تجربة. والسبب الأساسي لهذا هو احتواؤها على أعداد مُركَّبة، وهي أعداد تشمل الكمية التخيلية $i = \sqrt{-1}$. نحن نكتب العدد المُركَّب z على الصورة $z = x + iy$؛ حيث x وy كلاهما عدد حقيقي. والجَذر التربيعي لعدد سالب ليس شيئًا يمكن قياسه في تجربة؛ فهو ليس عددًا حقيقيًّا. لكن يُمكننا أن نقيس الكمية zz^*، حيث $z^* = x - iy$ تُسمَّى «المُرافق المُركَّب» للعدد z. إذا أخذنا حاصل ضرب عدد مركَّب، قيمة مركَّبة، مع مُرافِقه، فإننا بذلك نتخلص من العدد التخيلي، أي $zz^* = x^2 + y^2$. بعبارة أخرى، zz^* عدد حقيقي؛ ولذا يمكن قياسه.

غير أن الدالة الموجية ليست مجرد عددٍ مركَّب؛ بل دالة من أعداد مركَّبة، أو دالة مركَّبة على سبيل الاختصار. الدالة الموجية نفسها، التي يُعبَّر عنها عادةً بالرمز الإغريقي ψ أو «بساي»، ليست شيئًا يمكن رصدُه مباشرة في التجارب (لأنها دالة مركَّبة). لكن حاصل ضرب ψ مع مرافقها المركَّب، أي $\psi\psi^*$، يشكل دالة حقيقية — حقيقية بالمعنى الرياضي — ويُمكننا بالفعل رصدها تجريبيًّا. تصف هذه الدالة كيف تتغير احتمالية إيجاد جُسيم كموميٍّ ما — الإلكترون في حالتنا — في الزمان والمكان. ومن الجدير بالملاحظة أن المجهر النافذ الماسح يُمكنه تصوير هذه الخرائط الاحتمالية مباشرة. وهذه الآلية تنتج صورًا للدالة الحقيقية $\psi\psi^*$ — التي تُعرف أيضًا بالكثافة الاحتمالية — وهذا

ما نراه في الشكلَين ٢-٢ و٢-٣. (ثمة بعض التحفُّظات والاعتبارات الدقيقة في هذا المقام بخصوص دور رأس المجهر النافذ الماسح نفسه على سبيل المثال، لكن الشكلَين ٢-٢ و٢-٣ يُصوِّران توزيع الكثافة الاحتمالية بدرجةٍ جيدة جدًّا من التقريب.)

أظهرت تجربة فولش وآخرين (وتجارب مُماثلة سبقتها أجرتْها مجموعات أخرى تستخدم المجهر النافذ الماسح، ومنها على وجه الخصوص تجربة ويلسون وزملائه في جامعة كاليفورنيا بإيرفين) أن تغيير حجم الوتر الكمومي، ولو بإضافة أو إزالة ذرة واحدة، يُقيد الدالة الموجية الإلكترونية في حيزٍ مكاني أكبر أو أصغر. وقد طُبِّق هذا على بِنية نانوية أُحادية الأبعاد في هذه الحالة (الوتر)، لكن يُمكن بالسهولة ذاتها تطبيقه على بِنية ثنائية الأبعاد (السياج الكمومي)، أو جسم نانوي ثلاثي الأبعاد كما سنرى بعد قليل. وكلما قُيِّد الإلكترون أكثر؛ أي صغر الحيز المكاني الذي يُمكنه الحركة فيه بحُرِّية، زادت طاقته الحركية.

يمكن تفسير هذا أيضًا من خلال مبدأ الشك أو اللايقين الشهير لهايزنبرج أيضًا. إن تقييد الإلكترون في حيزٍ أضيق يعني أن موجته الاحتمالية أصبحت أقلَّ تمدُّدًا في المكان. بتعبيرٍ آخر، صارت القِيَم المُمكنة لموضع الإلكترون أقلَّ نسبيًّا، مما يعني أن النطاق المُمكن لِقِيَم كمية تحرُّك هذا الإلكترون ارتفع بقدْر مُماثل، وفقًا لمبدأ هايزنبرج. وهذا الارتفاع في قِيَم كمية التحرك يُقابله ارتفاع في طاقة الإلكترون بدَورها. (يشار إلى أن هذا النوع من الشك أو عدم اليقين هو خاصية أساسية من خواص الموجات أيًّا كان وصفها وأيًّا كانت أبعادها، وليس مجرد نتيجة لعملية القياس. في غالب الأحيان يُختزل مبدأ الشك لهايزنبرج خطأً في وصف مبسط بأن «القياس يُسبب اضطرابًا في النظام». وتلك المُعضلة، المعروفة بمعضلة القياس، هي بلا شك جانبٌ جوهري من ميكانيكا الكم، لكنها مُختلفة تمامًا عن مبدأ عدم الشك لهايزنبرج.)

إن مستوى التحكم الذي بات متاحًا لنا الآن ليس على مستوى النانو ولا الذرات فحسب، بل على مستوى الروابط الكيميائية المفردة حتى، وهو مستوًى مُدهش من التحكم. يُمكننا باستخدام ميكروسكوب ماسح تشييد بنًى نانوية ذرةً بذرَّة، و«ضبط» طاقات الإلكترونات التي نحتاج إليها ببساطة من خلال التحكُّم في حجم البنية. وكما أوضحنا في الفصل الأول، بمجرد أن نتمكن من التحكم في مواضع الإلكترونات وطاقاتها، يُمكننا تحديد وتوليف أي خاصية نريدها في المادة. أو كما فعل فريق ميشيل سيمونز بجامعة نيو ساوث ويلز، الذي كان له السبق في ذلك وكان أداؤه مميزًا ودقيقًا (وسنتحدَّث

عنهم أكثر في الفصل الرابع)، يُمكننا استخدام ميكروسكوب المسبار الماسح لبناء أجهزة إلكترونية نانوية قادرة على العمل ذات دقَّةٍ ذرية، أو لتصنيع ترانزستورات تتكوَّن من ذرة واحدة، أو استكشافُ ما إذا كان قانون أوم يعمل حتى مستوى الذرات (وتبين أن هذا صحيح)، وتعيين الموضع الدقيق للذرات الشائبة المُنفردة في شِبه مُوصل للتحكُّم في توصيله الكهربي. لكن ثمة مشكلة كبيرة تتعلق بالقُدرة المُنقطعة النظير لميكروسكوب المسبار الماسح على تصوير العالَم المُتناهي الصغر والتحكم فيه؛ إذ يتَّسِم بالبطء الشديد في ذلك.

من التوالي إلى التوازي

صُنِّعت البِنى النانوية لتقييد الإلكترونات التي تناولناها حتى الآن في بيئاتٍ، أفضلُ ما توصف به أنها استثنائية؛ فقد صُنِّعت في درجات حرارةٍ لا تعلو الصفر المُطلق بأكثر من بضع درجات، وتحت ضغطٍ بالِغ التفريغ، وباستخدام عينات أُعِدَّ سطحها بحيث يخلو خلوًّا شبه تامٍّ من المُلوِّثات حتى المستوى الذري. ومثل هذه الأنواع من القيود تجعل تحوُّل النماذج الأولية للأجهزة النانوية إلى بيئاتٍ أقلَّ تساهُلًا في الحياة اليومية مسألةً في غاية الصعوبة؛ فلا أحد يودُّ أن يُضطَرَّ إلى تبريد هاتفه المحمول أو حاسوبه المحمول أو جهازه اللوحي إلى أربع درجات فوق الصفر المُطلق ليبدأ في العمل.

ولا تقلُّ مسألة زمن التصنيع إشكالًا. وثمة حسبة تقديرية بسيطة سريعة أخرى تُبرِز كم أن السرعة المحدودة للتقنية التي يقوم عليها ميكروسكوب المسبار الماسح الذي نستخدمه اليوم، لا سيما عندما يتعلق الأمر برصد الذرَّات ووضعها في مكانها ذرةً تلوَ الأخرى، تقف عائقًا أمام إنتاج الأجهزة على نطاقٍ واسع ومكثف. لنأخذ تقديرًا تقريبيًّا مُتفائلًا لتقدير الوقت المطلوب لتنفيذ كل عملية مُعالجة للذرات؛ ولنختَر مثلًا ثانيةً لكل ذرة. يُوجَد نحو ١٤١٠ ذرات في كل سنتيمتر مُربع على سطح بلورة السليكون. (تختلف كثافات الذرات على سطح المواد الأخرى بعض الشيء، لكنها تقع ما بين ١٠-١٣ إلى ١٠-١٥ سنتيمترات مربعة.) ولذلك، سيستغرق ميكروسكوب المسبار الماسح زمنًا في حدود ١٤١٠ ثوانٍ لتجميع طبقةٍ واحدة من الذرَّات مساحتها سنتيمتر مُربع واحد، إن أمسكنا بكل ذرة ووضعناها في مكانها. وهذا زمن طويل. بل طويل جدًّا.

إن تاريخ البشرية المُدوَّن بأكمِلِه تبلغ مُدته نحو ٥٠٠٠ عام، أي نحو ١١١٠×١٫٦ ثوانٍ. بعبارة أخرى، سيستغرق ميكروسكوب مسبار ماسح يعمل بكامل طاقته ٢٤ ساعة

في اليوم و٣٦٥ يومًا وربع اليوم في العام — بتموضعٍ ذي دقَّةٍ ممتازة ومن دون أخطاء للذرات ذرةً بذرة — أي نحو ألف ضعف التاريخ المُدوَّن بأكمله لتصنيع طبقةٍ واحدة من الذرات. وحتى إن كان لنا أن نشهد زيادةً في سرعة هذه التقنية مليون مرة بحيث يستغرق الأمر ميكروثانية واحدة لوضع ذرةٍ واحدة في مكانها، تظل العملية بأكملها تستغرق ٨١٠ ثوانٍ. وهذا يعني أن الأمر يستغرق أكثر من ثلاث سنوات لتصنيع طبقة واحدة من الذرات في حجم طابع البريد؛ وهذا ليس بعرضٍ مُشجِّع يناسب تكنولوجيا تصنيعية قابلة للتطبيق.

غير أن علوم النانو ليست كلها تحتاج إلى هذه الظروف الصارمة وغير العملية لتنفيذها. فالطبيعة تستطيع تجميعَ عددٍ لا يُحصى من البلورات يحمل كلٌّ منها مئات الملايين من طبقات الذرات في إطارٍ زمني يبلغ دقائق أو أقل، دون الحاجة إلى قوة خارجية مثل ميكروسكوب المسبار الماسح لتوجيه كل ذرةٍ أو جزيء إلى مكانه مباشرة. لكنها بدلًا من ذلك تستخدِم القوى بين الذرية (أو بين الجزيئية أو كليهما معًا) التي تناولناها في الفصل الأول لتجميع الذرات أو الجزيئات المكونة للبلورات، بالطريقة المُلائِمة تمامًا لتقليل الطاقة الكلية إلى أدنى حدٍّ، في عمليةٍ تُعرَف بالتجميع الذاتي. تلعب الإنتروبيا، التي ترتبط بالعدد الكُلي لكل التشكيلات الذرية أو الجزيئية المُمكنة، دورًا كبيرًا أيضًا في عملية التجميع الذاتي التي سنتناولها أكثر في الفصل القادم.

لقد رأينا بالفعل أن التخليق الكيميائي الذي يشتمل على تفاعُلات في الطور السائل في بيئة عينة أبسطُ كثيرًا من ذلك (أي في أنابيب اختبار وكئوس زجاجية) يمكن استغلالها في إنتاج بِنًى نانوية مثل النانوكيد بمستوى تحكُّم استثنائي في بِنيتها الذرية. وهذه هي عملية التجميع الذاتي في إطارها العملي. فبدلًا من تحريك الذرات والجزيئات ببطءٍ لا يُطاق من خلال «القوة العشوائية» لمجهر المسبار الماسح، تُستغل القوى بين الذرية والقوى بين الجزيئية — وتُولَّف من خلال تعديلات كيميائية دقيقة (أو غير دقيقة في بعض الأحيان) — لتجميع البِنى النانوية والماكروية. وكما سنرى في الفصل المُقبل أيضًا، يمكن استخدام التجميع الذاتي لإنتاج تشكيلةٍ مُذهلة من البِنى النانوية المتفاوتة في الحجم والشكل والتماثل، يرتبط شكلها جوهريًّا بوظيفتها.

وما النانوكيد إلا مثال حديث جدًّا على قوة تأثير التخليق الكيميائي، في الطور السائل، والتجميع الذاتي في تكنولوجيا النانو. فمنذ ما يقرُب من ٢٠٠ عام، كان مايكل فاراداي، الذي يمكن وصفه بأنه أول مَن تَخصَّص في علوم النانو — أول من درسوا جسيمات

الذهب النانوية. (غير أن فاراداي لم يستخدِم هذا المصطلح لتوصيف الجسيمات التي خلَّقها ودرسها، وبلا مبالاة عزا التأثيرات الملحوظة التي رصدها إلى «مجرد تبايُن في حجم الجسيمات».) لكن قبل ٣٠٠ عام من تجارب فاراداي، كان حرفيو الخزف في عصر النهضة في إيطاليا (وأماكن أخرى) يستفيدون من الجسيمات النانوية بغير علم لإنتاج طلاءات زجاجية ملوَّنة لتلميع الخزف. وقبل ذلك بألفي عام، تحديدًا في عام ٨٠٠ قبل الميلاد، كانت البِنية النانوية هي المسئول الأساسي عن اللون البنفسجي للمشغولات العاجية المصرية المَطلية بالذهب دون دراية من صُنَّاعها بذلك. ومن هذا المنظور، يمكن اعتبار تكنولوجيا النانو قديمةً قِدمَ العلم نفسه.

كل ذلك البريق …

> لقد استغرقت هذا الصيف في دراسة الذهب؛ فلم أجد نفسي مُهيَّأً للعمل على مسائلَ أصعب وأقوى من ذلك. كان العمل في نِتاجه كقصة الجبل والفأر، يحوي عناصر في غاية الأهمية وأخرى أقل أهمية، وإن نشرتُه يومًا ووقع عليه ناظراك، يُمكنني القول إنك ستتَّفق معي: شفافية الذهب، وكيفية انقسامه إلى جزيئات، وتأثيره على الضوء.

الاقتباس أعلاه مأخوذٌ من خطابٍ أرسله فاراداي إلى صديقه، الكيميائي الألماني كريستيان فريدريك شونباين، في بداية عام ١٨٥٦ ويتميز بما فيه من تواضُع. من الواضح أن فاراداي قد ظلَم نفسه كثيرًا، بالنظر إلى أن هذا العمل الذي يتحدَّث عنه لم يكن دراسةً رائدة لطريقة تفاعل الضوء مع المواد ذات التركيب النانوي فحسب، بل شمل أيضًا تخليق جسيماتٍ نانوية تخليقًا موجهًا محكومًا لأول مرة. وبالرغم من أن مايكل فاراداي يشتهر أكثرَ بعمله الرائد في الكهرباء والمغناطيسية، فهو في حقيقة الأمر مؤسِّس مجال الكيمياء الغروية بأكمله — ومن ثَم فهو من أرسى أُسسَ كيمياء النانو — بينما كان يدرُس الخواص البصرية لمعلقات جسيمات الذهب دون الميكروسكوبية في الماء.

باتت الوسائل التي استخدمها فاراداي، أو النسخ المُعدَّلة منها، الآن منهجًا قياسيًّا معتمدًا لتصنيع جسيمات الذهب النانوية، وهي سهلة بما يكفي؛ حتى إن أيَّ فيزيائي ضعيف في الكيمياء مِثلي يُمكنه تنفيذ خطوات تركيبها. ففي سبيل إنتاج جسيمات نانوية، صنع فاراداي محلولًا مُعلقًا غرويًّا، ينتج عن تبدُّد مادة في طورٍ ما وتحلُّلها

داخل مادة أخرى في طور مختلف، وهذه المادة في حالتنا هي جسيمات الذهب الصلبة (العديمة الذوبان) التي تتكتَّل في الماء. يمكن تكوين هذا النوع من معلق الذهب الغروي بمزج مركبات كيميائية عادية جاهزة متاحة للشراء — مثل كلوريد الذهب، وهيدروكسيد الصوديوم، وحمض الستريك — ولذا يمكن لطلبة الثانوية تصنيعه. ومما يُميز عملية التصنيع هذه استقرار المعلق الغروي الناتج وطول مدة بقائه. فقد يستغرق الأمر سنواتٍ عديدة حتى تبدأ جسيمات الذهب في التكتُّل بعضها مع بعض لتترسَّب وتنفصل عن المحلول؛ لأن شحنة كل جسيم من هذه الجسيمات تتسبَّب في استقرار المحلول الغروي وتمنع الجسيمات النانوية من الاقتراب الشديد بعضها من بعض. ولدَينا في ثلاجةٍ في أحد معاملنا بضع حاويات تحتوي على معلقات من جسيمات الذهب النانوية صنعها طلابٌ في الثانوية المتقدمة خلال المدرسة الصيفية منذ أكثر من عقد، وما زال شكلها كما كان يوم أن صنعوها ولم يتغير. وما يُثير الإعجاب أكثر أن أحد معلقات الجسيمات النانوية الأصلية التي صنعها فاراداي، وعمرها الآن ١٨٠ عامًا، محفوظة في المعهد الملكي في لندن، وما زالت محتفظة بحُمرتها التي تُشبه حمرة الياقوت رغم مرور نحو قرنَين.

حُمرة الياقوت؟ ألا ينبغي أن يكون لون الذهب ذهبيًّا؟ كلَّا، ليس في العالم النانوي. عندما يختزل حجم الذهب من بلورةٍ كبيرة الحجم إلى بلورات نانوية عرضها بضعة نانومترات (أو بضع عشرات من النانومترات)، فإنه يفقد لونه وبريقه المُميَّزين ويُصبح أحمر داكنًا بدلًا من ذلك. وهذا التغيير الجذري في اللون، وتبعات هذا على تفاعل الضوء مع المادة «الدقيقة الحبيبات»، هو ما أبهر فاراداي. لكن لم يتسنَّ تفسير الفيزياء الكامنة وراء لُغز الألوان هذا تفسيرًا كاملًا إلا مع ظهور فيزياء الكم في بدايات القرن العشرين. ومرة أخرى، كانت الخصائص المَوجية للمادة هي المسئولة عن التغير الجذري في لون الذهب.

لذلك كنتُ حتى الآن أتجاوز الحديث عن جانبٍ مهمٍّ من جوانب الموجات التي رأيناها داخل السياج الكمومي في شكل ٢-٢؛ وهو أن هذه الأنماط المُتكوِّنة لن تتكوَّن على أي سطح هكذا. فقد انتقى كرومي وزملاؤه سطحَ النحاس بالذات بعناية؛ لأن الإلكترونات هناك تتجوَّل بحُرية في الواقع. وفي غياب أي قيود، كحلقة ذرات الحديد التي تُكوِّن السياج، أو الذرات أو الجزيئات الشائبة، أو عيوب في البلورة، سيكون بإمكانها أن تتحرَّك عبْر البلورة بأكملها بلا عائق إلى حدٍّ كبير. وبسبب هذه الحرية في حركة الإلكترونات، يُعبِّر الفيزيائيون عن هذا النظام باسم «غاز الإلكترونات الحر» (أو «غاز فيرمي الحر»؛ تكريمًا

للفيزيائي الذي أسهم بالكثير والكثير في فهمنا لسلوك المادة). ويعتبر غاز الإلكترونات — ويشار إليه أحيانًا بـ «بحر الإلكترونات» أيضًا — سِمةً في الكثير من البلورات الفلزية؛ منها النحاس والذهب.

إن حرية الإلكترونات في التجول عبر بلورة الذهب تعني أن الإلكترونات تستجيب بصورةٍ جماعية لأي اضطراب أو استثارة، كموجة مغناطيسية مثلًا؛ أي ضوء مرئي. فإذا سلَّطت ضوءًا على كتلة ماكروسكوبية من الذهب (أو النحاس أو الفضة وما إلى ذلك)، تتأرجح الإلكترونات جيئةً وذهابًا في حركةٍ مُتزامنة بفعل المجال الكهربائي السريع التذبذُب للضوء. وفوق ذلك، يُصاحب هذا «التأرجح» مستويات طاقة منفصلة، تمامًا كما هي الحال مع مستويات الطاقة المُكمَّاة لإلكترونٍ مُقيد في وتر نانوي. والمصطلح المُستخدَم للتعبير عن هذا التذبذُب المُكمَّى هو البلازمون. وإن كان تردُّد الضوء الساقط f (الذي يرتبط بطوله الموجي λ، من خلال العلاقة $c = f\lambda$، حيث c هي سرعة الضوء) قريبًا من معدَّل تذبذب الإلكترونات، فإننا نحصل على ما يُعرف بـ «الرنين البلازموني».

والرنين ظاهرة تَلوح باستمرار عبر كلِّ مجالات العلوم والهندسة، بغضِّ النظر عن نوع النظام أو النطاق الكمومي. فكئوس النبيذ تُصدِر رنينًا عند نفس درجة الصوت لنغمة موسيقية مُعينة (حتى تصل إلى حدِّ الانفجار)، والجسور تتداعى لأن تردُّد رنينها يتوافق مع تردُّد القوة الدافعة المؤثِّرة عليها (سواء كانت هذه القوة هي قوة الرياح أو قوة خطوات أقدام متزامنة)، والأرجوحة ترتفع بالأطفال أعلى وأعلى حين تُضخ الطاقة الممنوحة للأرجوحة بالمعدل المطلوب (لكن دون انفجار ولا تداعٍ هذه المرة كما نأمل)؛ وكل هذه الأمثلة أنظمة رنين تُبدي أعلى استجابةً لها عند تردُّدٍ معين. وتتعرَّض الإلكترونات في جسيمات الذهب النانوية للرنين على النحو ذاته عند وصول القوة الدافعة إلى التردُّد المضبوط. ومرةً أخرى، يمكن ضبط الرنين البلازموني ببساطةٍ من خلال تغيير حجم البنية النانوية، مع العلم بأن البنية في هذه الحالة جسيمات نانوية ثلاثية الأبعاد وليس سياجًا كموميًّا ثنائيَّ الأبعاد أو وترًا أحاديَّ الأبعاد. فالإلكترونات تُقيَّد كلما صارت الجسيمات النانوية أصغر، مما يُقلِّل الحيز الذي يُمكنها أن تتذبذب فيه ويرفع تردُّد الرنين.

يرتبط لون الذهب ارتباطًا مباشرًا بتردُّد الرنين البلازموني. فهذا التردُّد يُحدِّد الطول الموجي للضوء الذي سيُمتص بقوة أكبر. على سبيل المثال، عندما يكون عرض الجسيمات النانوية للذهب ٣٠ نانومترًا، يؤدي الرنين البلازموني إلى تعزيز امتصاص الضوء في نطاق

اللونَين الأزرق والأخضر للطَّيف المرئي؛ حيث يكون أقصى امتصاص عند طول موجي يُقارب ٤٥٠ نانومترًا. وبدلًا من ذلك ينعكس الضوء الأحمر، الذي يتميز بطولٍ موجيٍّ أقل بكثير (في حدود ٦٥٠–٧٠٠ نانومتر)، مما يُفضي إلى لون حمرة الياقوت المُميز هذا الذي أذهل فاراداي يومًا، والذي يعكس الخصائص شِبه الموجية للمادة في المستويات الكمومية والنانوية.

إن هذا الاعتماد على الحجم لا يظهر من خلال الرنين البلازموني للجسيمات النانوية فحسب؛ فكقاعدة عامة، كلما صغرت الأجسام، زاد التردُّد الذي يحدث عنده الرنين. جرِّب أن تضرب بقوة على مسطرةٍ مُثبَّتة عند حافة منضدة أو مكتب، وكما نعلم تعتمد حدَّة النغمة الناتجة على طول الجزء الحُر الذي يهتز. فكلما صغر الجزء المُعلَّق في الهواء من المسطرة، ارتفع تردُّد الاهتزاز. ومع الاستمرار في تصغير حجم الجسم إلى الأبعاد النانوية، لن يكون تردُّد رنينه الميكانيكي في حدود عشرات من الهرتز كالمسطرة المهتزة، ولا مئات من الهرتز كتردُّد رنين كأس النبيذ أو الشوكة الرنانة، بل سيكون في عداد الملايين من الهرتز (ميجاهرتز) أو أكثر. وهذا المستوى من التردُّدات يرتبط أكثر في المعتاد بحيزٍ مختلف عن حيِّز الضوء المرئي في الطيف الكهرومغناطيسي، ألا وهو موجات الراديو. والجدير بالملاحظة هنا أن الأجسام النانوية يُمكنها أن تتذبذب ميكانيكيًّا بمعدَّلات مرتفعة نسبيًّا عن معدلات تذبذب المجال الكهربي لموجات الراديو.

في عام ٢٠١٩، تمكَّن العلماء في جامعة لانكستر وجامعة أكسفورد من إجراء قياسٍ مباشر للتذبذُب الميكانيكي لأنبوب كربون نانوي لا يتجاوز قطره ٣ نانومترات معلَّق بين وصلتَين معدنيتَين. بعبارة أخرى، لقد قاموا بتصنيع نظيرٍ نانوي مباشر لوتر جيتار حُر. ووجدوا أن أنبوب الكربون النانوي (الذي سنتناوله بمزيدٍ من التفصيل في الفصل الخامس) يتعرَّض للرنين عند تردُّد ٢٣١ ميجاهرتزا، وهي نغمة عالية لدرجةٍ لا تُعقل؛ حتى إنه ما من كائن على الأرض يُمكنه سماعها، بما في ذلك تلك الكائنات التي تحظى بأعلى عتبات سمع عند مجموعةٍ من التردُّدات، وهي الدلافين والخفافيش وعُثث الشمع، والتي يسع سمعها ترددات عالية تصل إلى ١٦٠ كيلوهرتزًا، و٢٥٠ كيلوهرتزًا، و٣٠٠ كيلوهرتز على التوالي.

ينتشر التذبذب والتردُّد في كل مكانٍ في نطاق النانو؛ فالطاقة الحرارية عند درجة حرارة الغرفة كافية لهزِّ الذرات والجزيئات والبِنى النانوية ما يجعلها في حركة دائمة. ولكن حتى عند أقل درجة حرارة وصلنا إليها على الإطلاق، وهي ٥٠٠ نانوكلفن تقريبًا

— وهي درجة أبرد بأكثر من مليون مرة من درجة حرارة الفضاء السحيق، وتبلغ ٢٫٧ كلفن — يظل هناك اهتزاز في نطاق النانو. ولا يُمكننا أبدًا أن نُجمِّد هذا الاهتزاز؛ لأن هذا من شأنه أن يخرق مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج؛ فكون الحركة الاهتزازية صفرًا يعني أن موضع الجسم مُحدَّد تمامًا، مما يعني أن كمية تحرُّكه تمتدُّ في حيِّزٍ واسع لا نهائي من القِيَم المُمكنة.

الذرات الاصطناعية: علوم النانو الصفرية الأبعاد

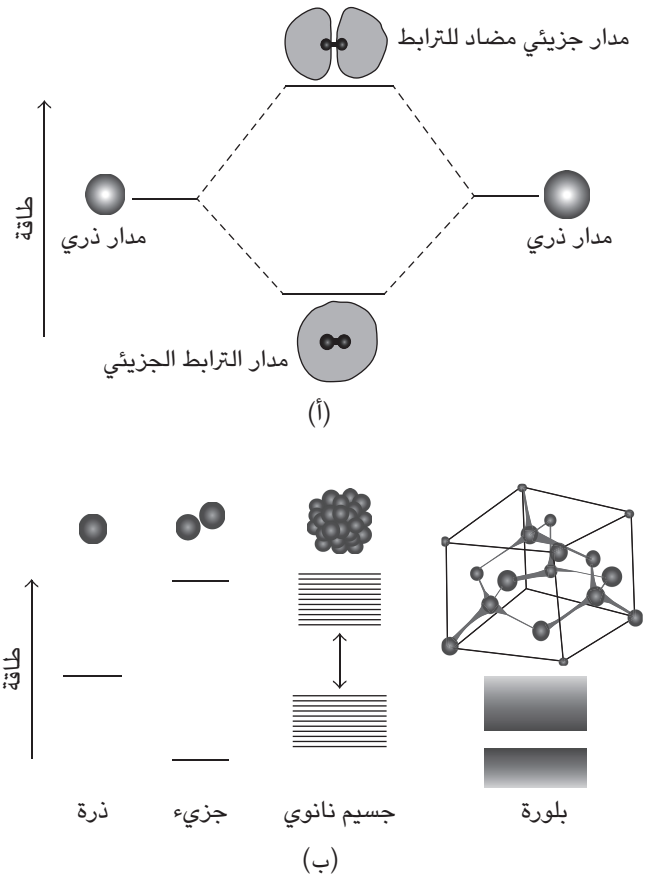
دعمت المعادن والفلزات النهضةَ التكنولوجية للبشرية منذ ما قبل العصور الكلاسيكية بكثير؛ فعصورُ ما قبل التاريخ تُحدَّد وتُعرَّف من نواحٍ كثيرة من خلال استغلال مُختلِف المعادن. لذا ربما لا يكون من المُستغرَب أن المعادن ما زالت تلعب دورًا مركزيًّا في تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين؛ حتى إن البعض أشاروا إلى الاهتمام الشديد بجزيئات الذهب النانوية بـ «حمَّى الذهب الثانية». فالرنين البلازموني للجسيمات النانوية الفلزية الذي تناولناه فيما سبق لا يقتصر استعماله على البصريات والإلكترونيات الضوئية النانوية، بل تتنوَّع استخداماته داخل تكنولوجيا النانو الحيوية والكيمياء النانوية في سياقاتٍ عديدة بما فيها أنظمة الاستشعار وحفز التفاعُلات الكيميائية، بل وتَستخدِم هوائياتِ استقبالٍ نانويةً. وبصفة خاصة، عندما ترتبط الجزيئات — بما في ذلك الجزيئات الحيوية الضخمة مثل البروتينات والأجسام المضادة — بسطح جسيم نانوي فلزِّي، فإنها تؤثِّر على التذبذب الجمعي للإلكترونات، وبذلك تُغيِّر تردُّد وشدة الإشارة البلازمونية. وفي أفضل الأحوال، يمكن استخدامُ هذا التعديل الذي يطرأ على البلازمون، جنبًا إلى جنب مع تقنيات التحليل الطيفي الأخرى، نوعًا من البصمة الجزيئية لتعيين النوع الكيميائي الذي ارتبط بسطح الجسيمات.

وما هذا إلا جزء صغير جدًّا من تطبيقات الجسيمات النانوية الفلزية في عِلم النانو، وسنعود لاحقًا لتناول بضعة أمثلة أخرى عليها. أما عندما يتعلَّق الأمر بتكنولوجيا المعلومات، فإن الهيمنة لأشباه الموصلات، لا المعادن. فالسليكون — وليس الفضة أو الصوديوم أو الفولاذ مثلًا — هو ما دفع صناعة الإلكترونيات الميكروية منذ بدايتها في أوائل الستينيَّات من القرن الماضي وحتى الوصول إلى نظيرتها من الإلكترونيات النانوية في القرن الحادي والعشرين. فلِمَ حدث ذلك؟

تتمتَّع أشباه المُوصلات بميزة أساسية على المعادن عندما يتعلق الأمر بالإلكترونيات؛ إذ يمكن تعديل توصيليتها الكهربية وضبطها. فالمعتاد عند الحديث عن تدفُّق الإلكترونات أن المعادن «تعمل دائمًا»، في حين ترجع هيمنة أشباه الموصلات في إلكترونيات الجوامد، وبالتبعية على صناعات المعلومات وتكنولوجيا الاتصالات، لسهولة تعديل توصيليتها الكهربية وإطفائها (ومن ثَم تشغيلها مجددًا). تنبع قدرة أي مادةٍ على توصيل الكهرباء — أو عدمها — من طريقة توزيع طاقات الإلكترونات المُكوِّنة لها فحسب. يمكن أن نفهم سبب هذا بالبدء أولًا بذرتَين ثم إضافة المزيد من الذرات تباعًا، لنخلق بذلك جسيمًا نانويًّا بطريقة التصميم من أسفل إلى أعلى، وتدبُّر كيفية تغيُّر توزيع الإلكترونات بتغير الحجم.

هل تتذكَّر الجهد بين الذري الذي تناولناه في الفصل الأول؟ في تلك الحالة افترضنا أن الذرَّات تفاعلت بعضها مع بعض تفاعلًا ضعيفًا من خلال اضطرابات الإلكترونات المكوِّنة لها. وفي سبيل فهم الخواص الإلكترونية للمواد، لا بدَّ أن نذهب إلى أبعدَ من هذه التفاعُلات الضعيفة، وإن كانت شائعة، ونُفكِّر فيما يحدث بالضبط عندما تتكوَّن الروابط الكيميائية. عند تفاعل ذرتَين من خلال قوى فان دير فالز، لا تتكوَّن رابطة فِعلية بينهما؛ وهو ما يُوصَف بأنه تفاعل فيزيائي لا تفاعل كيميائي. (توصف الذرات المُثبتة في موضعها على سطحٍ ما بهذه الطريقة — كما في شعار آي بي إم الذي يتكوَّن من ذرات زينون على سطح من النيكل — بأنها خاضعة لامتزازٍ فيزيائي لا امتزاز كيميائي.) أما عندما تتكوَّن رابطة تساهمية، فإن الإلكترونات المساهمة في العملية لا تكون مُقيدة بذرَّتها الأم، بل تتمدَّد سحابتها الاحتمالية الكمومية وتنتشِر عبر الجزيء الناتج. ولهذا الأمر تبعات مُهمة على التوصيلية الكهربية للجزيء، الذي يُصبح جسيمًا نانويًّا بإضافة المزيد من الذرات، ثم يُصبح في النهاية مادةً صلبة (يمكن تخيُّلها كأنها جزيء ضخم جدًّا) إن أضفنا المزيد.

المُخطط التوضيحي في شكل ٢-٤ يُغني عن ألف كلمة هنا. لتبسيط الأمور وتوضيحها سنتأمَّل الهيدروجين بإلكترونه الوحيد. لكل ذرة هيدروجين مُنفردة في شكل ٢-٤(أ)، يمكن تعيين احتمالية إيجاد الإلكترون في حيزٍ مكاني معيَّن حول النواة من خلال دالة رياضية تُعرَف بالمدار (أو الأوربتال) الذري. والمدار الذري في جوهره هو الدالة الموجية لإلكترونٍ واحد. أما بالنسبة إلى الإلكترونات المُقيدة داخل السياج (شكل ٢-٢) أو «الوتر النانوي» (شكل ٢-٣)، فتمثل الذرة شكلًا آخر من التقييد الكمومي. فالنواة، في هذه الحالة، تُنشئ الجهد الكهروستاتيكي الذي يُقيد الإلكترون.



شكل ٢-٤: من مستويات الطاقة إلى نطاقات الطاقة. (أ) تُدمَج ذرتا هيدروجين، لكلٍّ منهما إلكترون واحد في المدار الذري 1s، لتكوين جزيء هيدروجين. يؤدي هذا إلى تكوين مدارَين جزيئِيَّين؛ ينتج أحدهما، وهو مدار الترابط، عن التداخل البنَّاء بين المدارات الذرية، والآخر هو المدار المضاد للترابط وينتج عن التداخُل الهدَّام بينها. (ب) تطور مستويات الطاقة لتكوين نطاقات الطاقة. مع زيادة عدد الذرات من اليسار إلى اليمين يزداد عدد مستويات الطاقة كذلك، حتى تُصبح كمية المادة كبيرة كفاية لدرجةٍ لا تظلُّ معها المستويات منفصلة، بل تُشكِّل نطاقاتٍ مُتصلة على نحوٍ فعَّال.

تقلُّ طاقة مدار الترابط الجزيئي عن طاقة المدار الذري في كلٍّ من ذرتَي الهيدروجين المُنفصلتَين على حدة. وهذه هي القوة التي تحفز تكوُّن الرابطة الكيميائية في المقام الأول؛ لأن طاقة النظام تنخفِض عند تداخُل المدارات الذرية معًا. ويشغل كِلا الإلكترونين (بواقع إلكترون من كل ذرة هيدروجين) المدارَ الجزيئي. وكما هو موضح في شكل ٢-٤(أ)، ينتج عن مدار الترابط الجزيئي احتماليةٌ مُرتفعة لإيجاد الإلكترون بين البروتونين؛ إذ تعمل الشحنة الإلكترونية باعتبارها «مادة لاصقة» تربط الذرتَين معًا. أما المدار المضاد للترابط، فيُصاحبه احتمالية عالية جدًّا لأن يتجنَّب الإلكترون المنطقة بين البروتونَين. وكما يُوحي الاسم، فإن الإلكترون إن وجد نفسه في المدار المضاد للترابط، تفقد الرابطة الكيميائية استقرارها ويمكن للجزيء أن يتفكَّك إلى ذرَّاته المكونة له مرة أخرى.

يتَّسِم المدار المضاد للترابط كذلك بارتفاع مستوى طاقته. وهذا يعني أن حالة الطاقة الدنيا للإلكترون، التي تُعَد الحالة «الطبيعية» له — وتسمَّى في ميكانيكا الكم الحالة الأرضية — هي عندما يشغَل الإلكترون مدار الترابط. لذا لا بد من ضخِّ دفقةٍ من الطاقة حتى يشغَل الإلكترون المدارَ المضاد للترابط. قد تكون هذه الطاقة في صورة طاقة حرارية (أي بالتسخين)، أو في صورة فوتونات؛ إذ يمكن تفكيك الجزيء من خلال اختيار الضوء ذي الطاقة المطلوبة لإثارة الإلكترونات من مدار الترابط إلى المدار المضاد للترابط. وهذا النوع من التفكيك الضوئي تحديدًا هو المسئول عن تكوُّن طبقة الأوزون؛ حيث تنشطر جزيئات الأكسجين إلى الذرَّات المكوِّنة لها. غير أنه ليس بالضرورة أن يتسبَّب امتصاص الضوء (أو أي صورة أخرى من صور الطاقة) في انقسام الجزيء تمامًا. بل قد تتسبَّب الطاقة المُمتصَّة في إعادة تنظيم الروابط، وهذا أيضًا يحدُث من خلال تغيير طريقة شغل الإلكترونات للمدارات المختلفة. وقد استُخدِم هذا النوع من الكيمياء الضوئية في كثيرٍ من مجالات تكنولوجيا النانو لتصنيع البِنى النانوية.

الأرقام النانوية السحرية

كما رأينا في الفصل الأول، ينصُّ مبدأ باولي للاستبعاد على أنه لا يمكن أن يُوجَد إلكترونان في الحالة الكمومية نفسها. لا يعني هذا أنهما لا يمكن أن تكون لهما الطاقة نفسها، كما قد يتوهَّم المرء خطأً من نصِّ المبدأ. بل يمكن أن يكون للإلكترونَين الطاقة نفسها ويشغلا المدار الجزيئي نفسه، ما دام مقدار «اللف المغزلي» لكل إلكترونٍ مختلفًا عن الآخر. يكفينا في الوقت الحالي أن نتعامل مع اللفِّ المغزلي باعتباره مُصطلحًا كموميًّا؛ إذ

يمكن أن يكون اتجاه اللف المغزلي إما لأعلى أو لأسفل. سنناقش اللفَّ المغزلي بمزيدٍ من التفصيل في الفصل الخامس في سياق الحديث عن الإلكترونات المغزلية، وهي جزءٌ مُهم من تكنولوجيا النانو، أما في الوقت الحالي، فإن كلَّ ما نحتاج إلى معرفته عن اللف المغزلي هو أنه إحدى خواص الجسيمات الكمومية ويُحدِّد كيفية تفاعل الجسيمات بعضها مع بعض.

لا تخفى عنا فكرة أن الشحنات تتحكم فيما إذا كان سيحدُث تنافُر أو تجاذُب بين جُسيمَين. فنحن نعتبر هذا أمرًا مسلَّمًا به في العموم؛ لأننا تعلَّمناه في سنٍّ مُبكِّرة نسبيًّا، وكثيرًا ما كان ذلك من خلال واحدةٍ من حِيَل الحفلات التي يُستخدم فيها بالون نحكُّه بشعرِنا. لكن اسأل نفسك هذا السؤال: من أين تأتي هذه الشحنة بالأساس؟ الإجابة عن هذا السؤال ليست بالأمر السهل تمامًا. اللف المغزلي، شأنه شأن الشحنة الكهربية، إحدى خواص الإلكترونات — والجُسيمات وأجسام كمومية أخرى — التي يتجذَّر أصلها بعُمق داخل الفيزياء الأساسية، لكن تأثيرها يمكن اختزاله في قواعدَ بسيطةٍ جدًّا. فكما يُمكننا أن نختصر هذه الفيزياء الأساسية المُعقَّدة في عبارة «الشحنات المُتشابهة تتنافر، والشحنات المختلِفة تتجاذب»، يُمكننا كذلك التعامُل مع اللف المغزلي باعتباره وسمًا لجُسيم لا أكثر.

لِنعُد إلى مثال جزيء الهيدروجين، وقد بتنا الآن نفهم كيف، ولِمَ، تُكوِّن الذرات روابطَ تساهمية؛ فتكوين الرابطة ينتج عنه مدار جزيئي طاقته أقلُّ من طاقة المدارات الذرية. يفضل الإلكترونان أن يكونا في الحالة الأرضية، ومِن ثَم يشغَل كلاهما مدارَ الترابط ذا الطاقة الأدنى. أحد الإلكترونَين يكون اتجاهُ لفِّه المغزلي لأعلى والآخر لأسفل، كما هو مُوضَّح بالأسهم في شكل ٢-٤(أ)، وما يجعل هذا مُمكنًا أن الإلكترونَين ليست لهما الحالة الكمومية نفسها (بسبب اختلافهما في اتجاه اللف المغزلي)، بالرغم من تَساوي طاقتَيهما.

السؤال الآن: ماذا يحدُث لو أضفنا مزيدًا من الذرات؟ ماذا لو استمررنا في إضافة الذرات بحيث نبني جسيمًا نانويًّا أولًا، ثم نُواصِل إضافة الذرات حتى نخلق كتلةً صلبة؛ أي قطعة ماكروسكوبية من المادة تُرى بالعين المجردة؟ إن مبدأ باولي للاستبعاد يعني أنه لا يمكن أن تنهار حالة كل الإلكترونات لتُصبح في الحالة الموجية نفسها. وكان أول مَن أدرك أن مبدأ باولي للاستبعاد هو الركيزة لاستقرار المادة في الكون كله أساسًا، هو باول إيرنفست (١٨٨٠–١٩٣٣)، وهو فيزيائي نمساوي هولندي ذو إسهاماتٍ ضخمة في الميكانيكا الإحصائية وميكانيكا الكم. فلولا مبدأ الاستبعاد، لصارت الذرات قابلة للانضغاط بعضها في بعض بلا نهاية. بعبارة أخرى، مبدأ باولي هو ما يُحدِّد نطاق

الأطوال في المادة، وكون الذرات والجزيئات أجسامًا ذات أبعادٍ نانوية ينبع في الأساس من الطبيعة غير الاجتماعية للإلكترونات نتيجة لمبدأ الاستبعاد.

بالرغم من أن الهيدروجين أبسط عنصر مُمكن لأنه يحمل إلكترونًا وحيدًا، فإنه يكون أعقد كثيرًا عندما يتعلق الأمر بإضافة المزيد من الذرات لجُزيئه H_2. فذرَّة الهيدروجين تفاعلية جدًّا؛ وكما رأينا توجد قوة كبيرة تدفع إلكترونه الوحيد ليجد لنفسه شريكًا. وهذا يعني أن الهيدروجين يكوِّن وحدات H_2 مستقرة بسهولة. لا يُوجَد الهيدروجين الغازي في صورة مجموعةٍ من الذرات، على عكس الغازات الخاملة كالزينون؛ وذلك بسبب نشاطِه الكيميائي التفاعُلي العالي. وبدلًا من ذلك يُكوِّن الهيدروجين جزيئات H_2. وهذه الجزيئات بدَورها يُمكنها أن تتفاعل بعضها مع بعض لتكوين هيدروجين صلب عند درجات حرارة مُنخفضة بما يكفي (١٤ درجة فوق الصفر المطلق)، لكنها تظل وحدات متمايزة تترابط معًا بفعل قوى لندن التشتُّتية الضعيفة، التي عرضناها في الفصل الأول. أما إذا رفعنا الضغط، فتقول التنبُّؤات النظرية إن الهيدروجين يُمكن أن يُكوِّن شبكة بلورية، وهي طور صلب تشكِّل فيه ذرات الهيدروجين شبكةً بلورية مُنتظمة ومُمتدة تترابط معًا بفعل الإلكترون الذي يعمل كمادةٍ لاصقة. غير أن ذلك يحتاج إلى ظروف قصوى «للغاية»، بما فيها ضغط أعلى ملايين المرات من الضغط الجوي من أجل «تحفيز» ذرات الهيدروجين على الخروج من حالة جزيء H_2.

لحُسن الحظ، تكوِّن مجموعة كبيرة أخرى من العناصر شبكاتٍ بلورية بسهولة أكبر بكثير، منها الذهب والسليكون. لنتأمل ما يحدث عند إضافة مزيدٍ من الذرات لتكوين جزيء ثلاثي (أي عنقود نانوي من ثلاث ذرات)، يتبعه جزيء رباعي، ثم خماسي … وهكذا حتى الوصول إلى جُسيم نانوي يتكوَّن من مئات الذرات. لا يمكن أن تشغل جميع الإلكترونات الحالة الكمومية نفسها؛ لذا تظهر مستويات طاقة جديدة كلما زِدنا حجم العنقود، حتى تسع هذه المستويات عدد الإلكترونات المُتزايد. وهذا موضح في شكل ٢-٤(ب). وكلما أضفنا مزيدًا من الذرات، ازداد عدد مُستويات طاقة الإلكترونات التي تظهر. يُشبه ذلك إلى حدٍّ كبير تنامي التركيب الإلكتروني للعناصر في الجدول الدوري، باستثناء أننا لا نزيد حجم النواة بإضافة مزيدٍ من البروتونات والنيوترونات؛ بل نُضيف ذراتٍ كاملة إلى العنقود.

أما بخصوص الذهب، فتميل الجسيمات النانوية الأصغر من ١٢ ذرة إلى تكوين بنًى ثنائية الأبعاد (تُشبه نوعًا ما «الوتر» الثنائي الأبعاد المُكوَّن من ذرات الإنديوم الموضَّح في

شكل ٢-٣.) أما الجسيمات الأكبر من هذا، فتُكوِّن بِنًى ثلاثية الأبعاد «شبه كروية»، تكون أكثر استقرارًا عندما يُكافئ العدد الكلي لإلكترونات التكافؤ في العنقود — أي أضعف الإلكترونات ارتباطًا بذرَّاتها التي تدخل في تكوين الروابط — عددًا «سحريًّا» مُعينًا. بتعبيرٍ آخر، بعض العناقيد أكثر استقرارًا بكثير من غيرها؛ لأنها تحمِل العدد المطلوب من الإلكترونات بالضبط. وهذه الظاهرة هي ذاتها التي يقوم عليها الجدول الدوري بأكمِلِه، باستثناء أن الذرَّات في تلك الحالة ذراتٌ مُفردة، لا عناقيد عديدة الذرات، ينبع استقرارها المُعزَّز من كونها تحمِل العدد المطلوب من الإلكترونات.

يمكننا التعبير مجازيًّا عن السبب الأساسي وراء وجود أعمدة في الجدول الدوري بأن الإلكترونات الموجودة في الذرَّات تكون «متراصَّة» في أغلفة، بحيث يُسمح بوجود عددٍ محدود فقط من الإلكترونات في كلِّ غلاف. إن نموذج الأغلفة هذا هو محض خيال، شأنه شأن تصوُّر بور للذرة، إلا أن أخذ هذا المفهوم في الاعتبار مفيد جدًّا؛ لا سيما أنه يُفسِّر الكثير من معضلات الكيمياء. أخصُّ بالذكر منها أن خمول الغازات الخاملة يرجع بالكامل إلى اكتمال أغلفتِها الإلكترونية، وهذا يظهر في أعدادها الذرية وهي: ٢ (في الهيليوم)، و١٠ (في النيون)، و١٨ (في الأرجون)، و٣٦ (في الكربتون)، و٥٤ (في الزينون)، إلخ. والمقصود بوصف هذه الأعداد بأنها سحرية أن الذرة عندما تحمل هذا العدد بالذات من الإلكترونات تكون أقلَّ نشاطًا وتفاعُلية بكثيرٍ من الذرات المجاورة لها في الجدول الدوري. وتأثير العدد السحري الذي رأيناه في جُسيمات الذهب النانوية (وغير الذهب كذلك) مُشابِه للغاية، فعندما يكون غلاف إلكترونات التكافؤ مُكتملًا، يُعزِّز هذا استقرار الجسيمات بدرجةٍ هائلة. وهذا أحد الأسباب وراء الإشارة إلى الجُسيمات النانوية كثيرًا بأنها ذرَّات اصطناعية (أو ذرَّات مُصمَّمة)؛ فالعنقود بأكمله يتصرَّف وكأنه ذرَّة ضخمة. يُمكننا نظريًّا أن نُصمم جدولًا دوريًّا جديدًا نتحكَّم من خلاله في التركيب الإلكتروني للجُسيمات النانوية، ومن ثَم في طبيعتها الكيميائية، بإضافة ذرات أو نزعها.

غير أن الأعداد السحرية للجُسيمات النانوية لا يلزم أن يكون مصدرُها إلكترونيًّا فقط. فقد يأتي تعزيز الاستقرار مما يُطلَق عليه الأعداد السحرية الفراغية؛ حيث تحمل بِنية الجُسيم ما يكفي من الذرات لضمان توزيع الذرات توزيعًا مُنخفِض الطاقة يُقلل طاقة سطح الجسيم. تميل الذرات للتجمع بطبيعتها وتُفضِّل أن تكون محاطةً بذرات مجاورة على أن تكون بمفردها. وهذا من شأنه أن يُعزِّز الاستقرار لأغلفة كاملة من الذرات نفسها، لا الإلكترونات فحسب.

انتبه إلى الفجوة

عند إضافة ذرات إلى جُسيم نانوي، لا تتأثر مدارات الترابط وحدَها؛ بل إن عدد المدارات المُضادة للترابط والمسافة بينها يتغيَّران كذلك. وفي سبيل تفسير حدوث هذا تفسيرًا كاملًا، يتطلَّب الأمر جولةً مطولة عبر المناهج الجامعية في ميكانيكا الكم وفيزياء/كيمياء الجوامد، لكن ما يحدُث في الأساس هو تداخُلات بنَّاءة وتداخلات هدَّامة بين موجات الإلكترونات المختلفة بطرق شتَّى مع ازدياد حجم الجُسيم النانوي. وهذا من شأنه أن يُغير طريقة توزيع طاقة المدارات. وكما يحدُث مع جزيء الهيدروجين، تُملأ مدارات الترابط في الجسيم النانوي بالإلكترونات، بينما تظلُّ المدارات المضادَّة للترابط خاوية. وهذا يعني وجودَ فجوة في الطاقة بين الحالات المشغولة بالإلكترونات والحالات الشاغرة. وكلَّما واصلنا إضافة الذرات إلى الجُسيم النانوي، يزداد عدد حالات الطاقة كما هو مُوضَّح في شكل ٢-٤؛ لأن مبدأ باولي للاستبعاد يمنع كل الإلكترونات من شغل نفس الحالة.

عندما نُضيف عددًا من الذرَّات يكفي لصنع مول من المادة، أي ٦,٠٢٢×١٠^{٢٣} ذرات، يُصبح عدد مستويات طاقة الإلكترونات كبيرًا جدًّا فلا يعود بمقدورنا اعتبار هذه المستويات حالاتٍ مُنفصلة. فتتكوَّن نطاقات عوضًا عن المستويات كما هو موضَّح أيضًا في شكل ٢-٤. في حالة أشباه المُوصلات كالسليكون، يُوجَد نطاق تكافؤ ممتلئ بالإلكترونات (مُنبثقة من مدارات الترابط) ونطاق توصيل شاغر، لكن يُمكنه استقبال إلكترونات. لا تُحدِّد الفجوة في الطاقة — وتُعرف باسم فجوة النطاق — بين هذين النطاقَين مدى توصيلية المادة للكهرباء فحسب، بل تُمثِّل الأساس للخصائص الضوئية للمادة كذلك. ففوتونات الضوء يُمكنها إثارة الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، لكن بشرط أن تكون طاقتها كافية «لرأب الفجوة».

ثمَّة علاقة عكسية بسيطة بين الطول الموجي للضوء λ وطاقة الفوتون E:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

حيث c ترمز إلى سرعة الضوء. يُصاحب الأطوال الموجية الأقصر طاقات أعلى. وإذا كانت طاقة الفوتون أقل من طاقة فجوة النطاق، فلا يمكن للضوء إثارة الإلكترونات، وباستثناء حدوث انعكاسات على سطح البلورة، سينفذ الضوء خلال المادة شبه الموصلة. ولكن إذا استمررنا في تقليل الطول الموجي للضوء الساقط، فستحين لحظة تُكافئ فيها طاقة

الفوتون طاقة فجوة النطاق أولًا، ثم تتخطَّاها بعد ذلك. وهذا يعني أن الضوء الآن بات بمقدوره إثارة انتقالات إلكترونية، ومن ثَم يمكن أن تمتصَّه بلورة المادة شِبه الموصلة بدلًا من النفاذ خلالها إلى الناحية الأخرى. ويُستهلَك كل فوتون — أي كل دفقةٍ من الطاقة — عندما يتسبَّب في إثارة إلكترون إلى نطاق التوصيل.

تبلغ طاقة فجوة النطاق في السليكون نحو ١٫١ إلكترون فولت، بينما يتراوح طيف الضوء المرئي بين ما يقارب ١٫٥ إلكترون فولت (لفوتونات الضوء الأحمر) إلى ٣ إلكترون فولت (للطرف الأزرق من الطيف المرئي). وهذا يعني أن السليكون يمتص الطيف المرئي بأكمله — مُتجاهلين بذلك مسألة انعكاسات الضوء عن السطح مرةً أخرى — وبهذا يكون السليكون بلورةً معتمة يبدو لونها رماديًّا داكنًا. أما ثاني أكسيد السليكون، ففجوة النطاق فيه أكبر بكثير؛ إذ تكون في حدود ٩ إلكترون فولت عادة (ولهذا يُوصف بأنه مادة عازلة لا شِبه موصل). وهذا الرقم يتجاوز بكثيرٍ طاقة فوتونات الطيف المرئي؛ ولهذا لا يمتصُّ ثاني أكسيد السليكون ضوءًا له هذه الطاقة. ولهذا يكون الزجاج شفافًا، حيث يغلب ثاني أكسيد السليكون على تركيبه.

تتَّسِع فجوة النطاق كلما تناقص حجم الجُسيم النانوي، بسبب التقييد الكمومي. والجسيمات النانوية المصنوعة من مواد شِبه موصلة يمكن ضبطها على الطول الموجي للضوء لتمتصه، وذلك بتغيير حجمها ببساطة. وفي ذلك إثبات مُذهل لقوة ومرونة تكنولوجيا النانو؛ فالتغيُّرات في الحجم وحدَها كفيلة بتغيير خواص المادة جذريًّا على نحوٍ يمكن رؤيته بوضوح. وبإمكان خبراء تكنولوجيا النانو حاليًّا استخدام التقييد الكمومي على نحوٍ روتيني في تطبيقات الإلكترونيات البصرية، بدايةً من الخلايا الشمسية القائمة على الجسيمات النانوية وحتى أجهزة التليفزيون العالية الوضوح. غير أن الجُملة السابقة لا تُوَفِّي تلك العملية الطويلة التي تُصاحب نقْل أي جهاز مُبتكر عالي التقنية إلى الحيز التجاري حقَّها. فالطريق في غاية الوعورة من النموذج الأوَّلي للجهاز النانوي في المعامل البحثية وحتى اعتماده في العالم الأوسع بنجاح.

الفصل الثالث

التفكيك التنازُلي، والبناء التصاعدي

«مزِّقوا الكتب يا أطفال. إنياك سيقضي على الرياضيات.»

كان هذا هو العنوان الرئيسي في صحيفة «فيلاديلفيا ريكورد» في عددها الصادر بتاريخ ١٩ فبراير ١٩٤٦. «إنياك» هو اختصار لـ «الكمبيوتر والمُكامل الإلكتروني الرقمي»، وهو إنجاز مُذهل طوَّره جون ماوشلي وجون بريسبر إيكرت من جامعة بنسلفانيا بتمويلٍ من الجيش الأمريكي. صُمِّم إنياك ليكون أولَ كمبيوتر رقمي متعدِّد الأغراض قابلًا للبرمجة، ويحتوي على ١٧٥٠٠ أنبوب مُفرغ موصَّل بعضها ببعض بواسطة نصف مليون وصلة لحام، وكان حجمه هائلًا. بلغ وزن إنياك نحو ٥٠ طنًّا، متفوقًا بذلك على سابقه كولوسوس — الذي جرى تطويره في حديقة بلتشلي بارك، المقر البالغ السرية لفك الشفرات في الحرب العالمية الثانية — بهامش كبير. (استُوحي كولوسوس من أعمال ألان تورينج، واستُخدِم لفكِّ شفرة رسائل المبرقة الكاتبة الألمانية، مما أسهم في تقصير مدة الحرب العالمية الثانية عدةَ أشهر وإنقاذ آلاف الأرواح.) وفي حين كان كولوسوس يحتاج مساحةً كمساحة غرفة المعيشة، كان إنياك أكبر من حجم منزل بقدْرٍ معتبر؛ فقد كان يحتلُّ مساحة تبلغ ١٦٧ مترًا مربعًا، في مقابل المنازل الإنجليزية حديثًا، التي تبلغ مساحتها المعيشية في المتوسط ٦٨ مترًا مربعًا.

تناقلت عناوين الصحف حول العالم نفس حماس «فيلاديلفيا ريكورد» تجاه إنياك؛ إذ وُصف بأنه عقل خارق، وحاسب روبوتي يعمل بسرعة البرق، ورياضياتي ميكانيكي تفوَّق على أينشتاين في التفكير وإعمال العقل. كان أداء إنياك مُبهرًا إلى حدٍّ لا مثيل له في وقته بلا شك؛ إذ كان بإمكانه تنفيذ التعليمات بمعدل ٥٠٠٠ أمر في الثانية بسرعة خارقة. لكن بالمقارنة نجد أن الهاتف الخلوي الذكي الآن بإمكانه عادةً أن يُعالج

«مليارات» التعليمات في الثانية. حتى وإن لم تكن تحمل في جيبك هاتفًا خلويًّا من أحدث طراز، فإن سرعة معالج الآيفون منذ عام ٢٠١٠ في مستوى ١ جيجا هرتز (أي نحو مليار أمر في الثانية).

ثمَّة تلازُم بين التصغير وسرعة المعالجة؛ فكلما صغرت التقنية، صارت أسرع. فوحدات المعالجة الكامنة في صميم الهواتف وأجهزة الكمبيوتر المحمولة والأجهزة اللوحية يحتشد فيها عددٌ مذهل من المكونات الإلكترونية في حيز بالغ الصغر. وفيما يتعلق بحجم المكون وحده، فقد مهَّدت الإلكترونيات الميكروية الطريقَ للإلكترونيات النانوية منذ وقتٍ طويل. فمع بزوغ فجر صناعة أشباه الموصلات في أواخر الستينيات، صُغِّر حجم الدوائر المتكاملة ليصل إلى عشرات الميكرونات (أي عشرات الآلاف من النانومترات.) وبتسريع الأحداث بضعة عقود، نجد أن معالج إنتل ٨٠٣٨٦ الذي كان يعمل به حاسوبي الذي كتبتُ عليه كود مشروع تخرُّجي في الجامعة عام ١٩٩٠ كان حجم العنصر فيه ١٠٠٠ نانومتر. (في صناعة أشباه الموصلات، كان مُصطلح حجم العنصر تاريخيًّا يُستخدَم للدلالة على طول القناة المُمتدة بين ما يُعرف بوصلة المصدر ووصلة المصبِّ في الترانزستور. أما في الوقت الحالي، فقد بات مصطلح حجم العنصر يُعبِّر عن أصغر تركيب في الترانزستور.) وقد تخطَّت معالجات بنتيوم ٤، التي أصدرتها شركة إنتل عام ٢٠٠٤، حاجز الألف نانومتر من خلال ما يسمَّى بعملية التسعين نانومترًا. وبعد ١٥ عامًا، أعلنت شركة إنتل في ديسمبر ٢٠١٩ عن خططها لإنتاج معالجات بدقة تصنيع تبلغ ١,٤ نانومتر بحلول عام ٢٠٢٩.

هذا يعني أن تقليص حجم العنصر قد بلغ نحو خمس قِيَم أُسية، فيما يُعَد مستوًى مذهلًا من الابتكار التقني الدءوب الذي تكهَّن به جوردن مور، المدير التنفيذي السابق (والشريك المؤسِّس) لشركة إنتل، من قبل أن يُصبح لوجود تكنولوجيا النانو أي تصوُّر بزمنٍ طويل. ينص قانون مور على أن عدد الترانزستورات في دائرة متكاملة يتضاعف كل عامَين تقريبًا. ورغم أن نبوءة مور توصف دومًا بأنها قانون، فقد خلا تكهُّن مور من أي شيءٍ جوهري؛ فهو ليس من فئة قوانين نيوتن أو قوانين الديناميكا الحرارية الأول والثاني والثالث على سبيل المثال؛ إذ لم يُشتق مباشرة من مبادئ فيزيائية أو كيميائية. بل يقوم استدلاله المنطقي الأساسي على حجج اقتصادية. غير أن الإمكانيات الحاسوبية آخذة في التطوُّر والزيادة من عام إلى آخر منذ أواخر الستينيات بما يتوافق مع ما قد يستحسن وصفه بحَدْس مور الاستكشافي. لعبت تكنولوجيا النانو دورًا أساسيًّا في ضمان

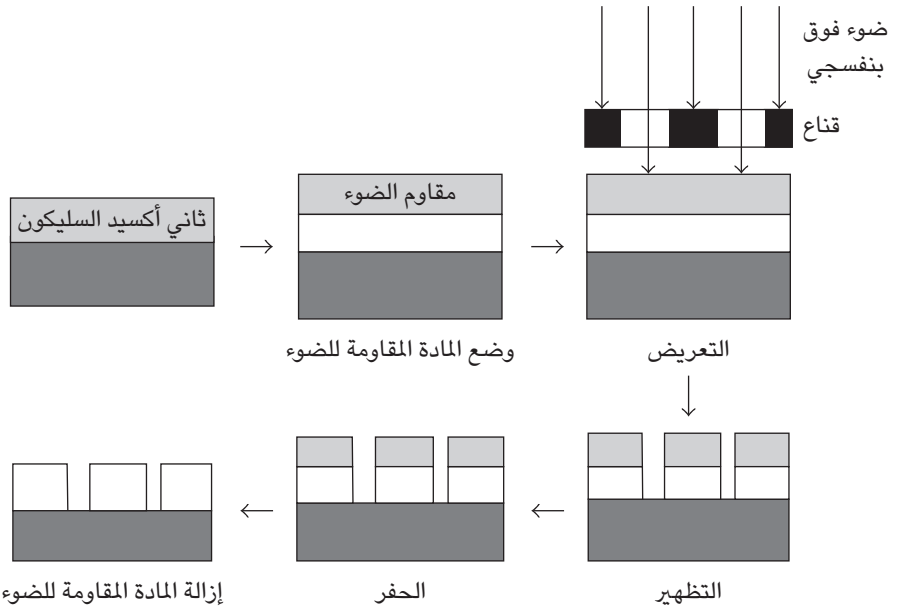
استمرارية هذا التقدُّم، لكن المفارقة أن علوم النانو نفسها تعتبر أيضًا سببًا في الموت البطيء الذي يواجِه قانون مور.

التكنولوجيا التنازلية

تتميز مصانع أشباه الموصلات ببيئاتٍ تحظى بمستوًى استثنائي من التعقيم. فالنبائط تُصنَّع في غُرَف في غاية النظافة؛ حيث تخضع ظروف بيئة المعمل لتنظيمٍ دقيق للحد من تلوُّثها بالجسيمات الدقيقة العالقة في الهواء، وللتحكُّم في درجة الحرارة، وضغط الهواء وتياره، والرطوبة، والاهتزاز، والضوضاء، والإضاءة. وهذا المستوى العالي من التحكُّم في البيئة ليس من أجل صالح علماء تكنولوجيا النانو العامِلين على أشباه الموصلات بداخلها. فالغُرَف النظيفة ضرورية لوقاية النبائط ذات البِنية النانوية حتى من أدقِّ ذرات الغبار. فحجم العنصر دون العشرة نانومترات في التكنولوجيا الحديثة لأشباه الموصلات يعني أن أي ذرة غبار غير مرئية، والتي يبلُغ حجمها المُعتاد آلاف النانومترات، ستكون عملاقةً بالمقارنة بحجم العنصر وقد تُسبِّب أضرارًا جسيمة أثناء عملية مُعالجة النبيطة.

كيف تُصنع المكونات ذات الأبعاد النانوية التي تقوم عليها كل التكنولوجيا الرقمية فعليًّا؟ ينطوي تصنيع النبائط (مكوِّنات أشباه الموصلات) على عمليةٍ وُضِعت منذ بدء صناعة أشباه الموصلات، وإن كانت بالطبع أخذت في التطوُّر المُستمر. هذه العملية في أساسها عمليةُ طباعة ليثوغرافية أو حجرية تنازُلية تنطوي على نقل شكلٍ معيَّن على سطح رقاقة من السليكون. تأتي كلمة «ليثوغرافي» من دمج اللفظتَين اليونانيتَين lithos، وتعني حجر، وgraphia، وتعني تكتب؛ وعلى ذلك تكون ترجمتها الحرفية «الكتابة على الحجر».

تتضمَّن الطباعة الليثوغرافية النانوية في القرن الحادي والعشرين الكتابةَ على رقاقةٍ من السليكون يبلُغ قطرها في المعتاد ٣٠٠ نانومتر في مصانع أشباه الموصلات الحديثة، وذلك من خلال سلسلةٍ طويلة من خطوات المعالجة التي تزيل المواد غير المرغوب فيها لتحديد المُكون النانوي من خلال تقطيع السليكون المُحيط به والتخلُّص منه. ويظهر في شكل ٣-١ استعراضٌ للخطوات الرئيسة في هذه العملية، التي تُعرَف بالطباعة الليثوغرافية الضوئية؛ نظرًا لاعتمادها على استخدام الضوء. ولكن من المهم أن نُدرك أن هذا المُخطط شديدُ التبسيط؛ فمن الوارد كثيرًا أن تمرَّ الرقاقة بصُوَر متنوِّعة من عملية الطباعة الليثوغرافية الضوئية لما قد يصِل إلى ٥٠ مرة أثناء تصنيع دائرة متكاملة.



شكل ٣-١: مُعالجة تنازُلية لأشباه الموصلات: الطباعة الليثوغرافية النانوية. الخطوات الرئيسة في عملية تطبيق نمط مُعيَّن على رقاقة من السليكون لتشكيل معالم ومُكوِّنات ذات أبعاد ميكروية ونانوية.

إلى جانب ذلك، ورغم أن الطباعة الليثوغرافية الضوئية هي الإجراء المُعتمد في هذه الصناعة، فإنها كثيرًا ما تتكامل مع تقنيات تنازُلية أخرى خلال مراحل التصميم وإعداد النماذج الأولية من عملية إنتاج الرقاقة. ويأتي في طليعة هذه التقنيات استخدام شعاع أيوني مركَّز لتذرية المادة حتى مستوى النانو. والشعاع الأيوني المركَّز في جوهرِه هو إزميل أو آلة خراطة نانوية. يستخدم شعاع عالي الطاقة من الأيونات، عادةً ما يكون من الجاليوم، ويُركَّز باستخدام عدسات كهروستاتيكية ليُسلط على الموضع المراد في عيِّنة أو نبيطة، فيكشط المادة في الموضع المحدَّد. ويمكن طبع أشكال شتى على العينات عن طريق مسح العينة بالشعاع ذهابًا وإيابًا. بالإضافة إلى دور تقنية شعاع الأيونات المُركَّز في صناعة أشباه الموصلات، فإنها تُستخدَم كذلك على نطاق واسع لتحضير العينات للفحص المجهري لنفاذ الإلكترونات (الذي يُشبه الفحص بمجهر المسبار الماسح في قُدرته على

الوصول إلى تباين على مستوى الذرات، وإن كان من خلال طريق أقل مباشرة). ينبغي أن تكون هذه العينات رقيقةً للغاية — عادةً ما تقارب ١٠٠ نانومتر — كي تكون شفَّافة بالنسبة إلى الإلكترونات العالية الطاقة؛ وتُعتبر تقنية شعاع الأيونات المركَّز أداةً فعالة لترقيق العينات إلى المستوى المطلوب.

في البداية تُغطى رقاقة نظيفة من السليكون، بطبقتها الواقية من أكسيد السليكون، بطبقة من مادة حساسة للضوء تُعرف بالمادة المقاومة للضوء. تُعد المواد المقاومة للضوء تكنولوجيا كاملة في حد ذاتها، بحيث يمكن أن نفرد «مقدمة قصيرة جدًّا» لمناقشة أُسس علم المواد والكيمياء والفيزياء التي تقوم عليها مقاومات الضوء. باختصار، عندما تتعرض المادة المقاومة الحساسة للضوء لضوءٍ فوق بنفسجي، تتغير بِنيتها الكيميائية عند المواضع التي تُعرَّض للضوء، وذلك بإعادة تنظيم الروابط وجعل المادة قابلة للذوبان، أو غير قابلة للذوبان، في مادة كيميائية تُسمى بمحلول التظهير. (ثمة تشابهات كثيرة بين الطباعة الليثوغرافية الضوئية والتصوير الفوتوغرافي التناظري التقليدي.) إذا أزال محلول التظهير المادةَ من المناطق التي تعرَّضت للضوء، توصف المادة المقاومة للضوء بأنها مُوجبة؛ أما إذا أزال محلول التظهير المادةَ من المناطق التي لم تتعرض للضوء، فالمادة سالبة.

يتطلب اختيار المواضع التي ستُعرَّض فيها المادة للضوء استخدامَ قناعٍ ضوئيٍّ. والقناع الضوئي، في جوهره، هو خريطة للدوائر والتوصيلات داخل الدوائر المتكاملة المَعنية، وهو الذي يُحدِّد ما إذا كان الضوء فوق البنفسجي سيُحجَب عن رقاقة السليكون المُغطاة بالمادة المقاومة للضوء أم سيسقط عليها. يُستخدَم الضوء فوق البنفسجي هنا؛ لأن طوله الموجي القصير، الذي يبلُغ في المعتاد ١٩٣ نانومترًا في معظم عمليات المعالجة الليثوجرافية الضوئية في وقت كتابة هذا الكتاب، يُتيح تباينًا أفضل لمعالم السطح. ومن الجدير بالملاحظة أنه برغم أن الطول الموجي المُستخدَم هو ١٩٣ نانومترًا، يمكن تشكيل معالم أبعادها دون ١٠ نانومترات باستخدام الطباعة الليثوغرافية الضوئية، وذلك من خلال تقنيات مُتطوِّرة للتعريض المُتعدد، حيث يُطبع الشكل على الرقاقة أولًا ثم تُعرَّض الرقاقة للضوء مرةً أخرى باستخدام قناع مختلف يُشبه الأول لكنه مُزاح عنه، يتبع ذلك مرحلة تظهير أخرى للمادة المقاومة ثم إزالتها.

بعد انتهاء عملية المعالجة، يكون الشكل المحفور على القناع الضوئي قد نُقل إلى رقاقة السليكون من خلال إزالة الأكسيد من مناطق مُعينة. يلعب أكسيد السليكون،

باعتباره عازلًا ذا فجوة نطاق واسعة، دورًا محوريًّا وأساسيًّا في عمل النبائط الإلكترونية الميكروية والنانوية، ويعادل في أهميته الأقطابَ المعدنية وركيزة السليكون، اللذَين يُشكلان معًا المُكوِّنين الآخرين لما يُعرف بتكنولوجيا أشباه الموصِّلات ذات الأكاسيد المعدنية المُتتامَّة (والمعروفة اختصارًا بـ «سيموس»). وقد ظلت هذه التكنولوجيا القوة المُحرِّكة لهذه الصناعة عقودًا، وذلك لسببٍ وجيه؛ وهو أن أكسيد السليكون مادة مُستقرة كيميائيًّا على نحوٍ استثنائي، وفجوة نطاقها الواسعة توفِّر درجةً عالية من العزل والفصل اللازِمَين لضمان أن العدد الهائل من المكونات الفردية داخل الدائرة المُتكاملة منفصلة بعضها عن بعض.

ولكن برغم كل هذا الابتكار في الطباعة الليثوغرافية النانوية الذي دفع عمليةَ التصغير إلى الأمام (ولأسفل كذلك) عقودًا بلا كلل، فإن قانون مور يحتضر. بل إن بعض الخبراء يذهبون إلى أن قانون مور ميتٌ بالفعل منذ وقتٍ طويل. ولعل أحد الأسباب وراء ذلك أنه على الرغم من أن سرعة (أو معدل الساعة) وحدة المعالجة الذي يقاس بالجيجاهرتز في نبائطنا، الذي نعتبره أمرًا مُسلَّمًا به، مُثيرٌ جدًّا للإعجاب بلا شك، وذلك بالمقارنة بجهاز إنياك المحصورة في نطاق الكيلوهرتز، فإن التحسُّن في معدل الساعة كان ضئيلًا جدًّا على مدار العقد الماضي؛ إذ اصطدمت هذه الصناعة بعقبة. يرجع هذا إلى أن حشر مليارات الترانزستورات النانوية في رقاقة مساحتها الفعَّالة قد تكون أحيانًا أقل من ملِّيمتر مربع واحد، ثم تشغيلها مليارات المرَّات في الثانية، يُولِّد قدرًا كبيرًا من الطاقة الحرارية التي ينبغي التخلص منها بطريقةٍ ما. وفوق ذلك، كلما كان تشغيل الترانزستور أسرع، تطلَّب المزيد من القدرة الكهربية. في الواقع، يُعَد معدل الساعة ضحيةً للموت الحراري للإلكترونيات النانوية.

والمُفارقة أنه برغم أن الابتكارات العبقرية في مجال تكنولوجيا النانو كثيرًا ما كانت بمنزلة المُنقذ لصناعة أشباه الموصلات، مما يبقي قانون مور صالحًا للتطبيق، فإن فيزياء النطاق النانوي ستكون أيضًا عدوَّها اللدود في النهاية (إلى جانب الاقتصاد ببروده وقسوته). إن مسألة الموت الحراري وما يتعلَّق بها من تحديات اقتصادية لدفع السليكون إلى نطاقات تردُّدية أعلى ليست إلا جانبًا واحدًا من المشكلة. فحجم العنصر الذي يبلغ اليوم ثلاثة نانومترات، يبلغ عرضه أقل من ١٠ ذرات سليكون. وهذا النطاق من الأطوال يعني أننا الآن داخل العالم الكمومي دون أي شك؛ ولذلك تلعب الطبيعة الموجية للإلكترونات دورًا أساسيًّا في عمل النبائط. فالطبيعة الكمومية للمادة في النطاق النانوي تُعد حاجزًا

ضخمًا أمام صلاحية قانون مور مع أحجام عناصر أصغر وأصغر. ولكي نفهم سبب ذلك، نحتاج إلى التوقُّف قليلًا للاطلاع على مبدأ العمل الأساسي الذي تستند إليه تكنولوجيا سيموس؛ وهو مبدأ تبديل حالة الترانزستور.

تحطيم الحواجز: النفاذ النفقي للإلكترونات

الترانزستورات، في أساسها، مفتاحٌ كهربي ثُلاثي الأطراف يتكوَّن، بموجب تكنولوجيا السيموس، من مصدرٍ ومَصبٍّ وقُطب بوابة. من خلال وضع جهدٍ على قطب البوابة، يُمكن التحكُّم في تدفُّق الإلكترونات — أي التيار الكهربي — بين المصدر والمصب بالفتح والغلق، مما يضع الترانزستور إما في الحالة ٠ أو الحالة ١. وهذا هو أساس المنطق الثنائي الذي يقوم عليه أغلب التكنولوجيا. عندما يكون طول البوابة في نطاق الميكرون أو مئات النانومترات أو حتى عشرات النانومترات، يُمكن التحكُّم في حالة الترانزستور بين الفتح والغلق بسرعة. نحن عمليًّا في الحدود التقليدية؛ حيث الطبيعة الكمومية للإلكترونات لا تُخلف تأثيرًا ضخمًا على عمل النبيطة.

غير أن تقليص طول البوابة إلى ما دون ١٠ نانومترات يُغيِّر فيزياء الموقف في النطاق النانوي جذريًّا. في هذه النطاقات، يُصبح لظاهرة النفق الميكانيكي الكمومي — وهو نفس التأثير النفقي المُستخدَم في المجهر النافذ الماسح — أهميةٌ محورية ويُمكنها أن تُهيمن على عمل الترانزستور. فلا تعود الإلكترونات «ترى» الحاجز الذي يُشكِّله أكسيد السليكون العازل. وعوضًا عن ذلك تنفُذ الإلكترونات مباشرةً خلال الحاجز؛ لأن دالتها الموجية تخترقه، بل وتتجاوز الأكسيد العازل بين المصدر والمصب وتُفقده خواصه العازلة. ويترتَّب على ذلك خلق تيارٍ مُتسرِّب، مما يجعل الترانزستور غير كفءٍ بالمرة؛ لأنه حتى عندما يكون في حالة «الغلق»، قد تظلُّ احتمالية حدوث تدفُّق تلقائي للتيار نتيجةً للنفق الكمومي.

مِن الجوانب المُهمة في النفاذ النفقي أن العملية حساسة للغاية لعرض الحاجز؛ وهذه الحساسية هي ما تمنح المجهر الماسح النافذ دقةَ تبايُنه العالية جدًّا (لأن أي تغيُّرات مهما كانت دقيقة في المسافة الفاصلة بين الرأس والعينة تتسبَّب في تغيراتٍ كبيرة جدًّا في مقدار التيار النفقي المَقيس). لكن ما يُعد ميزةً للمجهر النافذ الماسح يُعتبر نقمةً لإلكترونيات سيموس النانوية؛ فكلَّما صار حجم العنصر أصغر وأصغر، تتزايد احتمالية

نفاذ الإلكترونات نفقيًّا خلال الأكسيد تصاعديًّا. ففي كل مرةٍ يقلُّ عرض الحاجز بمِقدار قُطر ذرة واحدة فقط، تتزايد احتمالية حدوث النفاذ النفقي مائة ضعف. وعلى الرغم من أن الأبحاث الحالية تُركِّز على ما يُسمَّى بالعوازل الكهربية ذات ثابت العزل المُرتفع (k) — وهي بدائل لأكسيد السليكون له خواصُّ عازلة تُختار لتوفير حواجز أصعب في اختراقها — فإن هذا يُعَد تأجيلًا لما لا مفرَّ منه ببساطة من نواحٍ عدة. فلا يمكن لقانون مور أن يستمر إلى الأبد؛ لأن ظاهرة النفق الكمومي ستؤدي إلى تعطيل عمل النبائط.

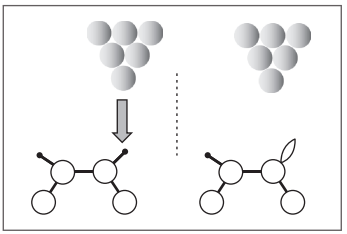
إن لم يكن بإمكاننا تصميم طرق وتقنيات جديدة للتحايل على فيزياء الكم، لماذا لا نكتفي باعتمادها بدلًا من ذلك؟ هذا هو تحديدًا جوهر الكمبيوتر الكمومي؛ حيث تُشكل الخصائص الموجية للمادة، بما فيها النفق الكمومي، الأساسَ لتوجُّهٍ جديد تمامًا في تكنولوجيا الحوسبة والأجهزة. ولكن على عكس التنبُّؤات والنقاد الذين يسهل إثارتهم هنا وهناك، لن تحلَّ الحوسبة الكمومية مَحلَّ تكنولوجيا الحوسبة التقليدية بالكامل. لا شك أن الكمبيوتر الكمومي بإمكانه أن يحلَّ مشكلاتٍ ويُنفِّذ خوارزميات كانت مستحيلة أمام الكمبيوتر التقليدي، أو كانت ستستغرق وقتًا طويلًا على نحوٍ لا يُصدَّق (ملايين أو مليارات الأعوام.) لكن العكس صحيح بالقدْر ذاته؛ فالكمبيوتر التقليدي بالفعل أفضل أداءً من نظيره الكمومي المُحتمَل في مهامَّ كثيرة جدًّا، أذكر منها أمثلةً معدودة من حياتنا اليومية، مثل خوادم البريد الإلكتروني، ومعالجة النصوص وجداول البيانات، ومشغلات إم بي٣ وإم بي٤، وتطبيقات التصميم الجرافيكي. لن تحلَّ أجهزة الكمبيوتر الكمومية محلَّ نظيرتها التقليدية، بل ستُكملها.

على كل حال، ورغم أن الطباعة الليثوغرافية على السليكون ما زالت بعيدة جدًّا عن الجاهزية التجارية، فقد تطوَّرت إلى مدًى بعيدٍ حتى وصلت إلى حد ذرة واحدة منذ نحو ٣٠ عامًا. فقد أوضح جوزيف لايدينج وزملاؤه في جامعة إلينوي في أوربانا-شامبين، بالتعاون مع فايدون أفوريس وروبرت ووكاب بمركز أبحاث توماس جيه واطسون التابع لشركة آي بي إم في يوركتاون هايتس بنيويورك، في عام ١٩٩٥، أنه من خلال ضخ إلكترونات نفقية (من رأس مجهر نافذ ماسح) في سطح من السليكون مغطًّى بطبقة من الهيدروجين بسمك ذرة واحدة، أمكن كسر الرابطة الكيميائية بين السليكون والهيدروجين Si–H وفصلُ ذرات الهيدروجين واحدة بواحدة. فعندما يوضع رأس المجهر النافذ الماسح على ذرة هيدروجين، يضخ فيها طاقةً من خلال الإلكترونات النفقية تكفي للتسبُّب في اهتزاز الرابطة Si–H (وأعني هذا حرفيًّا)، حتى تُفلت ذرة الهيدروجين في

النهاية من بئر الجهد الذي كان يحتجِزها. وهذا هو غاية ما توصَّلت إليه تكنولوجيا النانو والطباعة الليثوغرافية النانوية التنازُليَّان: استخلاص ذرات مفردة.

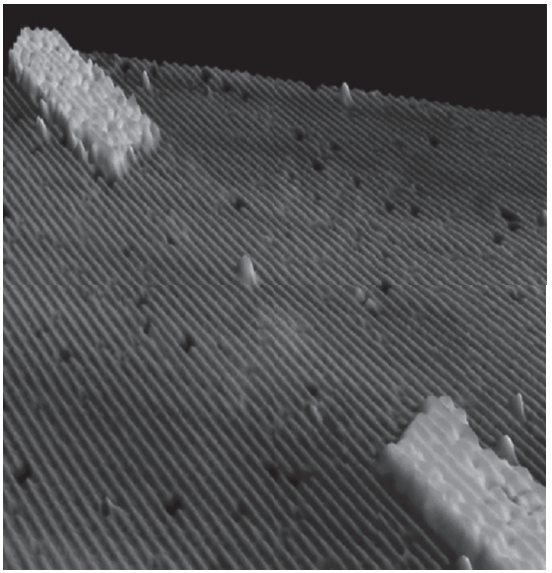
موضَّح بالشكل ٣-٢ أمثلة على الطباعة الليثوغرافية النانوية على السليكون بذرَّات مفردة. على عكس العمليات التجارية التي تعتمِد عليها تكنولوجيا سيموس، يقتصر هذا النوع من طباعة الأشكال والأنماط بدقَّة ذرية، في الوقت الحالي على الأقل، على بيئاتٍ شديدة التخصص ذات درجة فائقة من التفريغ؛ لذا من المُستبعَد أن تظهر نبائط أحادية الذرة في الهواتف الذكية في أي وقتٍ قريب. ويرجع هذا إلى أن انتزاع ذرة هيدروجين من السطح المُغطَّى بالهيدروجين يُنتِج ما يُعرَف بالرابطة المتدلِّية على السليكون الذي صار الآن «مكشوفًا» (انظر المُخطط التوضيحي في شكل ٣-٢(أ).) إذا أُخرجت ذرة السليكون هذه من البيئة الفائقة التفريغ (وكذلك الذرَّات الأخرى التي انتُزعت منها ذرة الهيدروجين التي تُغطيها على النحو ذاته)، فستتفاعل الذرة سريعًا جدًّا. لذا تُعَد الطباعة الليثوغرافية ذات الدقة الذرية أداةً للأبحاث الأساسية حتى الآن، حيث تُستكشَف حدودُ قُدرتنا على التحكُّم في المادة في ظروفٍ شديدة الإحكام من الصعب — إن لم يكن من المُستحيل عمليًّا واقتصاديًّا — نقلُها إلى العملية التصنيعية.

في الفصل التالي سنتعرَّض لعدة أمثلة للجيل الجديد من طرُق ومناهج معالجة المعلومات، التي تُتاح من خلال الطباعة الليثوغرافية النانوية ذات الدقة الذرية الموضحة في شكل ٣-٢، ومن خلال التحكُّم في الذرات والجزيئات منفردةً عمومًا. لكن توسيع نطاق مثل هذه الطرق التي تعمل ذرة بذرة أو جزيئًا بجزيء لتُصبح تكنولوجيا أو عملية تصنيع متاحة تجاريًّا تُشكل تحديًا عمليًّا هائلًا؛ لأنها عملية «متسلسلة» في الأساس. لقد كانت الطباعة الليثوغرافية الضوئية حجرَ الزاوية لصناعة الإلكترونيات وأشباه المُوصلات لزمنٍ طويل جدًّا؛ ويرجع هذا تحديدًا إلى كونها تقنيةً تطبع الأشكال والأنماط على رقاقةٍ لا على مُكوِّنٍ تلوَ الآخر، بل تطبعها عليها كلها دفعةً واحدة؛ فهي عمليةٌ تسير بالتوازي. بالمثل، لا يتطلَّب تركيب المواد على النطاق النانوي الاعتماد على المسبارات الماسحة لتحريك الذرات أو الجزيئات أو كليهما من مكانٍ لمكان، كلٌّ على حدة. فالطبيعة تستغِل القوى بين الذرية والقوى بين الجزيئية، التي شرحناها في الفصل الأول، باستمرارٍ لتركيب المادة بالتوازي على المستوى النانوي (وأدق من ذلك بكثير). فبدلًا من كشط المادة اصطناعيًّا لتحديد مَعالم البِنى النانوية، تنتهِج الطبيعة نهجًا عكسيًّا تمامًا؛ إذ تَبني تصاعديًّا من القاع إلى القمة.



(أ)

(ب)



(جـ)

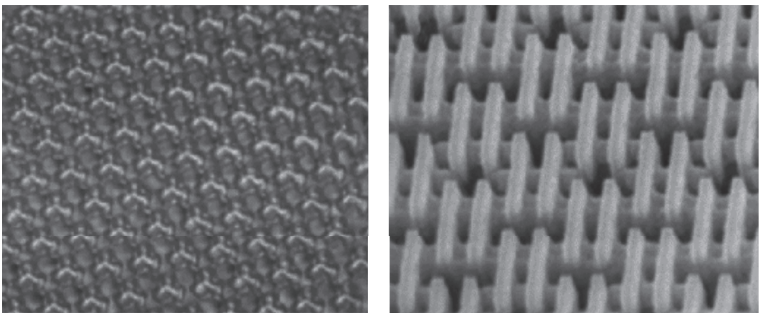
شكل ٣-٢: الطباعة الليثوغرافية النانوية ذات الدقة الذرية. (أ) مُخطط توضيحي لانتزاع ذرة مفردة باستخدام المجهر النافذ الماسح. رأس المجهر النافذ موضوع فوق ذرة هيدروجين مفردة (مُمثلة بدائرة مُصمتة صغيرة) مرتبطة بذرة سليكون (مُمثلة بدائرة مفرغة). على هذا السطح تحديدًا ترتبط ذرات السليكون بعضها مع بعض لتُكوِّن صفوفًا من الدايمرات (أي الوحدات الثنائية)؛ كل ذرة في هذه الدايمرات تُغطَّى في البداية بذرة هيدروجين. يضخُّ رأس المجهر النافذ الماسح دفقةً من الإلكترونات النفقِيَّة لإثارة الرابطة Si–H مما يُسبِّب انفصال ذرة الهيدروجين. (ب) طُوِّر واحد من أوائل الأمثلة على هذا النوع من الطباعة الليثوغرافية ذات الدقة الذرية، على يد جوزيف لايدينج وزملائه في جامعة إيلينوي في أوربانا-شامبين. المَعالم المضيئة تمثل صفوفًا من دايمرات السليكون بعد إزالة ذرة الهيدروجين التي تُغطيها باستخدام المجهر النافذ الماسح. تُشير الأسهم إلى المناطق التي انتُزعت منها كِلتا ذرتي الهيدروجين المُرتبطتَين بالدايمر. (جـ) ترانزستور أحادي الذرة صُنع من خلال انتزاع الهيدروجين باستخدام مجهر نافذ. النقطة الصغيرة في منتصف الصورة، بين منطقتي التوصيل الأشد إضاءة، تُمثل المنطقة النشطة في الترانزستور، ويبلُغ عرضها ذرة واحدة فحسب.

البِنى النانوية الذاتية التجميع

يظهر في الجانب الأيمن من شكل ٣-٣ صورة بالمجهر الإلكتروني لمجموعة من الترانزستورات بدقة تصنيع ٧ نانومترات صُنِّعت باستخدام نفس نوعية التقنيات المتقدمة لتنميط أشباه الموصلات التي ناقشناها في الجزء السابق؛ أي باعتماد نظامٍ تنازلي للتركيب النانوي من القمة إلى القاع بدقة عالية جدًّا. بجوار هذه الصورة، نرى مثالًا لا يقلُّ إبهارًا للتنميط النانوي؛ وهو صورة التُقِطت بمجهرٍ إلكتروني لشبكة بلورية واقية من البروتينات من نوع مُعيَّن تحتجز كثيرًا من البكتيريا والعتائق. تضم هذه الشبكات البلورية، التي تُعرف بطبقات S، بروتينات تُعَد من أكثر البروتينات شيوعًا على الأرض، ولا تُحدِّد شكل الكائن الحي فحسب، بل تلعب كذلك دورًا محوريًّا في كثيرٍ من وظائفه البيولوجية والبيوكيميائية الأساسية، من أبرزها: الحماية، والالتصاق، والانقسام الخلوي. ولكن بلورة الطبقة S بترتيبها المُعقَّد على المستوى النانوي الذي يُضاهي ترتيب رقاقات السليكون الحديثة، لم تَستدعِ مسبقًا لأشباه موصلات تكلفته مليارا دولار لتصنيعها. فقد تشكَّلت تلقائيًّا بدون أي حاجةٍ إلى مساعدة تكنولوجية خارجية. بعبارة أخرى، «تجمَّعت ذاتيًّا».

الطبيعة عالِم مُبتكِر قديرٌ في تكنولوجيا النانو. فقبل آلاف السنين من نجاح الإنسان في التحكُّم في العالَم النانوي، كانت الطبيعة، ولا تزال، تستغل القوى بين الذرية والقوى بين الجزيئية لتكوين مادةٍ على أصغر المستويات، لتبني مجموعةً مُدهشة من الأنماط المُعقَّدة ذات البنية النانوية، بحيث يتبع شكل كلٍّ منها وظيفته. وفي معرض استعراضهما للمساهمات في عددٍ خاص من دورية «فيلوسوفيكال ترانزاكشنز أوف ذا رويال سوسايتي» حول فكرة التنظيم الذاتي، وصفَ رولاند فايدليش-سولدنر وتيمو بيتز، من مبادرة «الخلايا قيد الحركة» بجامعة فيستفليشه فيلهلمز بمدينة مونستر الألمانية، التنظيم الذاتي بأنه أساس بيولوجيا الخلية:

> يكمن التنظيم الذاتي في صميمِ ما يتَّسم به التنظيم من متانةٍ وقدرة على التكيُّف سواء على مستوى الخلايا أو على مستوى الكائن؛ ولذا يشكِّل ركيزةً أساسية يستنِد إليها الانتقاء الطبيعي والتطور.



(ب) (أ)

شكل ٣-٣: (أ) صورة بمجهر إلكتروني لمجموعةٍ من ترانزستورات تأثير المجال بدقة تصنيع ٧ نانومترات مُصنَّعة على رقاقة سليكون. (ب) بلورة من البروتينات الذاتية التجميع (طبقة S) من عتائق «السلفولوبس». (العتائق هي كائنات وحيدة الخلية تُشبه البكتيريا وكانت تُصنَّف ضمنها في وقتٍ ما.) المسافة بين البروتينات تبلغ نحو ٢٠ نانومترًا.

ربما لاحظتَ أنني انتقلت من استخدام مصطلح «التجميع الذاتي» إلى الإشارة لوصف فايدليش-سولدنر وبيتز لـ «التنظيم الذاتي». بعض العلماء يتعاملون مع هذين المُصطلحَين باعتبارهما مترادفَين. لكن ثمَّة آخرين، وأنا منهم، يُميزون بينهما تمييزًا خاصًّا؛ فالتجميع الذاتي يحدُث عندما يكون النظام الجزيئي قريبًا من حالة الاتزان الديناميكي الحراري، أما التنظيم الذاتي فيحدث عند حدوث تدفُّق كبير للطاقة أو المادة، وهذا يعني أن النظام بعيد عن الاتزان. والاتزان الديناميكي الحراري يعني ببساطةٍ أن يبدوَ أي جزءٍ من النظام مُشابهًا لأي جزء آخر فيه إلى حدٍّ كبير. فكِّر فيما يحدث عند فتح زجاجة من عطرٍ فوَّاح في غرفة. في لحظة فتح الزجاجة يخرج النظام، الذي يمكن اعتباره الهواء داخل الغرفة في هذه الحالة، من حالة الاتزان؛ أي يتزوَّد بدفقة موضعية من المادة (أو الطاقة أو كليهما) عند موضعٍ مُعيَّن، مما يعني أن توزيع الجزيئات في الغرفة ليس مُتجانسًا. لكن إن انتظرت برهة، سوف «يتزن» النظام مجددًا؛ أي إن جزيئات العطر ستنتشر عبر الغرفة — بسبب تصادُماتها مع الجزيئات المجاورة — حتى يُصبح توزيعها متجانسًا. وبهذا يستعيد النظام اتزانه.

في نظام ذاتي التجميع، تكون للجزيئات حريةٌ كبيرة في التفاعل تبعًا لنوع الجُهد بين الجُزيئي الذي تناولناه في الفصل الأول. فالقوى التي يقوم عليها التجميع الذاتي الجُزيئي عمومًا تنطوي عليها تفاعُلات روابطها أضعف بكثيرٍ من الروابط التساهمية و/أو الأيونية التقليدية المسئولة عن تماسُك الذرَّات معًا في صورة بلورات غير عضوية مثل السليكون والنحاس والذهب. إلى جانب قوى جذب فان دير فالز التي تناولناها بالفعل، ينطوي التجميع الذاتي على أنواعٍ أخرى أضعف من التفاعل: كالروابط الهيدروجينية (المسئولة عن السلوك الشاذ للماء، وتفسيرها له تاريخ طويل ومتقلِّب)؛ وكراهية أو حُب الماء (وتستدعي أيضًا فهم تفاعُلات الماء، وتنبع في الأساس من الإنتروبيا الناجمة عن خلط مادتَين مُختلفتَين؛ وسنتناول المزيد عن الإنتروبيا فيما سيلي)؛ وكيمياء التناسُق (وهي تُشبه الروابط التساهمية نوعًا ما عدا أن كِلا إلكتروني الرابطة يأتي من نفس الذرة أو الجزيء).

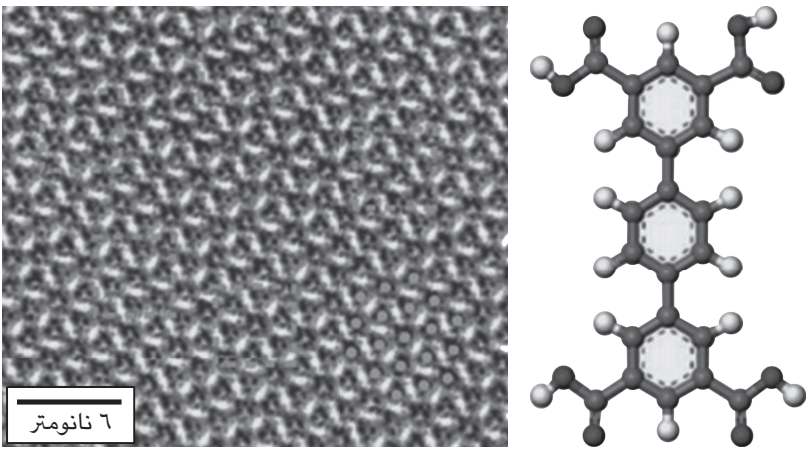
يتطلَّب التجميع الذاتي للبِنى المُحكمة التنظيم مثل الطبقة S الموضحة في شكل ٣-٣ قوًى بين جزيئية ضعيفة نسبيًّا، وإلا ستعلق الجزيئات في مكانها. أما إذا كانت الرابطة قوية أكثر مما ينبغي، فلن تكون هناك مرونة في عملية التجميع؛ ومن ثَم لن يكون هناك سبيل لتصحيح الأخطاء. الأمر هنا أشبه قليلًا ببناء هيكلٍ بِمكعبات الليجو التي ما إن تضعها في مكانها لا يمكن تفكيكها أبدًا. فأي خطأ في وضع المُكعبات لا يمكن تصحيحُه. لكن إن كان من المُمكن تفكيك مكعبات الليجو بسهولة، فسيُمكننا نقلها إلى مكانها الصحيح. لكن على عكس مكعَّبات الليجو، لا يُوجَد في التجميع الذاتي للجزيئات قوة واعية تُرشد كل جزيء إلى مكانه. لكن عوضًا عن ذلك، تُوجِّه الطاقة الحرارية الجزيئات عبر مسارات عشوائية بالأساس — وهو نفس التأثير المسئول عن الحركة البراونية — حتى يُمكنها استكشاف مشهد الطاقة، لتجد موقع الارتباط الذي تُفضِّله في النهاية. أما إن وَجَد جزيء نفسه مرتبطًا في موضعٍ أقلَّ تفضيلًا لدَيه، وما دامت طاقة الارتباط ليست قوية للدرجة (بالمقارنة بالاضطرابات الحرارية)، فسوف يتحرَّر في لحظةٍ ما وينتشر حتى يصل إلى موقعٍ أفضل من حيث الطاقة.

غير أن طاقة الروابط بين الجزيئية ليست المُتحكِّم الوحيد في ترتيب الجزيئات. فالإنتروبيا لا تلعب دورًا مهمًّا في ذلك فحسب، بل يُمكنها أحيانًا أن «تُهيمن» على عملية التجميع. وكما أشرْنا بإيجاز في الفصل السابق، تصف التفسيرات التقليدية للإنتروبيا الظاهرةَ عمومًا في سياق التزايُد المُستمر للفوضى، لكن هذا التفسير، في أحسن الأحوال، لا

يلمس المبادئ الجوهرية التي يستنِد إليها هذا العلم، وفي أسوأ الأحوال يُعَد مضللًا تمامًا. وقد عبَّر فرانك لامبرت (١٩١٨–٢٠١٨) — وهو أكاديمي أمريكي ظلَّ يُنادي بلا كللٍ من أجل إحداث تغييرات في طريقة تدريس الإنتروبيا في المساقات الجامعية — عن ذلك على نحوٍ مشهود في عنوان ورقة بحثية نشرَها عام ١٩٩٩: «أوراق اللعب المُختلطة، والمكاتب الفوضوية، وغُرَف السكن غير المُرتَّبة؛ هل تُعَد هذه أمثلة على زيادة الإنتروبيا؟ هذا هراء!» إن الإنتروبيا تتعلَّق بوضعيَّات وترتيبات مُكونات النظام، وتُعبِّر كميًّا عن الاحتماليات النسبية لحدوثها، وتُفسِّر كيف تتوزَّع الطاقة (أو تتشتَّت) عبر هذه التكوينات. وبذلك، ترتبط الإنتروبيا عن كثَب برياضيات التباديل والتوافيق والاحتمالات؛ لذا فهي ذات طبيعةٍ إحصائية في الأساس. وتتعلَّق الوضعيات والترتيبات المُتنوِّعة محل البحث في التجميع الذاتي الجزيئي بالحركات الدورانية والاهتزازية والانتقالية المُحتمَلة للجزيئات.

ثمَّة مثال رائع ومُقنع للغاية على تأثير الإنتروبيا على التجميع الذاتي الجزيئي، مُقتبَس من أعمال زميلي بيتر بيون وزملائه من الباحِثين في كليات الفيزياء والفلك والكيمياء بجامعة نوتنجهام. لنُلقِ نظرةً على شكل ٣-٤. يُمثل كل واحدٍ من هذه «القضبان» المُوضحة في الصورة التي التقطت بواسطة مِجهر نافذ ماسح العمود الفقري للجزيء العضوي المُسطَّح الموضَّح تركيبه أيضًا في الشكل. (الجزيء هو جزيء حمض بارا-تيرفينيل-٣,٥,٣′,٥′، أو رباعي الكربوكسيل، أو حمض رباعي الكربوكسيل، ويُسمَّى اختصارًا TPTC، لكن اسمه لا يُهمنا. كلُّ ما يُهم أن حلقات الكربون الثلاث التي تُشكِّل «العمود الفقري» للجزيء تظهر ساطعةً في صور المجهر النافذ الماسح.) للوهلة الأولى، يبدو ترتيب الجزيئات غايةً في النظام؛ إذ يتبع كل جزيءٍ على ما يبدو الوضعيةَ نفسها بالنسبة إلى جيرانه. لكن لننظُر عن كثَب أكثر. حاول مثلًا تتبُّع صفٍّ من الجزيئات بعرْض الصورة. ستجد أمثلةً عديدة يبدو فيها اتجاه الجزيء «غير مُتَّسق» ويكسر النمط؛ فالتوزيع الجزيئي أقل انتظامًا مما يبدو عليه لأول وهلة.

اتضح أن التبايُن في الجهد بين الجزيئي ليس هو ما يلعب الدور الحاسِم في تحديد التنظيم الذاتي في هذه الحالة (لأن الفارق في طاقة الترابط بين جزيئَين لكلٍّ من الوضعيات والترتيبات الجزيئية المُختلفة طفيفة.) في المقابل، ينشأ النمط شِبه كامل من تأثير الإنتروبيا؛ بعبارة أخرى، عدد الطرق المُختلفة لترتيب (أو اصطفاف) الجزيئات على السطح هو ما يُحدِّد البلورة الجزيئية المُثلَى. والترتيب الجزيئي المُوضَّح في شكل ٣-٣



شكل ٣-٤: على اليسار صورة من المجهر النافذ الماسح لطبقةٍ مفردة ذاتية التجميع من ذلك الجزيء الموضَّح تركيبه الكيميائي على اليمين. هذا الجزيء هو جزيء حمض بارا-تيرفينيل-٣,٥,٣′,٥′، أو رباعي الكربوكسيل؛ وحلقات الكربون الثلاث التي تُشكِّل البِنية المركزية للجزيء هي المُساهم الأكبر في إشارة التيار النفقي التي يرصدها المجهر النافذ الماسح. كل واحدٍ من القضبان التي تظهر في الصورة على اليسار ينبثِق من العمود الفقري الثُّلاثي الحلقات للجزيء. والمُتحكم الرئيس في ترتيب الجزيئات في البلورة هو الإنتروبيا.

تحديدًا أكثر احتماليةً بكثيرٍ من الوضعيات الأخرى المنافسة في الواقع، مثلما أن احتمالية انتشار جزيئات العطر في الغرفة تطغى على احتمالية بقاء الجزيئات معًا.

ثمَّة صراعٌ دائم بين طاقة الوضع بين الجزيئية (المُمثلة بنوعيات التفاعلات التي ناقشناها في الفصل الأول)، وبين الإنتروبيا؛ أي كيفية توزيع الطاقة عبر الوضعيات والتراتيب المُختلفة للنظام. ولا يقتصر هذا على علوم النانو وتكنولوجيا النانو. فعبر طيف نطاقات الأطوال، من الذرَّات إلى المجرَّات، يُحدِّد التوازُن بين طاقة التفاعلات والإنتروبيا كيفيةَ تطوُّر أي نظام؛ فالديناميكا الحرارية لا تُركز على الطاقة فحسب، بل أيضًا على الطاقة «الحرة»، وهي كمية تُفسِّر التوازن بين الجهد بين الجزيئي، وتأثير البيئة، والإنتروبيا. ما يشغلنا على المستوى النانوي هو التحكُّم في اللَّبِنات الأساسية لبناء المادة — من الذرات، والجزيئات، والجسيمات النانوية — وتوجيهها لتكوين نوعية البِنى التي نحتاج إليها. لذلك يقضي علماء تكنولوجيا النانو قدرًا هائلًا من الوقت في محاولة إيجاد

«النقطة المثالية» التي توازن بين تأثيرات الجهد بين الجزيئي، والإنتروبيا، والتأثيرات والمُثيرات الخارجية (مثل الحرارة والضغط والضوء ...) بالطريقة الصحيحة تمامًا.

قادت شارون جلوتزر، أستاذ الهندسة الكيميائية بجامعة ميشيجان، برنامجًا بحثيًّا مبتكرًا ومُلهمًا وذا تأثير بالِغ استغلَّ الإنتروبيا لحفز «مزيد» من النظام لا نظام أقل. وقد صرَّحت جلوتزر في مقابلة مع مجلة «كوانتا» قائلة:

> ما يحدث هو أن الجسيمات تُحاول تعظيمَ الحيز المتاح لها للتحرك فيه إلى أقصى حد. وإن كان بإمكانك أن تتحرك، فيُمكنك أن تُعيد ترتيب موضعك واتجاهك. وكلما زادت المواضع، زادت الخيارات، وزادت الإنتروبيا بالتبعية ... ما تُريده هذه الأنظمة هو المباعدة بين الجسيمات بما يكفي لتعظيم الحيز المُتاح للحركة لجميع الجسيمات. وقد يؤدي هذا إلى توزيعاتٍ غاية في التعقيد، حسب شكل الجسيم.

تركز جلوتزر وفريقها على ما يُعرَف بـ «النشوء»؛ أي كيف يمكن لأجسامٍ بسيطة، باتباع قواعد غاية في البساطة، أن تُثمر سلوكًا جماعيًّا مُعقدًا أيما تعقيد. (تُعَد أسراب طيور الزرزور مثالًا واقعيًّا جيدًا جدًّا لهذا التفاعُل الجماعي، وإن كانت طيور الزرزور ليست أبسط شيءٍ يمكن تصوُّره.) يدرس الفريق كيفيةَ تحقيق التجميع الذاتي والتنظيم الذاتي في الجسيمات (النانوية) على اختلاف أشكالها وأحجامها. ونظرًا للدور المحوري للإنتروبيا في حفز تكوين البِنى المُنظِّمة، تعتقد جلوتزر بقوة في ضرورة توسيع نطاق تعريف التفاعُلات بين الجزيئية وبين الجسيمية لتشمل الإنتروبيا بطريقةٍ أكثرَ وضوحًا ومباشَرةً بكثيرٍ ليُصبح: الرابطة الإنتروبية.

بعيدًا عن نطاق الاتزان

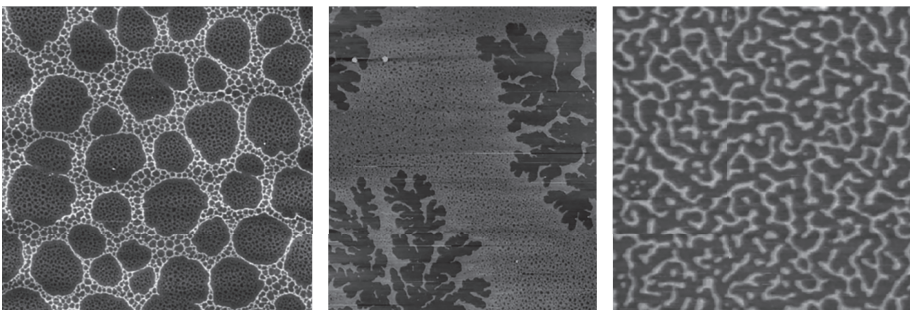
في ظروفٍ مثالية، سيستمر التجميع الذاتي حتى يُصبح كل ذرة، أو جزيء أو جسيم نانوي في أدنى مستويات الطاقة التي تُعَد أكثر حالاته مُواءمة. وهذه أكثرُ الوضعيات استقرارًا، وغالبًا ما تكون الغاية القصوى لكثيرٍ من علماء تكنولوجيا النانو الذين يستغلون التجميع الذاتي لتوليد أنماطٍ نانوية مُعينة. لكن قليلًا ما تكون الأمور مِثالية في عالَم العلم (رغم الاستخدام الواسع النطاق للنماذج والافتراضات المِثالية في الفيزياء على سبيل المثال). لذا غالبًا ما يتمكَّن التجميع الذاتي من إنتاج بنًى ليست في أكثرِ الحالات

استقرارًا، بل في حالةٍ تُعرَف بالحالة «شِبه المُستقرة». تُشير «الحالة شِبه المُستقرة» إلى نظامٍ لم يصِل لأقل طاقة مُمكنة له؛ حيث علِقت الجزيئات (أو الذرات أو الجسيمات النانوية) في وضعيةٍ قد تستغرق مدةً زمنية طويلة جدًّا للإفلات منها. قد تتراوَح هذه المدة الزمنية بين ميكرو ثوانٍ وملايين الأعوام (وأكثر من ذلك)، لكن يُمكن تسريع العملية عمومًا بضخِّ طاقة حرارية، أي بتسخين الأشياء. ويعتبر الألماس مثالًا جيدًا للبِنى شِبه المستقرة. فالحالة المُفضَّلة لذرات الكربون على مستوى الديناميكا الحرارية ليست الشكل البلوري الجميل الذي نراه في خواتم الألماس، بل حالة الجرافيت (أي «الرصاص» الموجود في القلَم الرصاص) الأقل جاذبية كثيرًا على المستوى الجمالي. فبعد فترةٍ زمنية كافية (رغم أن الانتظار سيستمر طويلًا جدًّا بلا شك)، ستبهت لمعة الألماس وتتحوَّل إلى اللون الأسود.

تكون الجسيمات النانوية الغروية عُرضةً بصورة كبيرة للانحصار في حالاتٍ بعيدة عن الاتزان. ولتصنيع نبائط الحالة الصلبة التي تستغل الخواص الإلكترونية والضوئية للجسيمات النانوية، ينبغي أن تكون تلك الجسيمات في حالةٍ صلبة. وهذا يعني أننا يجِب أن ننقل الجسيمات النانوية من حالتها كمعلق في مذيب إلى ركيزة أو مادة أولية صُلبة يُمكننا تصنيع وصلات كهربية عليها لقياس سريان الإلكترونات خلال تجميعة الجسيمات النانوية والتحكُّم فيه. ثمَّة الكثير من التشابُهات هنا مع فيزياء بُقَع القهوة؛ فلدَينا مُذاب (الجسيمات النانوية) مُعلَّق في مذيب. ضع قطرة صغيرة من هذا المُعلَّق على سطحٍ ما واترُكها تجف. ماذا سيحدث؟

تبيَّن أن الكثير من الفيزياء والكيمياء الفيزيائية الغنية والمُبهرة تكمُن وراء ما يبدو في البداية تجربةً بسيطة جدًّا. فإذا تبخَّر المُذيب بسرعة، فلن يتهيأ للجسيمات النانوية الوقت الكافي لتنتشِر حتى تصِل إلى حالة الاتزان؛ فيتركها عالقةً بلا حَراك؛ لأنها لا تستطيع التحرك بدون المذيب المُحيط بها. لكن بإبطاء معدَّل تبخُّر المذيب، يمكن للجسيمات استكشاف مشهد الطاقة بصورةٍ أشملَ بكثير والعثور على وضعياتٍ أكثر ملاءمة، بينما تنتشِر مُتنقِّلة من موقع إلى آخر داخل الشبكة النانوية المتنامية. وعلى حدِّ تعبير أحد زملائي، تكون الجسيمات النانوية كركَّاب سفينة يتحركون مع تيار مدِّ المذيب؛ وكأنها أدواتٌ لتتبُّع كيفية تبخُّر المذيب. وقد أُجريت دراسة مُفصلة على هذا النوع من التنظيم الذاتي بواسطة التجفيف على يد إران راباني وزملائه (في جامعات تل أبيب، ومعهد ماساتشوسيتس للتكنولوجيا، وهارفارد، وكولومبيا على الترتيب)، وقدَّمت لنا هذه

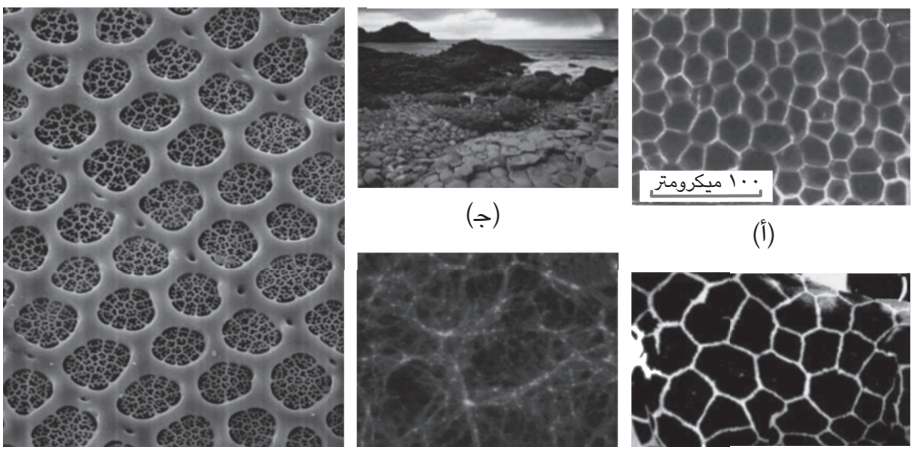
الدراسة رؤًى مُتعمقة عن كيفية اتحاد التفاعلات بين الجسيمات، والتفاعلات بين المذيب والجسيم، وتفاعلات المذيب مع المذيب لإنتاج مجموعة مميزة من البِنى الذاتية التنظيم (انظر شكل ٣-٥.)



شكل ٣-٥: أمثلة على انتظام جسيمات الذهب النانوية بعيدًا عن الاتزان على رقاقة سليكون. تُظهِر كل صورة من صور مجهر القوة الذرية انتظامَ الجسيمات النانوية على مقياس الميكرونات (أو عشرات الميكرونات) لا النانومترات؛ لذا لا تُلاحَظ الجسيمات النانوية المفردة في هذا المستوى من التكبير. بدلًا من ذلك، تنبثق الأنماط من الاستجابة الجماعية لأعداد كبيرة من الجسيمات عندما يتدفَّق المذيب الذي يحمِلها ويتبخَّر.

ثمَّة نوع شائع جدًّا من الأنماط، لا في أنظمة الجسيمات النانوية فحسب، بل في أي عمليةٍ ذاتية التنظيم أو ذاتية التجميع تنطوي على ترسُّب مادة من محلول — بما في ذلك البوليمرات والبروتينات والحمض النووي، بل وجميع أنواع الجزيئات — وهو الرغوة أو الشبكة الخلوية (شكل ٣-٦). تتكوَّن فجوات بسبب التبخُّر ومن ثَم تتسع داخل غشاء المذيب، في حين تعود الحمولة «النانوية» مع ازدياد حجم الفجوة المتكوِّنة في السائل. الحالة النهائية لهذه العملية هي حالةٍ ذاتية التنظيم يمكن أن تتشكَّل على مستويات أطوال عديدة (شكل ٣-٦)، وأفضل ما تُوصَف به أنها رغوة أو شبكة خلوية، حيث تُستخدَم كلمة «خلوية» بمعناها الهندسي لا بمعناها البيولوجي. (توجَد هنا تشابُهاتٌ مهمة مع الفيزياء والكيمياء الفيزيائية لبُقَع القهوة، وإن كانت الأنماط التي تكوِّنها الجسيمات النانوية أعقدَ إلى حدٍّ ما.) وإن تمكَّنا من التحكم في كيفية تبخُّر المذيب، يُمكننا أن نؤثِّر في المواضع النهائية التي تصل إليها الجسيمات النانوية من خلال كلٍّ من التجميع الذاتي

والتنظيم الذاتي. وقد قامت عدة مجموعات بحثية حول العالم بهذا تحديدًا، وكان من ضمنها مجموعتنا البحثية في نوتنجهام. فضلًا عن أن مثل هذه الأنماط ليست حكرًا على الجسيمات النانوية، بل يُلاحظ وجودها في مجموعةٍ متنوِّعة وكبيرة من الأنظمة تتراوح في أطوالها من النانومترات وحتى الكيلومترات (وأكثر من ذلك بكثير).

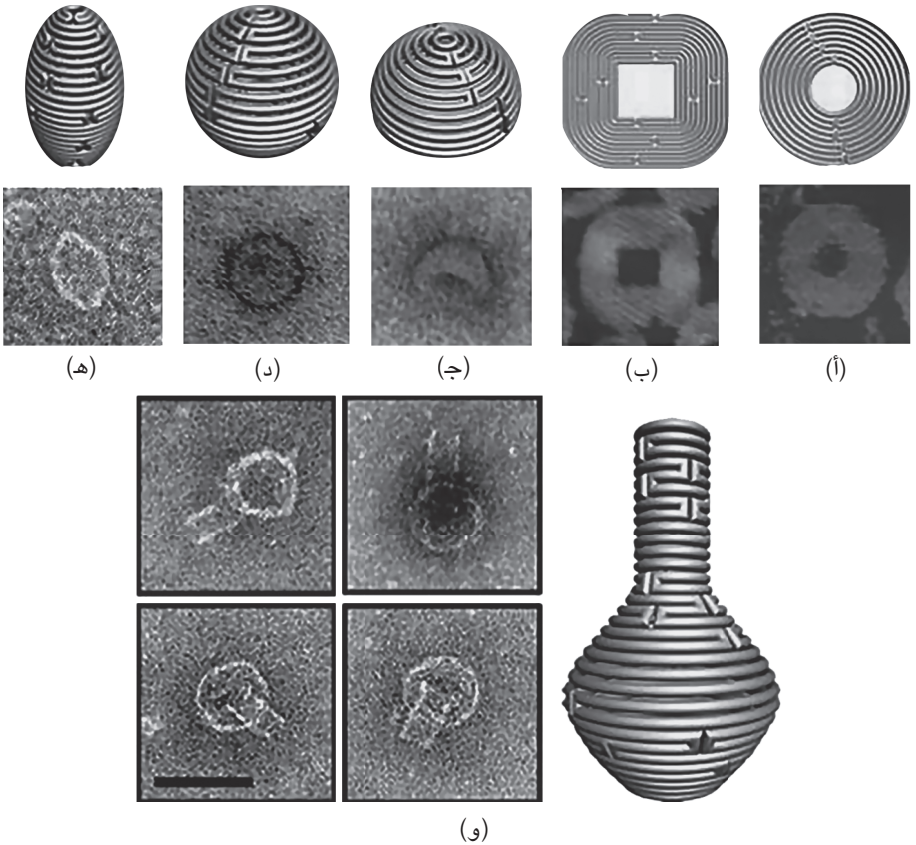


شكل ٣-٦: الرغاوي والشبكات الخلوية في الطبيعة. (أ) مقطع عرضي لسدادة فلين من زجاجة نبيذ؛ (ب) جلد زرافة؛ (جـ) منطقة جيانتس كوزواي في مقاطعة أنتريم، بأيرلندا الشمالية؛ (د) محاكاة لِبنية الكون على نطاقٍ واسع؛ وأفضل وصف لتوزيع المجرَّات هو أنه شبكة خلوية (أو «رغوة كونية»)؛ (هـ) النمط المُتشابك ذو التركيب الميكروي والنانوي الذي تُشكله الطحلبة الأحادية الخلايا المعروفة باسم الدياتوم (انظر الإطار الأول في شكل ٣-٥). يشيع شكل الرغوة داخل رغوة في المواد ذات البنية النانومترية.

غالبًا ما يكون ثمة تركيزٌ على بلوغ درجات عالية من الانتظام في الجزيئات أو الجسيمات؛ إذ يميل علماء تكنولوجيا النانو إلى محاولة إنتاج أنقى حالة بلورية مُمكنة من العيوب، بحيث يصطف كل جزيءٍ مع جيرانه. غير أن الفوضى وعدم النظام لهما جمالهما ووظيفتهما كذلك. في الواقع إن الشبكة العصبية التي تعمل داخل جمجمتك وأنت تقرأ هذا النص بعيدةٌ أشد البعد عن أن تكون حالة مادة ذات نظامٍ مثالي أو شديدة

التماثل؛ فالاتصالية هي مربط الفرس، وليس التماثل. بالمثل، بالرغم من أن الطبيعة تُنتِج شبكاتٍ بلورية مُذهلة الانتظام (والسليكون خيرُ مثال على هذا)، فإنها تُنتج كذلك بِنى خلوية وشبكية أقل نظامًا بكثير، وإن كانت لا تقلُّ فاعلية، عبر نطاقٍ واسع للغاية من الأطوال، بما فيها النطاق النانوي. ويوضح شكل ٣-٦ بضعة أمثلةٍ فقط على شيوع الرغوة والشبكات الخلوية في الطبيعة، بما في ذلك الأنماط الذاتية التنظيم ذات الأبعاد الميكروية والنانوية المُذهلة التي تكوِّنها الدياتومات؛ وهي طحالب دقيقة أُحادية الخلية تُشكِّل جزءًا ضخمًا من النظم البيئية التي حولنا؛ إذ تُنتج نحو ٥٠٪ من الأكسجين الذي تُنتجه الأرض كلَّ عام، وتضم ما يُقارب نصف المادة العضوية والكائنات الحية الموجودة في المحيطات. (تجدُر الإشارة هنا إلى أن الحياة نفسها حالة بعيدة عن الاتزان؛ ومع الاعتذار عن هذه الفكرة الكئيبة، فحالتنا الأرضية هي الموت.)

يُمكننا بهذه الطريقة محاكاة، وسرقة، قدرة الطبيعة على بناء المواد عبر مستويات عديدة من الأطوال؛ وهما الاستراتيجيتان اللتان توصفان على الترتيب، بالمحاكاة الحيوية، والكليبتوقراطية الحيوية على سبيل المزاح (نسبة إلى السرقة). وإن كنا سنسرق من تكنولوجيا النانو الطبيعية، فلنا أن نفترض افتراضًا منطقيًّا إذن أن أول نظام جزيئي حيوي نختار «سرقته» سيكون الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين (دي إن إيه). يتميَّز الحمض النووي الريبي المنزوع الأكسجين باستعدادٍ استثنائي لتخزين المعلومات الحيوية (مدفوع بخاصية التعرُّف الجزيئي الذي يرجع إلى ازدواج القواعد)؛ لذا يُعَد منصةً ذات قوة استثنائية لتوليد البِنى النانوية المُعقدة ذات التصميم التصاعدي، التي يمكن لتعقيدها «القابل للبرمجة» أن يُناظر بسهولة تعقيدَ بِنى النبائط السليكونية المُتقدمة التي ناقشناها في الأجزاء السابقة. وسنتعرَّض أكثرَ لتكنولوجيا النانو القائمة على الحمض النووي في فصلٍ لاحق، ولكن في الوقت الحالي سأُسلِّط الضوء بإيجازٍ على أعمال بول روثموند من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتك)، الذي كان له السبق في ابتكار التقنية المعروفة باسم أوريجامي الحمض النووي في عام ٢٠٠٦ (مستندًا إلى سوابق أعمال إريك وينفري (من معهد كالتك أيضًا) وأعمال نادريان سيمان (من جامعة نيويورك) في مجال تكنولوجيا النانو القائمة على الحمض النووي). تتضمَّن استراتيجية روثموند طيَّ جزيئات الحمض النووي الطويلة الأحادية الشريط إلى أشكالٍ اعتباطية. في البداية كانت هذه الأجسام والأشكال ثنائية الأبعاد، لكن أوريجامي الحمض النووي صار الآن يشمل تصميمَ أشكالٍ مُعقَّدة ثلاثية الأبعاد، وتشفيرها، وما يتبع ذلك من تجميع



شكل ٣-٧: أوريجامي الحمض النووي. يُمكن برمجة الحمض النووي كيميائيًّا بحيث يُجمِّع أجسامًا وأشكالًا نانوية ثنائية وثلاثية الأبعاد. وتضم الأمثلة المُوضحة هنا: (أ) و(ب) نمطان بدائيَّان ثُنائِيَّا الأبعادِ مع صورهما بمجهر القوة الذرية (وإن كان أوريجامي الحمض النووي قد استُخدِم أيضًا لتصنيع أشكالٍ ثنائية الأبعاد أعقد بكثير بما فيها رقاقات الثلج والنجوم والوجوه الباسمة والكلمات والخرائط)؛ (جـ)، (د)، (هـ) أجسام ثلاثية الأبعاد تضم نصف كرة، وكرة، ومجسمًا إهليلجيًّا، مع صور مُطابقة بها بالمجهر الإلكتروني النافذ، و(و) زجاجة، مع صور لها بالمجهر الإلكتروني النافذ أيضًا التُقِطت من زوايا مختلفة.

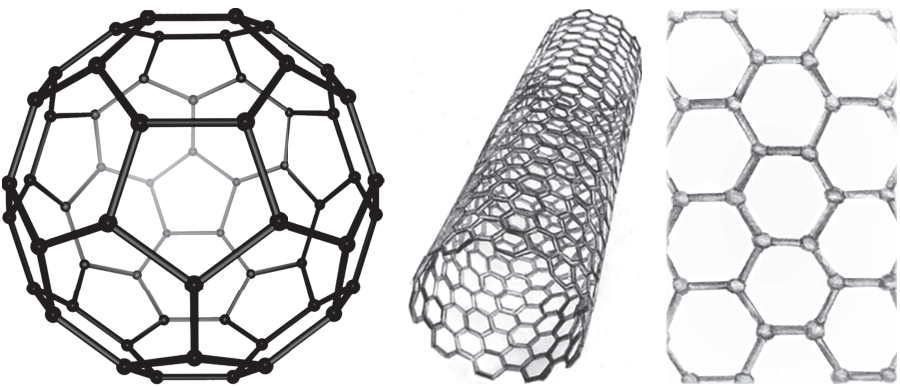
ذاتي «موجَّه» لأشكالٍ مُعقَّدة ثلاثية الأبعاد، منها القضبان، والكرات، والمُكعَّبات، وأشكال أعقدُ بكثير كالزجاجات والتروس النانوية (شكل ٣-٧).

أراضي الكربون المسطَّحة

لقد استهللنا هذا الفصل بمناقشةٍ لتاريخ تكنولوجيا النانو القائمة على السليكون. وسنختتِمُه بتناول لعنصرٍ ملاصق للسليكون في الجدول الدوري، ألا وهو: الكربون. ينتمي العنصران إلى المجموعة نفسها في الجدول الدوري؛ إذ يحتوي كلٌّ منهما على أربعة إلكترونات تكافؤية؛ لذا فأول ما يتبادر إلى أذهاننا أنهما قد يكونان مُتشابِهَين كيميائيًّا إلى حدٍّ ما. غير أنهما مُختلفان أشدَّ الاختلاف من نواحٍ عديدة. فالحياة العضوية قوامُها الكربون، والكيمياء العضوية هي في الأساس كيمياء الكربون. لكن أنظمتنا التكنولوجية — بما في ذلك نظم الإلكترونيات النانوية التي تُدير أغلبَ عصرنا المعلوماتي — لم تكن عضويةً في العادة. لقد صار هذا قيدَ التغيير الآن (وإن كنتُ أعترف أنه يحدُث ببطءٍ شديد)، وهو تغيير تُحرِّكه التطورات الرائدة في التجميع الذاتي الجزيئي وتكنولوجيا النانو القائمة على الحمض النووي اللذَين تناولناهما فيما سبق. غير أن الجزيئات في المُعتاد تحتوي على عناصرَ عديدة؛ فالكيمياء العضوية للحمض النووي، على سبيل المثال، تعتمد على الفوسفور والنيتروجين والأكسجين والهيدروجين، إلى جانب الكربون. فهل يُمكن تصنيع نبيطة نانوية تعتمد على الكربون البلوري وحده؟

لندخل إلى عالَم المادة «المعجزة» المعروفة بالجرافين (شكل ٣-٨). على الرغم من أن سُمك الجرافين لا يتعدَّى ذرةً واحدة، فإنه يُعَد أقوى مادة اكتُشفت على الإطلاق؛ فهو ليس مجرد شكلٍ بلوري جديد للكربون النقي — أي شكل مُتأصل للكربون — بل هو مادة صلبة ثنائية الأبعاد. تجمع رواية إدوين أبوت «الأرض المُسطَّحة: قصة خيالية مُتعددة الأبعاد»، الصادرة عام ١٨٨٤، بين كونها سخرية لاذعة من المجتمع الفيكتوري واستكشافًا ذكيًّا لمسألة تقليص الأبعاد. في الواقع، لقد ثبت وجود أرض أبوت المسطحة الخيالية تجريبيًّا — وإن كان من دون ساكنيها — مع اكتشاف الجرافين من خلالِ ما يُعرَف تقنيًّا بالتقشير الميكانيكي الميكروي، لكنه يُعرَف أكثر بطريقة الشريط اللاصق. فعلى حدِّ قول كوستيا نوفوسيلوف — الذي حاز مع زميله أندريه جييم من جامعة مانشستر جائزةَ نوبل للفيزياء عام ٢٠١٠ لاكتشافهما الجرافين — في خطاب قبوله لجائزة نوبل، من المُمكن أن «نقشر» طبقات من بلورة جرافيت (ومن ثَم ننقلها

إلى سطح آخر) باستخدام الشريط اللاصق، وهكذا حتى نصل في النهاية إلى بلورة نقية ثنائية الأبعاد بسُمك بلورة واحدة. والواقع أنك إذا كنتَ قد استخدمت قلمَ رصاصٍ يومًا ما، تكون بذلك قد نفَّذت عمليةً مُشابهة بقدرٍ ما لتقشير الجرافيت (أي «الرصاص» المُستخدَم في القلم الرصاص) بينما تخطُّ ما تريد. ورغم أن عملية استخلاص الجرافين الأصلية، والتجارب التي أُجريت عليه، استخدمت طريقةَ الشريط اللاصق، فإن توسيع نطاق العملية إلى المُستويات الإنتاجية المطلوبة للتصنيع العملي للنبائط تطلُّب تطويرَ طرقٍ عديدة لنمو الجرافين مباشرةً على ركائز، منها الترسيب الكيميائي للبخار، والتنضيد بالحزم الجزيئية، وقد صارت الآن قيد الاستخدام الروتيني.



شكل ٣-٨: تكنولوجيا النانو الكربونية. يُشكل الكربون بنًى نانوية تقيِّد الإلكترونات في الأبعاد الثلاثة جميعًا (جزيء البوكمنسترفُوليرين C_{60})، وفي بُعدَين (الجرافين)، وفي بُعدٍ واحد (أنبوب الكربون النانوي).

في حين تُقيِّد الجسيمات النانوية الإلكترونات في الأبعاد الثلاثة كلها، يفرض الجرافين حصاره عليها في مستوًى ثنائي الأبعاد. قبل اكتشاف الجرافين، ظهر نوعان آخران من أنظمة الكربون النقية النانوية أثارا قدرًا مُقاربًا من الاهتمام بين علماء النانو، هما: بوكمنسترفوليرين (C_{60}) وأنابيب الكربون النانوية. يتَّخِذ جزيء البوكمنسترفوليرين، أو

«كرة البَكي» اختصارًا، شكلًا كرويًّا شبه تام — ومن ثَم يُعتبَر أكثر الجزيئات تماثُليةً في الطبيعة (له تماثل مُجسَّم عشريني الوجوه) — ويتكوَّن من ٦٠ ذرة مُرتبة على نحوٍ مُماثل لغرز الخياطة في كرة القدم العادية؛ بحيث تقع ذرات الكربون عند الرءوس بين ٢٠ شكلًا سُداسيًّا و١٢ شكلًا خماسيًّا (كما هو موضح في شكل ٣-٨). بعبارةٍ أخرى، يُعتبَر جسيمًا نانويًّا من الكربون، وكمثل الجسيمات النانوية من المعادن وأشباه الموصِّلات التي ناقشناها قبلًا، يُقيد الإلكترونات في الأبعاد الثلاثة كلها. وفوق ذلك، يقِلُّ قطر كرات البَكي بقليلٍ جدًّا عن نانومتر واحد؛ لذا يُعَد من نواحٍ عديدة جزيئًا صُنِع خصِّيصَى لعلوم النانو، ولعِب دورًا محوريًّا وثوريًّا في تطوير مناحٍ عدة في علوم النانو منذ اكتشافه (من قِبل هاري كروتو وريتشارد سمولي وزملائهما، وقد فازوا لقاء ذلك بجائزة نوبل للكيمياء عام ١٩٩٦).

أما أنابيب الكربون النانوية، على الجانب الآخر، فهي أسطوانات نانوية من الكربون النقي؛ وهي في الأصل صفائحُ من الجرافين تُلَف و«تدمج» معًا على طول إحدى حوافها. في الأنابيب النانوية، تُقيَّد الإلكترونات بحيث لا تكون حرة الحركة إلا في اتجاهٍ واحد؛ وهو على امتداد الأنبوب. في كلٍّ من هذه الحالات — كرات البَكي، والأنابيب النانوية، والجرافين — تلعب أبعاد النظام دورًا رئيسًا في تحديد الخواص النانوية للإلكترونات المُقيَّدة. وفي الجرافين، على وجه الخصوص، ينجم عن محدودية الأبعاد، إلى جانب توزيع ذرات الكربون على شكل خلية نحل، مجموعة فريدة بحقٍّ من الخواص الإلكترونية. من إحدى هذه الخواص أن تفاعل الإلكترونات مع البلورة السداسية التي تتَّخِذ شكل خلية نحل، والتركيب غير العادي للبلورة نفسها، يعني أن سلوك الإلكترونات المسئولة عن حمْل التيار الكهربي في الجرافين أقربُ إلى سلوك الفوتونات؛ أي تتصرَّف وكأن كُتلتها صفر. وفوق ذلك، فهي تتحرَّك وكأن سرعة الضوء ٦١٠ أمتار/ثانية (خلافًا لقيمته الفعلية التي تبلغ ٣ × ٨١٠ أمتار/الثانية في الفراغ)، مما يفتح بابًا لاحتمالية عمل تجارب لفيزياء الجسيمات على طاولات المَعامل بدلًا من المُسرِّعات التي تتكلَّف عدة مليارات من الجنيهات. فعلماء فيزياء الجسيمات، الذين عُرِف عنهم أحيانًا أنهم يُشيرون إلى زملائهم الذين يعملون على المواد الكثيفة/فيزياء النانو باسم «علماء الحالة الرديئة»، باتوا يولون اهتمامًا خاصًّا للجرافين.

غير أن الجرافين ليس ميدانًا لأبحاث الفيزياء الأساسية الجديدة فحسب؛ فخواصُّه الفريدة تعني أيضًا أن له تطبيقاتٍ لا حصر لها على نحوٍ استثنائي. تتنوع هذه التطبيقات

ما بين طلاءات شفافة مُوصلة تستخدم في الخلايا الشمسية وشاشات اللمس، ومُستشعرات حساسة للغازات و«أنوف نانوية» (أي الكشف عن الجزيئات)، وكواشف للضوء فائقة السرعة، وحواجز للغازات، وأجهزة لقياس الإجهاد، وترشيح وتنقية المياه. بل ونبائط إلكترونية نانوية يُحتمَل أن تتفوَّق على تكنولوجيا السيموس السليكونية. غير أنه في هذا التطبيق الأخير، ما زال أمام الجرافين طريق طويل إلى حدٍّ ما قبل أن يُصبح منافسًا حقيقيًّا للسليكون. يرجع بعض هذه العقبات إلى أسبابٍ تتعلَّق بالفيزياء الأساسية؛ ومنها أن الجرافين في حالته الأصلية ليس لدَيه فجوة نطاق الطاقة اللازمة لكثيرٍ من التطبيقات الإلكترونية النانوية (وإن كان يُمكن حثُّ فجوة النطاق اللازمة باستخدام كيمياء دقيقة ومن خلال تشويه بلورة الكربون عمدًا).

ولكن حتى عند تخطِّي مشكلات الفيزياء وهندسة الإلكترونيات، يظلُّ أمامنا الواقع الاقتصادي الصعب؛ فأي خطوة للبُعد عن البنية التحتية السليكونية المُعتمدة صناعيًّا والاتجاه نحو استخدام الجرافين، أو أيٍّ من نُظم المواد الثنائية الأبعاد العديدة الأخرى التي صارت تُستخدَم في أعقابه، ستتطلَّب إعادةَ تفكير جذرية في استراتيجيات التصميم والتصنيع. وسيكون هذا مُكلفًا. لكن كما سنستكشِف في الفصل المقبل، فالجرافين ليس الطريق الوحيد نحو إحداث ثورة في الإلكترونيات ومُعالجة المعلومات في النطاق النانوي.

الفصل الرابع

المعلومات أصل الموجودات

وُلِدت آدا لوفليس، ابنة السيد بايرون وزوجته، وسُمِّيت أوجستا آدا بيرون، في عام ١٨١٥. وبفضل دراسة والدتها للرياضيات، تعلَّمت آدا الرياضيات في سنٍّ صغيرة — وكان مجالًا تعليميًّا غريبًا على نساء عصرها — وأظهرت قدرةً وإقبالًا استثنائِيَّين في المادة. بعد أن تعرَّفت لوفليس بتشارلز باباج في إحدى الحفلات في عام ١٨٣٣، صارت مفتونةً بعمل مُحرك الفروق الذي طوَّره باباج، وهو جهاز كمبيوتر ميكانيكي استخدم مجموعةً معقَّدة من التروس لحساب الحلول للمسائل الرياضية والحسابية. وفي معرض ترجمتها مقالًا عن مُحرِّك الفروق من أصله الفرنسي، أضافت لوفليس ملاحظاتٍ مُستفيضة من تأليفها، شملت، على وجه الخصوص، توصيفًا لمجموعةٍ من الخطوات يمكن تنفيذُها على الجهاز لحلِّ مسائل رياضية مُحدَّدة. وتُعتبر هذه الملاحظات على نطاقٍ واسع أولَ مثالٍ على خوارزمية معقَّدة مُعدَّة لآلة (على الرغم من انقسام الآراء حولَ ما إذا كان يمكن اعتبار لوفليس صاحبة أول برنامج حاسوبي).

استوعبت لوفليس الروابط العميقة والدقيقة بين المادة والرياضيات، وبين المعلومات والعالَم المادي، قبل أن يبدأ المجتمع العلمي في استيعاب هذه الروابط بأكثر من قرن: «من خلال تجهيز الآليات للدمج بين رموز عامة في تسلسُلاتٍ تتنوَّع وتمتد بلا حصر، تتشكل رابطة توحِّد بين العمليات المادية والعمليات العقلية المجرَّدة الموجودة في أكثر فروع العلوم الرياضية تجريدًا.» وفي سبعينيات القرن العشرين أدرك الفيزيائي جون أرتشيبالد ويلر أيضًا هذا التداخُل الأساسي بين المعلومات والمادة، وصاغه في مقولته البليغة والشعرية «المعلومات أصل الموجودات». يتم تشفير البيانات ومعالجتها من خلال عمليات مادية، سواء كانت هذه العمليات هي العمليات الأساسية المُستخدَمة في وحدات المعالجة السليكونية، أو الحمض النووي، أو المسارات العصبية، أو — كما سنرى — التفاعل بين

الذرات. (لاحظ أنها جميعًا تنطوي على عمليات ومُعالجات تتم على مستوى النانو، وليس هذا من قبيل الصدفة.) يرى ويلر أن المعلومات أكثرُ جوهريةً من الطاقة والمادة والمجالات والقوى بكثير، وأنها الإطار التأسيسي للفيزياء: «بعبارة أخرى، كل كمية فيزيائية، أي كل موجود، يستمد معناه النهائي من البِتَّات المعلوماتية، أي من مؤشراتٍ ثنائية تحمل إما نعم أو لا، وهو الاستنتاج الذي نُجمله في عبارة: المعلومات أصل الموجودات.»

تقدَّمت تكنولوجيا النانو حتى صار بمقدورنا أن نُمثِّل المعلومات الثنائية في نطاقاتٍ دون النانومتر، وصار بالإمكان أن يشمل تخزين المعلومات كتابةَ البيانات بتبايُنٍ أفضل بكثيرٍ مما تُتيحه الحدود الذرية حتى؛ فمن الممكن تخزينُ المعلومات في نطاق أصغر بكثيرٍ من حجم الذرة. في هذه المرحلة نكون قد تجاوزنا تكنولوجيا النانو بكثير ودخلنا عالم تكنولوجيا البيكو؛ أي التحكُّم في المادة في نطاقات أطوالٍ دون ذرية. ورؤى لوفليس البعيدة النظر فيما يخصُّ الروابط بين المادة والرياضيات ومعالجة المعلومات ذات أهمية خاصة في هذا السياق، كما سنرى مرارًا على مدار هذا الفصل.

حوسبة الحمض النووي

قبل أن نتطرق إلى الحد الذري، ينبغي العودة إلى التصنيع النانوي بواسطة الحمض النووي الذي تناولناه في الفصل السابق. يُعد التجميع الذاتي، سواء كان مدفوعًا بنفس نوعية التعرُّف الجزيئي الذي تقوم عليه تقنيةُ أوريجامي الحمض النووي أو لا، وسيلةً فعَّالة لتوليد مجموعةٍ متنوِّعة من الأنماط والبِنى في النطاق النانوي (والميكروي). غير أن تلك الأنماط أكثرُ بكثيرٍ من مجرد صور جميلة. إن الروابط بين المادة والرياضيات، كما بيَّنت لوفليس، ضخمة؛ فالحوسبة مُمكنة باستخدام الأنماط ذات البِنية النانوية.

كما رأينا من قبل، يمكن برمجة الحمض النووي لينتج صورًا مختلفة من الأنماط التكرارية وغير التكرارية. غير أن تلك الأنماط الناتجة يُمكنها أن تتكوَّن نتيجةً لعملية حوسبة أيضًا؛ فالعمليات المنطقية — مثل AND، وNAND، وNOT، وNOR — يمكن تشفيرها خلال التفاعُلات بين الجزيئية التي تحدُث بين جزيئات الحمض النووي المختلفة، بحيث يمكن «قراءة» إشارات الخرج النهائية من خلال تصوير النمط الذاتي التجميع الناتج ببساطة. أو، كما بيَّن ليونارد آدلمان من جامعة ساوث كاليفورنيا في عام ١٩٩٤، يمكن تشفير مهام أو مسائل حاسوبية أكثر تعقيدًا بكثيرٍ تتجاوز المنطق الثنائي في الحمض النووي. وفي أول تجربة منشورة تُنفِّذ الحوسبة باستخدام الحمض النووي، بيَّن

آدلمان أنه يمكن حلُّ مسألة البائع المُتجوِّل الكلاسيكية — «إذا كان معك قائمةٌ بالمدن والمسافات بين كل مدينتَين، ما أقصرُ طريقٍ ممكن يمر بكل مدينة مرةً واحدة لا أكثر ثم يُعيد البائع إلى المدينة التي بدأ منها؟» — من خلال تكنولوجيا الحمض النووي النانوية.

خلال العقود التي تلت هذا الاكتشاف الرائد، قامت مجموعة إريك وينفري بمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتك)، على وجه الخصوص، بالاستفادة من أعمال آدلمان لدفع الحوسبة باستخدام الحمض النووي إلى مستوياتٍ عالية جدًّا من التعقيد والتحكُّم، بما في ذلك تصنيعُ أنابيب نانوية من الحمض النووي لإنتاج نظام للتجميع الذاتي «يمكن إعادة برمجته». وهنا تتجلَّى تكنولوجيا النانو في أبهى وأقوى صورها؛ إذ يُمثل هذا اتحادًا بين مجالاتٍ تقليدية — الكيمياء (الحيوية) والأحياء والفيزياء والهندسة والحوسبة وغيرها — في النطاق النانوي، حيث تُستخدَم مادة ذات بِنية نانوية لتضمين المعلومات والحوسبة.

غير أن الحمض النووي يُعتبر جزيئًا عملاقًا ومعقدًا للغاية بالنسبة للفيزيائيين. فنحن اختزاليون حتى النخاع؛ إذ نفضل اختزال العالم والكون في أبسط وحداته البنائية المُمكنة. لكن ما هي حدود الاختزال عندما يتعلَّق الأمر بالحوسبة؟ ما أصغر وحدة يُمكننا الوصول إليها؟ استغرق فاينمان في التفكير في هذا السؤال تحديدًا، لا في إطار مقولته «هناك متَّسع كبير لـ...» فحسب، وإنما أيضًا في إطار مَساقٍ درَّسه في كالتك من عام ١٩٨٣ وحتى ١٩٨٦ بعنوان «إمكانيات وقيود آلات الحوسبة». وقد حدث تقدُّم هائل في الحوسبة على المُستويَين الذرِّي والنانوي منذ أن قدَّم فاينمان ذاك المَساق.

بيانات ذرية

ما أبسطُ مُكون إلكتروني يمكنك تخيُّله؟ قد يقول البعض المقاوم؛ فشيء بدائي بسيط كقطعةٍ من السلك تكون له مقاومة مُحددة. لكن هذا ليس اختيارًا فعالًا بصفة خاصة. إن أبسط مُكوِّن يُنفِّذ وظيفة يمكن التحكُّم فيها هو المفتاح. فحالته يمكن تبديلها بين التشغيل والإيقاف، أو بين ٠ و١ بلغة البدائل الثنائية، مما يمنحنا وسيلةً لا لتشفير المعلومات فقط، بل للتحكُّم في الحالات والعمليات كذلك. لذلك نرى المفاتيح في كل مكانٍ من حولنا؛ فثمَّة مفتاح طاقة متواضع في كل جهازٍ منزلي، إلا أنه مُفيد للغاية.

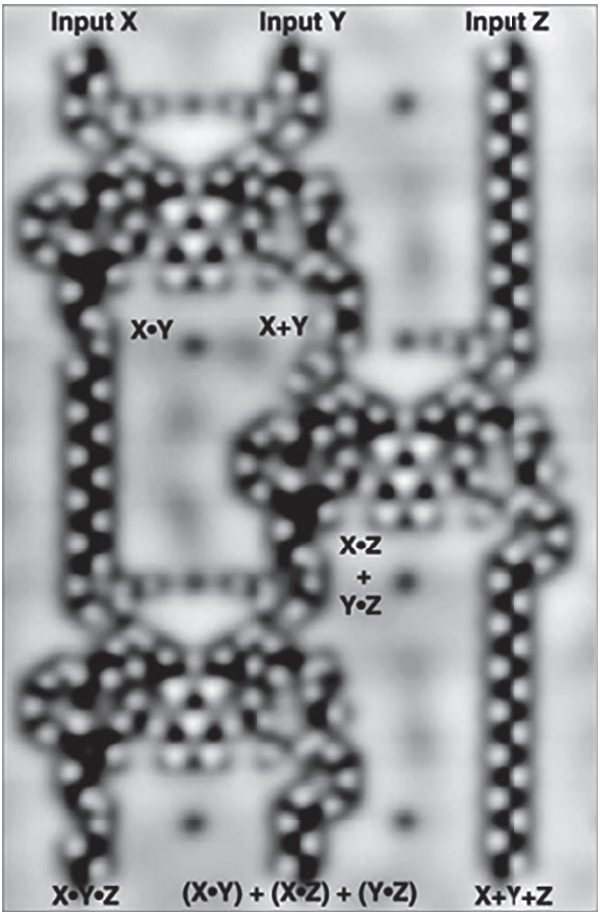
بعد فترة قصيرة من توجيه دون آيجلر وزملائه للذرات إلى مواضعها لأول مرة لتكوين شعار شركة آي بي إم، اخترعوا مفتاحًا ذريًّا يعمل بتناقُل ذرة زينون مفردة بين رأس مجهر نافذ وسطح من النيكل. كانت حالة المفتاح تتبدَّل؛ أي تنتقل ذرة الزينون إما

من السطح إلى الرأس أو العكس، من خلال استخدام نبضة من الجهد. وفي وقتٍ سابق من العام نفسه (١٩٩١)، قام إن-وان ليو وفايدون أفوريس، بمَعامل آي بي إم البحثية في يوركتاون هايتس، ببيان عملي لاستخلاص ذرة مفردة من سطح من السليكون. وكان باحثو آي بي إم قد اكتشفوا في وقتٍ سابق خاصيةً مهمة في النبائط تسمَّى المقاومة التفاضلية السالبة — التي بموجبها يمكن أن يقلَّ التيار بين قطبين مع زيادة الجهد بينهما (مما يخالف قانون أوم تمامًا)، وذلك بسبب ظاهرة تسمَّى الرنين النفقي — للذرة المفردة.

أحدَثت تلك التجارب الرائدة المبكِّرة التي قامت بها الفِرق البحثية بمعامل آي بي إم في ألمادن ومعامل آي بي إم في يوركتاون هايتس، طفرةً في الاهتمام باستخدام المجهر النافذ الماسح ومجهر القوة الذرية لتنفيذ وظائف الأجهزة الإلكترونية ومبادئ الحوسبة على المستويات الذرِّية والجزيئية والنانوية. ليس في مقدوري في هذه المُقدمة القصيرة جدًّا أن أبدأ في تقديم عرضٍ وافٍ لهذه الأعمال والإنجازات، التي تُعَد ثمرة جهود عددٍ كبير من المجموعات البحثية حول العالَم على مدى عقودٍ عديدة. لكني سأركز على بضع نقاطٍ بالِغة الأثر بدلًا من ذلك.

في تجربة عبقرية أخرى، استخدم فريق آيجلر ما أسمَوه التعاقبات الجزيئية لتشفير المنطق البولياني. صفَّ الفريقُ جزيئاتِ أول أكسيد الكربون بالطريقة المناسبة بحيث يؤدي تحريك الجزيء الأول في الصف (بواسطة رأس مجهر نافذ) إلى حفز تفاعُل مُتسلسِل (شكل ٤-١). تفاعل كل جزيءٍ مع جاره في التسلسل، مما أدَّى إلى تغيير ترتيبه ووضعيته، وهكذا حتى نهاية الصف، فيما بدا كلعبة دومينو نانوية. ومن خلال التصميم الدقيق لهذه «المسارات» الجزيئية، التي أتاحت تحكمًا دقيقًا في سلسلة التفاعُلات بين الجزيئية المُتعاقبة، تمكَّن فريق آيجلر من تشفير المنطق البولياني (بوابة AND)، وعدة وظائف رقمية أخرى. هذا النوع من المنطق الجزيئي بطيءٌ للغاية بالمقارنة بأنظمة سيموس السليكونية والبنى الإلكترونية الأخرى، لكن الهدف هنا لم يكن تصنيع جهاز يُمكنه أن يحلَّ محلَّ أجهزتنا المعتادة. فاستراتيجية التعاقُبات الجزيئية تُنفِّذ المنطق بطريقة جديدة كليًّا، ويمكننا أن نتعلَّم الكثير عن أساسيات الحوسبة من خلال التلاعب بالمادة في النطاق النانوي على هذا النحو.

تجنَّبتُ حتى الآن الإشارةَ أكثر من اللازم إلى خطبة فاينمان الشهيرة، «هناك مُتَّسع كبير في القاع»، التي ألقاها عام ١٩٥٩، لا لأنها مذكورة في كل مقالات تكنولوجيا النانو تقريبًا فقط، بل لأنه قد تبيَّن أن تأثيرها على روَّاد تكنولوجيا النانو أقل بكثيرٍ مما كان



شكل ٤-١: الحوسبة الجزيئية. تُنفَّذ مجموعة متنوعة من العمليات المنطقية (حيث يمثل الرمز + العملية المنطقية «أو OR»، ويمثل الرمز • العملية المنطقية «وAND») من خلال التعاقُبات الجزيئية التي يُحفِّزها رأس المجهر النافذ الماسح.

مفترضًا في البداية. فرغم أن فاينمان يُعتبر صاحب تأثيرٍ هائل على أصول العِلم المعني بالعالم الفائق الصِّغَر وتطوُّره، شأنه شأن كثيرٍ من التطوُّرات العلمية الأخرى، فإن حقيقة الأمر غير مباشرة ومُعقَّدة أكثر من ذلك إلى حدٍّ ما. تناول الكاتب العِلمي فيليب

بول في مقالٍ كتبَه عام ٢٠٠٩ تأثيرَ وإرث خطبة فاينمان «هناك متَّسع كبير في القاع»، احتفالًا بالذكرى الخمسين لها. يُسلِّط بول الضوءَ على تحليلٍ قام به كريس تومي — وهو عالِم أنثروبولوجي بجامعة ساوث كارولينا — أوضح أنه خلال العقدَين التاليين على نشر نص حديث فاينمان، لم تجنِ تلك المحاضرة الأسطورية من الاستشهادات في المُجمَل سوى «سبعة»؛ بل وكان رأي واحد منها أبعدَ ما يكون عن الإطراء؛ إذ قال عنها: «عقيمة ولا معنى لها في العالَم الحقيقي».

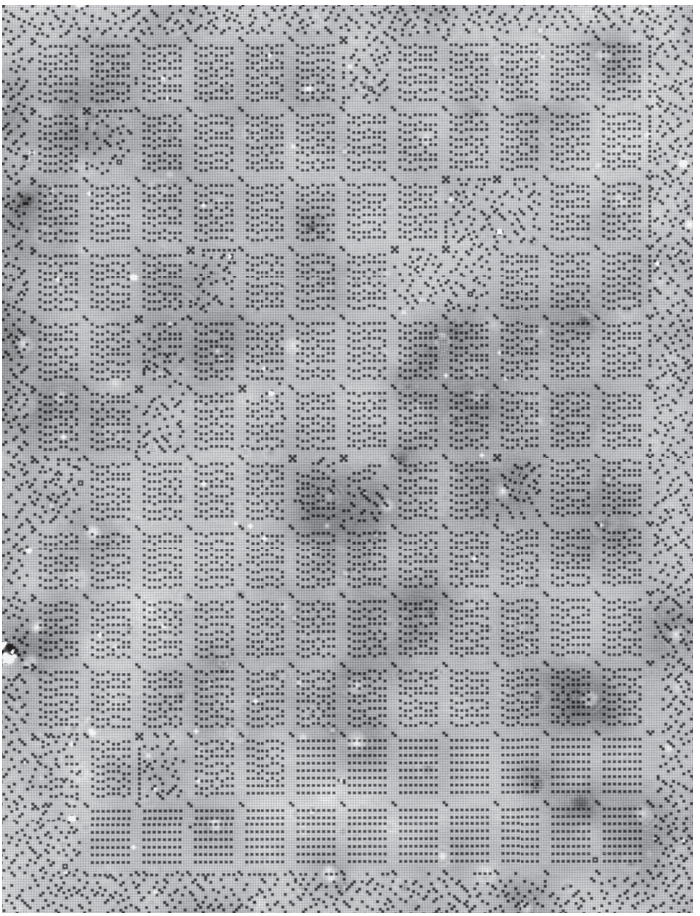
من الجدير بالذكر أن مُخترعي المجهر النافذ الماسح، الذين ساهموا في تحقيق حُلم فاينمان في الهندسة ذات الدقة الذرية أكثر من أي شخصٍ آخر، لم يكن لديهم أيُّ عِلم تمامًا بخطبة «... متَّسع في القاع». ومع ذلك، وبسبب تأثير الضجة الإعلامية تأثيرًا كبيرًا، نالت خطبة فاينمان حظَّها من القراءة بكل تأكيد وأُعيدت قراءته من قِبل كثيرين من الجيل الحالي من علماء النانو. ومن هذا المنظور، يظلُّ لخطبة فاينمان تأثيرٌ هائل، وبالذات هذا المقطع:

> لكنني لستُ خائفًا من التفكير في السؤال النهائي عما إذا كنا سنَقدِر في النهاية — في المستقبل الباهر — على ترتيب الذرات بالطريقة التي نريدها؛ ترصيص الذرات حتى أصغر المستويات الذرية! ماذا سيحدث لو صار بإمكاننا ترصيص الذرات ذرةً تلوَ الأخرى بالطريقة التي نريد (في حدود المنطق بالتأكيد؛ فلا يُمكنك أن تضعها بحيث تكون غير مُستقرة كيميائيًّا على سبيل المثال)؟

كان فاينمان، الذي تُوفِّي في عام ١٩٨٨، ستغمُره السعادة لو رأى كلماته هذه من خطبته التي صارت الآن أيقونةً مترجمة إلى ذراتٍ في استعراضٍ مذهل للتشفير الذري في عام ٢٠١٦.

في شكل ٤-٢، تمثل كل نقطة داكنة فجوةً ذرية مفردة في بلورة من الكلور على سطح نحاسي. استخدم الباحثون الذين قاموا بتحويل هذا المقطع من خطاب فاينمان إلى شفرة — وهم فلوريس كالف وزملاؤه بمعهد كافلي لعلوم النانو في هولندا — رأس المجهر النافذ الماسح لإعادة ترتيب الفجوات وفقًا لرموز الآسكي الثنائية؛ إذ يتكوَّن كل بِت من فجوة (٠) وذرة كلور (١). عند تكميلها بعدَدٍ من الأنماط المؤشرة لتحديد مواضع بداية ونهاية الخطوط، وتحديد المناطق التي حالت فيها عيوب البلورة دون التحكم في الذرات، استطاع الباحثون بناءَ توزيعات ذرية مُتشابكة على قدرٍ كبير من التعقيد. وكان

عنوان ورقتهم البحثية، التي نُشرت في عام ٢٠١٦، يعبِّر عن ذلك تمامًا: «ذاكرة ذرية قابلة للمسح والكتابة سِعتها كيلوبايت».



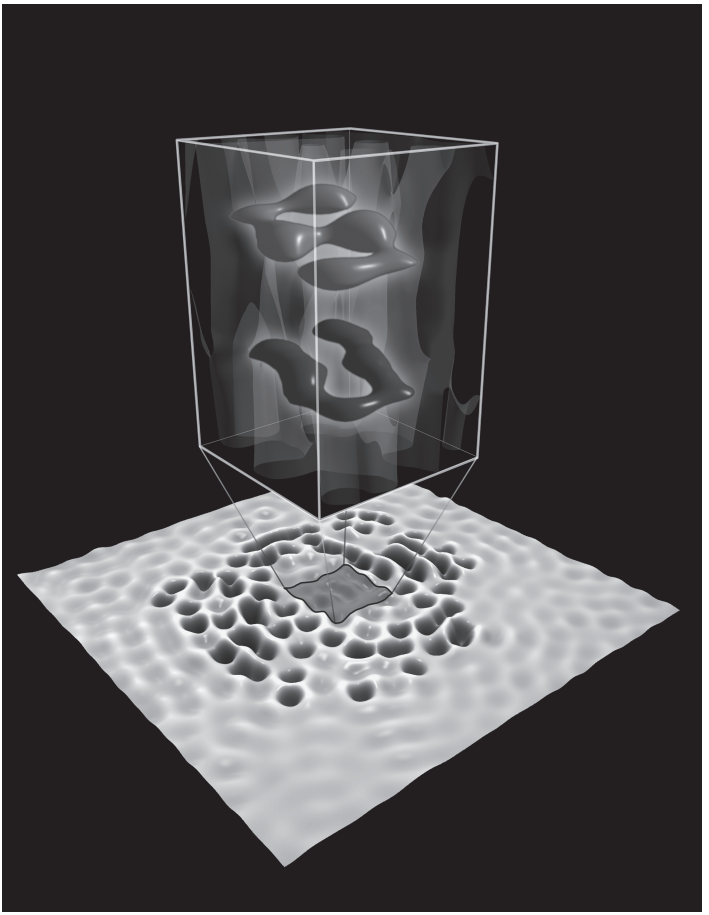
شكل ٤-٢: متَّسع كبير في القاع: عنوان خطبة فاينمان الشهيرة التي ألقاها عام ١٩٥٩ مُشفرًا في هيئة فجوات ذرية مفردة في بلورة كلور.

رغم روعة هذا الكيلوبايت الذري، فهو بالتأكيد ليس أكبر كثافةً تخزينية مُمكنة للبيانات. ففي عام ٢٠١٢، قاد هاري مانوهاران وكريستوفر مون، اللذان كانا عضوَين

سابقَين في فريق آيجلر في معامل أبحاث آي بي إم في ألمادن، فريقًا من الباحثين بجامعة ستانفورد لإنتاجِ ما يُعتبر أصغر كتابة في العالَم حاليًّا، بحسب موسوعة جينيس للأرقام القياسية. لم يكتب الفريق بالذرات، بل عن طريق التحكُّم في كثافة الإلكترون على سطحٍ ما لتشفير المعلومات بدقة دون ذرية، مما حقَّق سعة تخزين للمعلومات تجاوزت حدود الذرات المفردة (شكل ٤-٣). وهذا التحكُّم في الموجات الإلكترونية المُتكوِّنة على سطح بلورة نحاس — وهي نفس نوعية الموجات التي أنتجت النمط داخل السياج الكمومي الدائري — نتج عنه كتابة الحرفين «SU» بتعديل الكثافة الإلكترونية. ونظرًا لأن هذه الإلكترونات الحرة يمكن أن يكون طولها الموجي أقصر بكثير من المسافات بين الذرية على السطح، فبإمكانها أن تُشفِّر المعلومات في مساحةٍ أو حجم أصغر. لقد تبيَّن أن ثمَّة متسعًا في القاع أكثر حتى مما تخيل فاينمان.

رغم أن كل هذه أمثلة مُبهرة للتحكم في المادة على المستوى الذري والجزيئي والنانوي، ثمَّة عدد من العقبات التي تحول دون توسيع مدى هذه الطرق لتُصبح تكنولوجيا تجارية قابلة للتطبيق والتوسع. أولًا، الدرجة الفائقة من التفريغ ودرجات الحرارة الفائقة البرودة (تُقارب ٤ كلفنات) ليست بالبيئة الأنسب لهذه الأنظمة. وتتفاقم هذه العراقيل بسبب مشكلة السرعة؛ فرغم أن التعاقب الجزيئي مثال متطرف، فإن «جميع» طرق المسح المسباري تعاني المحدوديةَ الشديدة لنطاق قدرتها. فكما رأينا، وإلى حين تطوير ميكروسكوبات مسبارية ماسحة متعددة الرءوس قادرة على العمل بدقة ذرية، تظلُّ التقنية بطبيعتها تسلسُلية، ومن ثَم في مُنتهى البطء. وعلى صعيد أساسي أكثر، لا تُعتبر الركيزة الفلزية منصةً جيدة على الإطلاق لتصنيع النبائط ذات الأبعاد الذرية أو الجزيئية عليها. فإن أردْنا تجميع النبيطة لتوصيلها بالعالَم الخارجي من خلال وصلات كهربية، ستؤدي الركيزة الفلزية إلى حدوث ماسٍ كهربي ببساطة.

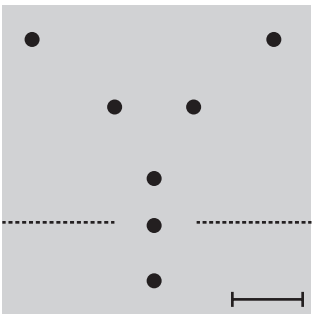
وما هذا إلا سبب واحد من بين أسباب عديدة جعلت أشباه الموصلات، وبخاصة السليكون، المادةَ المُفضلة لتصنيع الأجهزة الإلكترونية والحاسوبية ذات الحالة الصلبة في أي نطاق من الأبعاد. لقد رأينا بالفعل إمكانيةَ تشكيل سطح السليكون حتى مستوى الذرات المفردة عن طريق تحرير ذرات الهيدروجين باستخدام رأس المجهر النافذ الماسح. وعلى الرغم من أن استخدام المجهر النافذ الماسح ما زال يُشكِّل عقبةً هائلة أمام توسيع نطاق عملية الطباعة الليثوغرافية الذرية لإنتاج مليارات النبائط على رقاقة واحدة، فإن



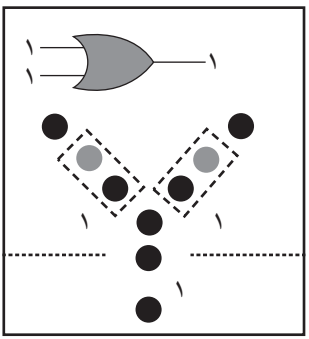
شكل ٤-٣: دقة دون ذرية: أصغر كتابة في العالَم شُفِّر الحرفان «SU» عن طريق تبايُنات في كثافة الإلكترونات على سطح نحاسي، بدقةٍ أدقَّ من أقطار الذرات المكونة للسطح.

كون الركيزة من السليكون يعني أن النبائط الأحادية الذرة لا تتعرَّض لماسٍ كهربي من خلال الركيزة ويمكن دمجها مع دوائر خارجية، لا نظريًّا فقط بل عمليًّا أيضًا. إن أقصى ما توصَّلنا إليه في مُعالجة المعلومات والمنطق القائمة على السليكون على مستوى الذرة الواحدة يتضمَّن التحكم في حالة السليكون من حيث الشحنة (انظر شكل ٤-٤)، كما

أثبت كلٌّ من تاليانا هاف وروشان أتشيل وزملاؤهما في مجموعة بوب وولكو البحثية بجامعة ألبرتا، والتحكم أيضًا في خصائصه المغناطيسية في واقع الأمر. وبالنظر إلى أن السليكون ليس مادة مغناطيسية، فقد يبدو ذلك مفاجئًا إلى حدٍّ ما.



(أ)



(ب)

شكل ٤-٤: منطق الروابط المُتدلِّية. شكل للبوابة المنطقية «أو OR»، صُنِّعت على سطحٍ من السليكون المُغطَّى بالهيدروجين باستخدام رأس مجهر نافذ ماسح لانتزاع ذرات هيدروجين مفردة. ينتج عن هذا ما يُعرَف بالرابطة المُتدلِّية على ذرة السليكون الكامنة تحتها. يُمكن التحكُّم في حالة الشحنة لكل رابطة من خلال التفاعلات بينها وبين الروابط المُتدلِّية المجاورة لها، مما يسمح بتنفيذ عمليات منطقية على مستوى المدارات الإلكترونية.

اللف المغزلي وأجهزة تشغيل الأغاني

رغم الدور الجوهري الذي تلعبه الشحنة في قطاع كبير من التكنولوجيا، فهي ليست الخاصية الوحيدة للإلكترون التي يُمكننا استغلالها. فالمغناطيسية تنبع من خاصية للإلكترونات مُختلفة تمامًا، ألا وهي: اللف المغزلي. (الأصح تقنيًّا أن نقول إن التفاعل بين الشحنة واللف المغزلي هو أساس السلوك المغناطيسي. لكن مراعاةً للمساحة، سأُضطر إلى التغاضي عن بعض التفاصيل الدقيقة فيما سيَلي. وأُرشِّح بشدة كتاب ستيفين بلاندل «مقدمة قصيرة جدًّا للمغناطيسية» كمقدمةٍ أكثرَ تفصيلًا إلى حدٍّ ما لموضوع المغناطيسية المذهل.)

ما اللفُّ المغزلي؟ هذا سؤال عميق جدًّا وصعب وذو جوانب عديدة، يكمُن حلُّه في النهاية في توليفةٍ من النسبية وميكانيكا الكم، وينطوي في صميمه على مبدأ باولي للاستبعاد. اللف المغزلي خاصية ميكانيكية كمومية ليس للإلكترونات فحسب، بل لكل الجسيمات الأولية دون الذرية المعروفة (مع الاستثناء الجدير بالملاحظة الخاص ببوزون هيجز). تكمُن الصعوبة في أن الإلكترون — وهو ما ينطبق على جميع الجسيمات الأخرى ذات اللف المغزلي — ليس مجرد نسخةٍ نانوية من النحلة الدوَّارة التي اعتدناها في عالَمنا الماكروسكوبي اليومي. فكِلا النظامَين يمتلك خاصية كمية الحركة الزاويَّة، ما يعني أن الإلكترون يدور. غير أن من الاختلافات الجوهرية بين النحلة الدوَّارة والإلكترون، بخلاف نطاق الأبعاد، أن كمية الحركة الزاويَّة الأصيلة بالنسبة إلى الأخير فقط مُكمَّاة. فلا يمكنها أن تأخذ إلا قيمةً من اثنتَين، إما حالة مغزلية لأعلى أو لأسفل، ومحاذاة إلكترونات المادة في أحد هذَين الاتجاهَين هو ما يُحدِّد سلوكها المغناطيسي. تخيل الإلكترون وكأنه مغناطيس مُتناهي الصغر يمكن توجيهه بحيث يكون قطبه الشمالي إلى الأعلى أو الأسفل.

غالبًا ما يُقال لطلبة الفيزياء إن اللف المغزلي ظاهرةٌ ميكانيكية كمومية بحتة ليس لها نظير تقليدي، ومِن الأفضل أن نكتفي باعتبار اللف المغزلي كأنه سهم صغير مؤشر، يشير إلى أعلى للدلالة على «اللف المغزلي لأعلى»، وإلى أسفل للدلالة على «اللف المغزلي لأسفل». ومعظم الفيزيائيين المحترفين يميلون بالفعل إلى النظر إلى اللف المغزلي بهذه الطريقة. غير أن هذا اللجوء إلى الحجة التقليدية من أن «ميكانيكا الكم في منتهى الغرابة؛ ولا يُمكننا فهمها في ضوء رؤيتنا التقليدية للعالم» فيها مُبالغة كبيرة فيما يخصُّ اللف المغزلي، وكثير من المُتغيرات الميكانيكية الكمومية الأخرى كذلك.

الفيزياء الكلاسيكية هي الحالة الحدِّية للفيزياء الكمومية؛ فمع تزايُد نطاقات الأطوال أو اقتراب طول موجة دي بروي من الصفر، يتطوَّر السلوك الكمومي إلى السلوك الكلاسيكي. فلا يُوجَد انتقالٌ حادٌّ بين حالتَين. فكما أنه يستحيل عمليًّا أن تُشير إلى قوس قزح وتعين نقطة مُحددة يتحول عندها اللون الأحمر، مثلًا، إلى البرتقالي، تتحوَّل فيزياء الكم تدريجيًّا إلى السلوك الكلاسيكي مع زيادة حجم النظام (أو تفاعُله مع بيئته أو الاثنين معًا). ويُعد هذا تجسيدًا لمبدأ التناظُر البالِغ الأهمية في ميكانيكا الكم: السلوك الكلاسيكي ينبثِق من الكم. عِلاوة على ذلك، تُعتبر ميكانيكا الكم نظريةً تُمثل فيها الكميات القابلة للرصد — أي الكميات التي يمكن قياسها تجريبيًّا — جزءًا أساسيًّا من الإطار النظري. ومن ثَم، فهناك ارتباط جوهري بين التجارب التي نُجريها في مستوى الأطوال البشرية وعالَم الكم النانوي (ودون النانوي).

بخصوص اللف المغزلي، تُبرهن تجربتان أُجرِيتا قبل أكثر من قرنٍ بالأدلة الدامغة على وجودِ هذا الارتباط بين النطاق الماكروي والنطاق النانوي، أو — على نحوٍ مكافئ — بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم. فقد بيَّن أينشتاين والفيزيائي الهولندي فاندر يوهانس دي هاس أنَّ تغيير العزم المغناطيسي لعيِّنةٍ ما يتسبب في دورانها. ينشأ العزم المغناطيسي عن كمية الحركة الزاوية الكلية للإلكترونات، التي تشمل كلًّا من اللف المغزلي الأصيل وكمية الحركة (العزم) الناتجة عن المدار الذري الذي تُوجَد فيه الإلكترونات. ومن ثَم فإن أي تغيرٍ في اللف المغزلي الكمومي الميكانيكي يُترجَم إلى تغيُّرٍ في دوران الجسم يمكن رصدُه بوضوح. هل ينطبق الأمر ذاته بالعكس؟ هل يُمكننا، من خلال تدوير عينة ماكروسكوبية، أن نُغير مغنطتها؟ نعم، يمكننا ذلك. وقد بيَّن صامويل بارنيت صحةَ ذلك فعلًا قبل زمنٍ طويل، في نحو عام ١٩١٥، في ورقة بحثية نُشرت في دورية «فيزيكال ريفيو» تحت عنوان بليغ جدير بالإعجاب والثناء، وهو «المغنطة من خلال الدوران».

لقد قمتُ بهذا الالتفاف المُختصر إلى فيزياء اللف المغزلي لا بسبب دَورها في أحدثِ ما وصلت إليه تكنولوجيا النانو فحسب (كما سنرى أدناه)، ولكن أيضًا لتسليط الضوء مرةً أخرى على أنَّنا لا يجب أن نُعتبر النطاق النانوي، بما فيه فيزياء الكم، مجالًا عجيبًا يتناقض تمام التناقُض، بطريقةٍ ما، مع العالم اليومي الذي نألفُه أكثر. فالعالم النانوي يرتبط بالعالم الماكروي بطرقٍ شتَّى غير مُتوقعة.

تقوم الإلكترونيات على التحكُّم في الشحنة الإلكترونية؛ أما المجال الفرعي الأحدث منه إلى حدٍّ ما الذي انبثق منه، المعروف باسم الإلكترونيات المغزلية، فيُركِّز على الاستفادة

من اللف المغزلي، كما قد تُخمِّن من الاسم. ثمة ترابط وثيق بين الإلكترونيات المغزلية وتكنولوجيا النانو. وقد رأينا بالفعل أن تصغير الأجهزة قد دفع بتكنولوجيا السليكون إلى بلوغ نطاق النانو. بالمثل، تتطلَّب الأجهزة القائمة على الإلكترونيات المغزلية هي الأخرى تحكمًا ومعالجةً في نطاق النانو. وقد اعتمدَت إحدى قصص النجاح التجاري الكبرى في الإلكترونيات المغزلية على مدار العقد الأول من هذا القرن — وهي القرص الصلب الكامن في قلب آيبود شركة آبل وغيره من مشغلات إم بي٣ — على «شطائر» من المواد، يبلُغ سُمك طبقاتها بضعة نانومترات.

ترجع الزيادة الحادة في السعة التخزينية التي دعمت الانتشار السريع لمشغلات إم بي٣ — «١٠٠٠ أغنية في جيبك» بحسب تعبير شركة آبل وقتها — في الأساس إلى استغلال تأثيرٍ ذي علاقة باللف المغزلي يُعرَف باسم «المقاومة المغناطيسية العملاقة». اكتُشفت المقاومة المغناطيسية العملاقة من قِبل مجموعتَين بحثيتَين مُنفصلتَين في الثمانينيات عمِلتا بالتوازي؛ الأولى بقيادة ألبرت فير من جامعة باريس-سود بمدينة أورساي، والثانية بقيادة بيتر جرونبرج من مركز أبحاث يوليش، وتنطوي على استخدام اللفِّ المغزلي للتحكُّم في تدفُّق الإلكترونات عبر نبيطةٍ ما. يُولِّد اللف المغزلي مجالًا مغناطيسيًّا كما أنه يتحكَّم في مقاومة التيار الكهربي؛ فالإلكترونات ذات الحالة المغزلية لأعلى يُمكنها أن تمرَّ بسهولةٍ أكبر عبْر مادة لها نفس اتجاه اللف المغزلي الإلكتروني، مقارنةً بنظيرتها في الحالة المغزلية لأسفل. وهذا يعني أن تغيُّرات طفيفة في المغناطيسية يمكن أن ينتج عنها تغيُّرات كبيرة جدًّا في المقاومة الكهربية، ومن هنا يأتي مُسمَّى «المقاومة المغناطيسية العملاقة». صنَّع فير وجرونبرج عيناتٍ تكوَّنت من تكديس طبقات رقيقة للغاية (يقارب سُمكها نانومترات) من مادة فيرومغناطيسية (مواد قابلة للمغنطة) بالتبادل مع موادَّ يُطلَق عليها مواد فيرومغناطيسية مضادة (تحديدًا الحديد والكروم). أنت على درايةٍ تامة بالمواد الفيرومغناطيسية؛ فأي مغناطيس ثلاجة قد رأيته يومًا هو من مادة فيرومغناطيسية، حيث يصطف اللف المغزلي للإلكترونات في الاتجاه نفسه حتى تُصبح هناك مغنطة محصلة. أما في المواد الفيرومغناطيسية المُضادة، فتصطفُّ الإلكترونات في توازٍ عكسي. بعبارة أخرى، كل إلكترون في حالة مغزلية لأعلى له شريك حالته المغزلية لأسفل. وهذا يعني أنه على الرغم من أن المادة ما زالت تظهر خواصَّ مغناطيسية — لأن اللف المغزلي للإلكترونات يلعب دورًا محوريًّا هنا — فلا تُوجَد مغنطة محصلة.

تفاجأ الفريقان اللذان قادهما فير وجرونبرج على التوالي، حين رأوا أن التغيُّرات في المقاومة الكهربية للعينات استجابةً لمجال مغناطيسي ضعيف نسبيًّا، كانت أكبر بكثيرٍ من

المتوقَّع؛ وبهذا اكتشفوا تأثير المقاومة المغناطيسية العملاقة، التي نالا عنها جائزة نوبل في الفيزياء عام ٢٠٠٧. وفي مثالٍ نادر نسبيًّا لما يُعرَف بالنموذج الخطِّي للابتكار — حيث تُحفِّز أبحاث جوهرية تُجرى بدافع الفضول ومن دون هدفٍ واضح، مثل أبحاث فرت وجرونبرج، الابتكارَ التكنولوجي — أدرك ستيوارت باركن، أحد علماء آي بي إم في ألمادن، قيمةَ إمكانيات المقاومة المغناطيسية العملاقة في زيادة سعة الأقراص الصلبة. (لا يكون تحوُّل الاكتشافات الجوهرية إلى منتجات تجارية خطيًّا بهذا الشكل على نحوٍ شِبه دائم، وفي العموم يتضمَّن دورةً معقَّدة من التغذية الراجعة بين الأبحاث الأساسية والتطبيقية والهندسة والاعتبارات الاقتصادية.) في عام ١٩٩١، تقدَّم باركن وزملاؤه للحصول على براءة اختراعٍ لِما أسمَوه «صمام اللف المغزلي»، وهو جهاز يعتمِد كليةً على المقاومة المغناطيسية العملاقة. وقد كانت هذه التكنولوجيا هي الأساس لظهور أجهزة الآيبود، وكذلك سعات تخزين البيانات التي تُقاس بوحدة الجيجابايت (التي صارت عادية الآن) بدلًا من الميجابايت. وتكمُن تكنولوجيا النانو في قلب كل هذا.

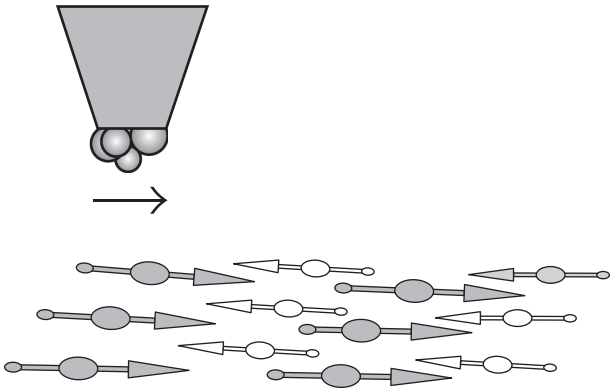
حدود حالات اللف المغزلي المفردة

انطوت أجهزة المقاومة المغناطيسية العملاقة التي تندرج ضمن النوعية التي صمَّمها وصنَّعها فير وجرونبرج وباركن وزملاؤهم (وكثير من المجموعات البحثية الأخرى التي ظهرت منذ ظهور أعمالهم الرائدة) على طبقاتٍ مغناطيسية نانوية، التي وبالرغم من كونها فائقة الرقة، فإنها تشتمل على عددٍ ضخم لا يُحصى من حالات اللف المغزلي؛ لأن مساحة النبائط كانت كبيرة نسبيًّا. وكما رأينا مرارًا خلال هذا الكتاب، كثيرًا ما تهتمُّ علوم النانو وتكنولوجيا النانو بالتحكُّم في المادة على مستوى الحدود الأساسية القصوى. فإلى أي مدًى إذن يُمكننا أن ندفع التحكُّم في اللف المغزلي؟

بالنظر إلى قُدرة مجهر المسبار الماسح على تبيُّن الذرات، هل يُمكنه أن يستبين حالات اللف المغزلي المفردة كذلك؟ هل من الممكن أن نستكشف حالة اللف المغزلي لذرةٍ معيَّنة؟ هل يُمكننا أن نُنفذ عمليات منطقية ونُصنع بوابات منطقية بناءً على التحكم في حالات اللف المغزلي المفردة؟ من المثير للاهتمام أن إجابة كل واحدٍ من هذه الأسئلة هي نعَم مُدوية! فمنذ وقتٍ طويل يعود إلى التسعينيات، وفي دراسةٍ بالغة الأثر، نجح رولاند فيزندانجر وفريقه بجامعة هامبورج في استبانة حالات اللف المغزلي وقياسها باستخدام المجهر النافذ الماسح. استغلَّ العلماء ما يُسمَّى بالعبور النفقي المُستقطب باللف المغزلي؛

حيث يعتمد تدفُّق الإلكترونات على مُحاذاة حالاتها المغزلية في نفس الاتجاه (أو عكس الاتجاه)، كما يحدُث مع المقاومة المغناطيسية العملاقة. في العبور النفقي المُستقطب باللف المغزلي، يُستخدَم رأس مغناطيسي لتصوير عينةٍ مغناطيسية. تتَّسِم إلكترونات العينة التي تتفق حالتها المغزلية مع حالة الرأس (أي لأعلى أو لأسفل) باحتماليةٍ أعلى للعبور النفقي؛ ومِن ثَم يكون التيار النفقي المقيس أعلى. وبعد عامَين فقط من أولى تجاربهما، حسَّن فيزنجاندر وزملاؤه قياساتهم لدرجةِ أنهم وصلوا باستبانة الحالات المغزلية إلى الحدود الذرية؛ إذ باتوا يرصدون الاختلافَ في الحالة المغزلية بين أيونات الحديد المختلفة في عينة من أكسيد الحديد.

استمرَّ فريق هامبورج في تحقيق تطوُّرات ملهمة في استبانة الحالات المغزلية والتحكُّم فيها على مرِّ العقود التي تلت هذه التجارب الرائدة. لكنهم لم يستأثروا وحدَهم باستكشاف حدود التحكم في اللف المغزلي في نطاق النانومتر ودونه. فمرةً أخرى، تمثل شركة آي بي إم فاعلًا أساسيًّا في هذا المجال. لقد خرجت تكنولوجيا صمام اللف المغزلي من معامل أبحاث ألمادن التابعة لشركة آي بي إم بفضل جهود باركن وفريقه، ولا غرو إذن في أن يكون لمعمل ألمادن وخريجيه تأثيرٌ كبير في هذا المجال. وينطبق هذا خصوصًا على الأبحاث على مستوى الذرات المفردة والحالات المغزلية المفردة؛ إذ عملت مجموعة أندرياس هاينرخ البحثية في مركز علوم النانو الكمومية في سيول وشركاؤهم (وأخص بالذكر منهم كريس لوتز بمعمل ألمادن التابع لشركة آي بي إم) على توسيع نطاق هذا المجال إلى حدٍّ كبير. فقد استخدموا تقنية تُسمَّى الرنين الإلكتروني المغزلي، التي لا تنطوي في صورتها التقليدية فقط على قياس أنظمةٍ تضمُّ ما يصل إلى ١٠١٠ حالات مغزلية، بل لا تضمُّ أيضًا أيَّ نوع من الاستبانة المكانية. أعاد هاينرخ وفريقه تعريفَ الرنين الإلكتروني المغزلي جذريًّا من خلال دمجه مع المجهر النافذ الماسح، بما يُتيح قياس الحالات المغزلية بدقةٍ ذرية. لكن كما رأينا على مدار هذا الكتاب، فإن المجهر النافذ الماسح أداةٌ للتصوير والمُعالجة أيضًا. (كان فريق هاينرخ (أثناء فترة عملِه في معامل ألمادن التابعة لشركة آي بي إم) مسئولًا عن فيديو «صبي مع ذرَّته» الذي صُنع بتقنية الحركة المُتقطعة وتناولناه في الفصل الثاني.) لذا يمكن تحريك الحالات المغزلية بدقَّةٍ ذرية أو (دون) جزيئية لدراسة كيفية تفاعلها. عِلاوة على ذلك، يمكن استخدام الرأس لضبط المجال المغناطيسي الموضعي المُطبَّق على نظام مغزلي (سواء كان ذرة أو جزيئًا) (انظر شكل ٤-٥).



شكل ٤-٥: تصوُّر فنان لكيفية تصوير المجهر النافذ الماسح للاتجاه المغزلي على السطح. وُظِّف الرأس باستخدام ذرة مغناطيسية أو جزيء أو عنقود مغناطيسيين لكي يكون له حالة مغزلية مُحدَّدة بدقة، تتفاعل بدَورها مع الحالات المغزلية للذرَّات السطحية.

الحوسبة الكمومية والكيوبتات (البتَّات الكمومية)

يُشكل اللف المغزلي الأساسَ الذي تقوم عليه عدة نماذج للحوسبة الكمومية، وفي تجربة رائدة أُجريت عام ٢٠١٩، نجح لوتز وهاينرخ وفريقاهما في تصنيع كيوبتات الذرات المفردة والتحكم فيها ومعالجتها. تتمثَّل الفكرة الأساسية للتجربة في أن البِتات الثنائية — وهي أنظمة بسيطة تأخذ حالة من حالتين — يمكن أن تكون إما في الحالة «٠» أو «١» كما هو معهود، ولكن يمكن في ميكانيكا الكم أن نحصُل على تراكُب، أو بلغةٍ أبسطَ مزيج من هاتَين الحالتَين. نُعبِّر عن الحالتين (باستخدام مجموعة رموز تعود إلى الفيزيائي بول ديراك) بـ $|0\rangle$ و$|1\rangle$، ويمكن، نظريًّا، الحصول على أي مزيج نريده من هاتين الحالتين، بشرط أن يكون مجموع احتمالات قياس الحالتين يُساوي ١ دائمًا. رياضيًّا، يمكن أن تُكتب الحالة الكمومية الإجمالية التي لدَينا، والتي نُعبِّر عنها عادةً بالحرف الإغريقي ψ، كما يلي:

$$|\psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$$

حيث c_1 وc_2 معاملان يدلان على مقدار مساهمة كلٍّ من الحالتَين الأساسيتَين $|0\rangle$ و$|1\rangle$ في الحالة الكمومية الكلية.

في أغلب الأحيان تُرسم صورة التراكب الكمومي وكأنه ظاهرية كمومية غريبة أخرى لا نظيرَ لها في العالم الحقيقي. وهذا أمرٌ مُحبِط لأنه في كل مرة ينقر وتر جيتار، على سبيل المثال، يكون تراكب الأنساق المُتعدِّدة لاهتزاز الوتر، وتُسمَّى نغماته التوافُقية، هو ما يُحدِّد الصوت الإجمالي الصادر. وهذه الظاهرة ليست مقتصِرة على آلات الجيتار فحسب بالطبع، أو الآلات الموسيقية الأخرى، بل هي الأساس الذي يقوم عليه قدرٌ كبير من العلوم والهندسة في العالم الكلاسيكي الماكروسكوبي. وفي النطاقات النانوية والكمومية، ينطوي التراكُب أيضًا على الجمع — أي المزج — بين موجاتٍ مختلفة.

استخدم فريق لوتز، بقيادة كاي يانج، اللفَّ المغزلي لذرات تيتانيوم مفردة مُمتزة (ملتصقة) على سطح مختار بعناية شديدة باعتباره التجسيد المادي للكيوبت. وبتسليط موجات راديو — موجات ميكروويف — عالية التردُّد من رأس مجهر نافذ ماسح، تمكنوا من التحكُّم في اتجاه اللف المغزلي الإجمالي و«ضبط» النظام على حالة التراكُب المحدَّدة التي كانوا يحتاجون إليها. تتَّسِم كيوبتات الذرات المنفردة أيضًا بحساسيةٍ بالِغة لبيئتها، بما في ذلك وجودُ ذرات تيتانيوم مجاورة. لذا استخدم يانج وزملاؤه المجهرَ النافذ الماسح لوضع الذرَّات في أماكنها بدقة، ما أتاح لهم بناء كيوبتات مُتشابكة؛ وهي نظام كمومي تعتمد فيه حالة كيوبت بالكلية على حالة الكيوبت الآخر بحيث يكون الارتباط بينهما مُعقدًا ومتداخلًا بشدة.

كل هذه الأمور العلمية مُشوِّقة وثورية للغاية، لكن مرة أخرى ما زالت المشكلة الصعبة الخاصة باختيار الركيزة والمعالجة المُرتبطة بها قائمة. ولفصل التشابُك بين الكيوبتات وبيئتها لأقصى مدًى مُمكن، تُمتز (تلصق) ذرات التيتانيوم على ركيزة مُتخصِّصة للغاية؛ وهي عبارة عن طبقةٍ رقيقة من أكسيد الماغنسيوم على عيِّنة من الفضة. مثل هذه الركيزة أو المنصَّة ليست مناسبة كثيرًا لتكنولوجيا قابلة للتوسُّع والتطوير (لكن الدافع وراء تجارب يانج وشركائه الرائعة لم يكن تحقيق إنجازٍ تكنولوجي من هذا النوع على أي حال).

في المُقابل، ركَّز فريق ميشيل سيمونز بجامعة نيو ساوث ويلز، وشركاؤهم على تنفيذ الكيوبتات وما يتعلَّق بها من هيكلة حاسوبية كمومية قائمة على السليكون. ومن خلال تنفيذٍ رائعٍ وعبقري لسلسلة من الابتكارات في تكنولوجيا النانو على مدى السنوات العشرين الماضية تقريبًا، دفع سيمونز وزملاؤه وشركاؤه تقنيةَ انتزاع الهيدروجين إلى أقصى مدًى لها. (انظر شكل ٣-٢ كأحد الأمثلة على هذا). فهم يستخدمون الانتزاعَ بواسطة

رأس مجهرٍ نافذ ماسح لإزالة ذرة واحدة من الهيدروجين لعمل مَوضع تفاعلي نشط على سطحٍ من السليكون مُغطًّى بالهيدروجين باستثناء هذا المَوضع، ومن ثَم يُعرَّض السطح لغازٍ تحتوي جزيئاته على الفوسفور. تلتصق هذه الجزيئات بالموضع النشط، ومن خلال التحكُّم المُلائم بمعايير هذا التعرُّض يمكن إدخال ذرة فوسفور مُفردة في موضعٍ ذري مُعيَّن مُحدَّد مسبقًا من خلال إزالة الهيدروجين. بعدَها يترسَّب السليكون فوقها لكي «يطمر» ذرة الفوسفور بحيث تُدمج داخل الشبكة البلورية.

كان الدافع الأساسي لهذه الابتكارات، ولمشروع جامعة نيو ساوث ويلز الشامل للكمبيوتر الكمومي، هو تصنيع بِنية حاسوبية كمومية تُعرَف بنموذج كين. بإيجاز، ينطوي نموذج كين على التحكُّم في اقتران اللف المغزلي النووي والإلكتروني في ذرات الفوسفور المدمجة في الشبكة البلورية للسليكون. تُشكِّل هذه الذرات الكيوبتات، وكما هو الحال مع ذرات التيتانيوم التي استخدمها فريق آي بي إم في ألمادن، يمكن ضبط درجة الاقتران والتشابك بعناية من خلال التحكُّم الدقيق في المسافات بين ذرات الفوسفور الفردية المَطمورة في الشبكة البلورية للسليكون.

تُعتبر صناعة كمبيوترٍ كمومي في الحالة الصلبة قائم على السليكون هدفًا في غاية الصعوبة. رغم ذلك، ثمَّة شركة انبثقت من مبادرة جامعة نيو ساوث ويلز، وهي شركة «سليكون كوانتم كومبيوتنج»، هدفها الأسمى على المدى الطويل أن تُتيح «الوصول إلى حلول حاسوبية كمومية مُفيدة لقطاع عريض من جمهور المستخدمين ولأغراض عديدة بحلول منتصف ثلاثينيات القرن الحالي». وإذا استطاعت «سليكون كوانتم كومبيوتنج» الالتزام بهذا المُخطَّط الزمني، فستكون الحوسبة الكمومية التجارية القائمة على السليكون في مُتناول أيدينا في وقتٍ أقرب كثيرًا مما تصوَّره كثير من أنصارها يومًا.

كان هذا الفصل غنيًّا جدًّا بمُقاربات تنازُلية لا تعتمد على عناصر حيوية، ومُصمَّمة بعناية لتناول تكنولوجيا النانو. وفي الفصل المُقبل، سنتدارك الأمر ونعيد التوازن، ونرى كيف أن الطبيعة تُسخِّر العشوائية في نطاق النانو لتشغيل آلات جزيئية.

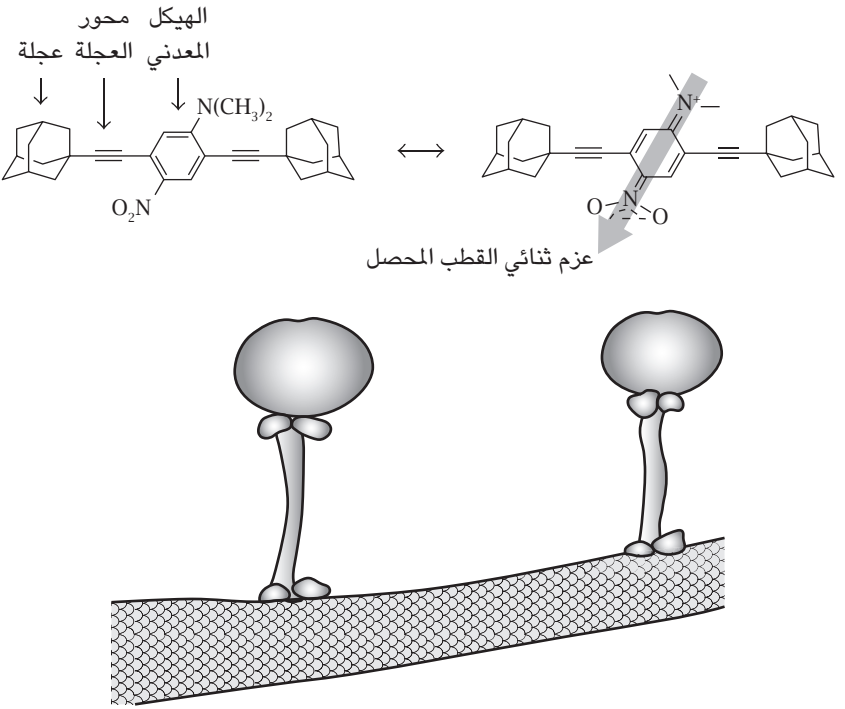
الفصل الخامس

الآلات النانوية

الزمان: عصر يوم ٢٨ أبريل ٢٠١٧. فريق نمساوي أمريكي مُشترك يضم علماءَ النانو من جامعة جراتس وجامعة رايس بمدينة هيوستن، فاز لتوِّه بأول سباق للسيارات النانوية في العالم؛ وهو سباق الجائزة الكبرى على النطاق النانوي ضمَّ ستة فرق دولية. حقَّقت سيارتهم النانوية (انظر شكل ٥-١) سرعةً قياسية تقدَّر بمائة نانومتر في الساعة في المتوسط، لكنها كانت تصِل أحيانًا إلى سرعاتٍ مُذهلة بلغت ٣٠٠ نانومتر في الساعة. (رغم أن هذا مُثيرٌ للإعجاب من وجهة نظر التحكُّم التنازُلي الموجَّه من أعلى في المسارات الجزيئية، فربما يجدُر بنا أن نذكر أنه إذا سارت إحدى سيارات سباق «فورمولا ١» بهذه السرعة، فستستغرق نحو ٦٠٠ ألف عام لإكمال دورة واحدة في مضمار سباق الجائزة الكبرى).

قامت كل مجموعة بحثية من المجموعات المُتنافسة بتصميم وتركيب سيارة نانوية من جزيء مفرد، دارت بعد ذلك حول حلبة سباق — وكانت عبارة عن سطحٍ معدني — يقودها رأس مجهر نافذ. ولكن على عكس أمثلة التحكُّم في الذرات والجزيئات التي رأيناها في الفصول السابقة، كان دفع الجزيء بطرف رأس المجهر النافذ الماسح محظورًا تمامًا بموجب قواعد السباق. وبدلًا من ذلك، كان ينبغي دفع الجزيء دون احتكاك ميكانيكي مباشر، أو، لمزيد من الدقة التقنية، دون احتكاك كيميوميكانيكي مباشر.

كان هناك مصدران رئيسان «للوقود» الخاص بالسيارة النانوية، وكان يُمكنهما نظريًّا أن يعملا جنبًا إلى جنب. أولًا، كان يمكن استخدام ضخ إلكترونات من طرف رأس المجهر النافذ الماسح لحثِّ عملية الانتشار الجزيئي من خلال عمليةٍ تُعرَف باسم العبور النفقي غير المرن. تنطوي هذه العملية على نفس تأثير النفق الميكانيكي الكمومي الذي يقوم عليه عمل المجهر النافذ الماسح، باستثناء أنه بدلًا من نفاذ الإلكترونات نفقيًّا دون



شكل ٥-١: أعلى الصورة: التركيب الكيميائي لسيارة السباق الثنائية القطب، الفائزة بسباق السيارات النانوية. تتكوَّن العجلات من جزيئات مُركَّب الأدامانتان ($C_{10}H_{16}$). أسفل الصورة: تصوُّر فني لشكل الكينسين، وهو مُحرك بروتيني.

فقدان الطاقة، وهو الأمر الذي يقف وراء وجود الجزء الأكبر من التيار النفقي، تستحث الإلكترونات اهتزازاتٍ جزيئية ومن ثَمَّ تفقد طاقة؛ ولهذا السبب تُوصَف العملية بأنها غير مرِنة. عوضًا عن ذلك، أو بالتوازي معه، يمكن أن تُقاد السيارة من خلال تأثير المجال الكهربي المتولِّد من رأس المجهر النافذ الماسح. وبفرْض أن عزم ثنائي القطب لهذا الجزيء كبير، أو أن شحنته الإلكترونية ذات قابلية عالية للاستقطاب؛ أي يمكن أن ينبعِج شكلها بسهولة نتيجةً للمجال الكهربي، فستستجيب للمجال الكهربي العالي المولد من الرأس.

أنهى الفريق النمساوي الأمريكي السباقَ في ساعةٍ واحدة و٣٣ دقيقة، متفوقًا بكثير على منافسيه، الذين خرج كثيرٌ منهم من السباق قبل أن يصلوا إلى خط النهاية بمسافة كبيرة. كان نجاحهم نتيجةً لكلٍّ من مبادئ التصميم الذكية للغاية التي اتبعها تصميم السيارة النانوية واستراتيجيات التركيب المرتبطة بها، التي أخذت بعين الاعتبار تفاعلات الجزيء مع السطح، التي كان يجب استغلالها والتغلُّب عليها، وكذا طريقتهم الجديدة في التحكم في الجزيئات من خلال المجهر النافذ الماسح، التي اعتمدت على قياسات التيار النفقي فحسب، مُتجنِّبين بذلك الوقتَ الطويل للغاية الذي تستهلِكه عملية الحصول على الصور بالمجهر التي تتم بين عمليات التحكم والمعالجة.

رغم ما قد تبعث عليه السيارة النانوية الفائزة من انبهار، فإنها لا تزال تُقاد كليةً بطريقة التحكم التنازلي الموجَّه من أعلى لأسفل؛ إذ يتولَّى البشر توجيهها في كل خطوةٍ تقريبًا على مدى الطريق. فالسيارة النانوية إن تُركت لتتحرك وحدَها، ستنتشر عشوائيًّا على السطح، دون مَيل أو تفضيل لاتجاهٍ مُعيَّن. غير أن العالم الطبيعي يعجُّ بالآلات الجزيئية التي تتحرَّك في اتجاه أحادي دون الحاجة إلى عقل خارجي يوجهها؛ فبينما تقرأ هذا، تعج كل خلية في جسمك بآلات جزيئية نانوية. لقد سخَّرت الطبيعة تكنولوجيا النانو منذ بدء الحياة على الأرض تقريبًا لأداء كثير من الوظائف الأساسية، وتتجاوز آلاتها النانوية، بتطوُّرها وتعقيدها ودقَّتها كلَّ ما يستطيع العلماء (حاليًّا) إنشاءه بكثير.

آلات الطبيعة النانوية

يظهر بجانب السيارة النانوية التي تعمل بتقنية المجهر النافذ الماسح في شكل ٥-١ مُحرِّك جزيئي حيوي من عائلة الكينسين، يفوق أشباهه الاصطناعية كثيرًا من جوانبَ شتَّى. تتميز مُحركات الكينسين، وغيرها من المحركات البروتينية المُماثلة الأخرى، بالتحكُّم الذاتي الكامل، والحركة الأحادية الاتجاه، والسرعة الهائلة (تصل في العادة إلى ٢٠٠٠ نانومتر/ثانية)، وكفاءتها الملحوظة من حيث الطاقة؛ ولذا تلعب دورًا أساسيًّا في مجموعةٍ كبيرة من العمليات الضرورية في الخلايا، بما في ذلك الحركة، والانقسام، ونقل التراكيب دون الخلوية، مثل الحويصلات والعُضيات والنواقل العصبية. (لاحظ أن الكينسين ليس له شكلٌ واحد؛ إذ يُوجَد على الأقل ٤٥ نوعًا مختلفًا في البشر وحدَهم.) تدعم تلك العمليات بدورها بعضَ الأمور الأساسية لوجودنا وتدفعها. وليس من المبالَغة في شيءٍ القول بأننا لولا المحركات البروتينية، لما كان لدينا قدرة على التحرك؛ فهي تكمن في صميم حركة

العضلات. بل إننا ما كنا لنُوجَد هنا من الأساس لولا المُحركات البروتينية؛ ففي غياب الكينسين وأشباهه لم تكن خلايانا لتنمو، ولفشلنا في بلوغ مرحلة النمو الجنيني حتى. وحين تُصاب المحركات البروتينية في البشر بقصور، يكون لذلك عواقبُ صحية خطيرة؛ فقد وجِد ارتباط بين السرطان واضطرابات التنَكُّس العصبي ومرض تكيُّسات الكلى وبين القصور في أداء المُحركات الجزيئية الحيوية. وهكذا فالمحركات البروتينية هي مُحركات الحياة إلى حدٍّ بعيد.

تبلُغ أبعاد الوحدة الحركية للكينسين نحو ٨ نانومترات تقريبًا، ويحول الطاقة الكيميائية إلى حركة ميكانيكية (مثل جميع المحركات البروتينية الأخرى)؛ إذ ينقل حمولته الجزيئية عبر مساراتٍ تُعرَف بالأنيبيبات الدقيقة. وعلى ذلك، قد يكون تشبيه الكينسين بقطار نانوي بدلًا من سيارة نانوية، هو أفضل وصفٍ له، لكن أوجُه الشبَه تنتهي عند هذا الحد. فمِن المُدهش أن الكينسين لا يتدحرج، بل يَمشي عبر مسارات الأنيبيبات الدقيقة. وبالرغم من أن هذا البروتين حديثُ الاكتشاف؛ إذ اكتُشف في عام ١٩٨٥ على يد رون فال (وكان يعمل في معمل العلوم البحرية في ماساتشوستس آنذاك) وتوماس ريز (بجامعة كونيتيكت) ومايكل شيتز (بجامعة ستانفورد)، فقد استغرق الأمر نحو ٢٠ عامًا أخرى لفهم كيفية سيره عبر مساره. في الواقع، من الأدق أن نَصِف حركة الكينسين بالعَرَج، وإن كانت عُرْجةً سريعة للغاية (مقارنةً بسرعة حركة السيارات النانوية) بسرعة ٢٠٠٠ نانومتر/ثانية، إلا أنها تظلُّ حركةً عرجاء على أي حال.

وبالرغم من تباين التفاصيل الدقيقة بين أفراد عائلة الكينسين، فإن البنية العامة لها تتكوَّن من سلسلتَين جزيئيتَين ثقيلتَين تؤلفان معًا زوجًا واحدًا (أي دايمرًا جزيئيًّا أو جزيئًا ثنائيَّ الوحدة)، وتتَّصلان بدورهما بسلسلتَين جزيئيتَين خفيفتَين كلٌّ منها مُخصصة للارتباط بحمولات مختلفة. تتكوَّن كل سلسلة ثقيلة من رأس بروتيني كروي — الوحدة الحركية — يتصل بـ «ساق» تنتهي بمجموعة كربوكسيل، مما يسمح بارتباط سلسلة خفيفة بها. إن هذا الوصف الموجز لا يقترب من إبراز تعقيد هذه البنية بأي حال؛ فهي مِثالٌ مُذهل للغاية للهندسة البيولوجية النانوية التصاعدية الطبيعية. ومحور اهتمامنا في سياق هذا الكتاب هو الوحدة الحركية.

يَتغيَّر تشكيل الوحدة الحركية؛ أي تتغيَّر وضعيات روابطها الكيميائية، بفضل الطاقة التي يُوفِّرها أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، وذلك من خلال ارتباط الأدينوسين ثلاثي الفوسفات بها، وما يتبع ذلك من تحلُّله مائيًّا إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP).

(تحوُّل الـ ATP إلى ADP بهذه الطريقة ليس حكرًا على الكينسين والمُحرِّكات البروتينية الأخرى؛ بل هو آلية تحوُّل الطاقة في جميع الخلايا الحية.) وهذا التغير في تشكيل الوحدة الحركية هو ما يحفز في النهاية حركة مُعقَّد الكينسين بأكمله وبحمولته. لكن على عكس السيارة النانوية، لا تُوجَد قوًى خارجية تتدخَّل لتُحرِّك الكينسين في اتجاهٍ واحد. فلماذا إذن يتحرك في اتجاهٍ واحد فقط؟ وكيف؟

إن الحركة العشوائية التصادُفية موجودة في كل مكان في الطبيعة. فجزيئات الهواء من حولك في الغرفة «تتخبط» في مساراتها مليارات المرات كل ثانية نتيجةً للتصادُمات بين الجزيئات. ورغم أنه من المُمكن نظريًّا أن ينتج عن كل تلك التصادمات حركةٌ تلازُمية لجزيئات الغاز بحيث تسلك جميعًا الاتجاه نفسه، فإن حدوث ذلك مُستبعَد تمامًا بمقدار يتجاوز إجمالي عدد الذرات في الكون المنظور بكثير. وعلى غرار فكرة انتشار العطر في الفصل السابق، فإن حالة اتزان النظام هي أن تتَّبع جزيئات الهواء مساراتٍ عشوائية. بالمِثل، تتَّبع الجزيئات مساراتٍ عشوائية في الحالة السائلة (ومنها، على وجه الخصوص، البيئة الحية داخل الخلايا الحية)، مما ينشأ عنه، على سبيل المثال، حركةٌ براونية لجسيمات/كائنات أكبر حجمًا تصطدم باستمرار بالوسط المحيط. فالطبيعة الفيزيائية والكيميائية على الصعيد النانوي تعني أن البيئة داخل الخلية بيئة دبقة، ولزجة، ومُضطربة: دبقة بسبب انتشار قوى فان دير فالز وقوى التشتُّت، مما يؤدي إلى تجاذب بين الجزيئات؛ ولزجة لأن اللزوجة — وهي مقياس مقاومة سائلٍ ما للانسياب — لها تأثير مُهيمن في نطاق الأطوال النانومترية؛ ومضطربة بسبب التصادم المستمر للجزيئات المُحيطة. وقد وصَّف الفيزيائي رايموند دين أستوميان الحياة على المستوى النانوي توصيفًا خالدًا؛ إذ أشار إلى أن الآلات الجزيئية يجب أن «تسبح في العسل وتمشي وسط إعصار».

كيف إذن للكينسين — أو أي مُحرك جزيئي آخر — أن يمشي في اتجاهٍ واحد؟ لماذا لا تتبع المُحركات الجزيئية مسارًا عشوائيًّا، كسائر الجزيئات الأخرى، بالنظر إلى البيئة المُضطربة التي يجب أن تعمل فيها؟ لم تتَّضح العمليات الفيزيائية الحيوية المُحددة التي تدعم قدرة الكينسين على التحرك في اتجاه واحد على نحوٍ تام بعد، ولكن ثمة مدرسة فكرية تركِّز على نموذج مهم للحركة الموجهة في مجموعة كبيرة من العمليات الجزيئية الحيوية؛ وهو نموذج السقَّاطة البراونية. تعمل هذه الآلية على تصحيح الحركة العشوائية (البراونية) بحيث تنتج محصلة إزاحة أو قوة في اتجاهٍ معيَّن. يُستغل التجاذُب بين

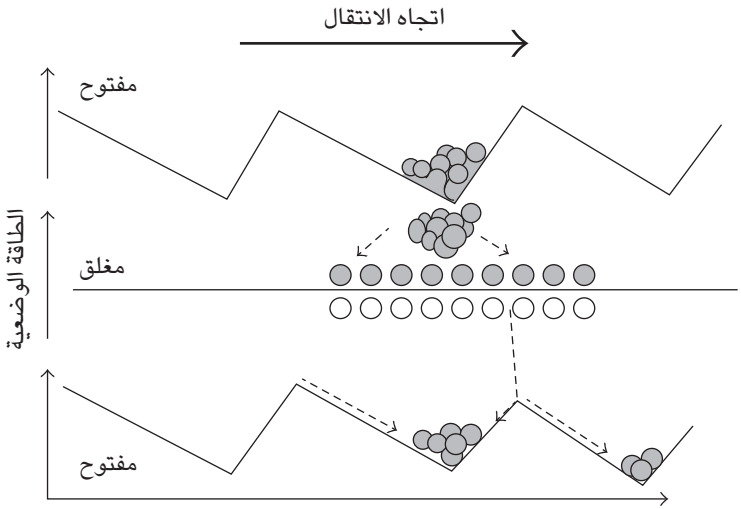
الجزيئي القصير المدى لتقييد النظام — سواء كان هذا النظام بروتينًا مُحركًا أو إنزيمًا أو أيًّا من المُكوِّنات الجزيئية الحيوية المُتنوِّعة الأخرى — بعدما تدفعه التقلبات العشوائية في الاتجاه الصحيح. وقد وصف جورج أوستر، عالم الأحياء الرياضية الأمريكي، السقَّاطات البراونية بأنها مُحركات داروينية للسبب الوجيه التالي:

> بمعنًى أوسع، لا يمكن اعتبار فكرة توليد النظام من خلال «الاختيار» من بين التقلبات العشوائية فكرةً جديدة بأي حال؛ فهي الفكرة الأساسية في نظرية داروين للانتقاء الطبيعي. وفي سياق البروتينات المحرِّكة، يكون «النظام» المولَّد قوة ذات اتجاه، وعوامل الانتقاء هي التجاذبات بين الجزيئات.

يمثل شكل ٥-٢ مُخططًا توضيحيًّا لعمل جهد السقاطة. تُحتجز مجموعة من الجزيئات في البداية في بئر جهد، يتم التحكم في عُمقه وشكله من خلال بنية البيئة الكيميائية الحيوية وطاقتها. عند إيقاف الجهد، يُصبح لدى الجزيئات الحرية للانتشار بعيدًا عن موقعها الأصلي. لكن إن أعَدْنا تشغيل بئر الجهد مرةً أخرى خلال مدةٍ زمنية قصيرة كفاية بحيث لا يُتاح للجزيئات الوقت الكافي للانتشار بصورةٍ ملحوظة، فسوف تتبع الجزيئات ميل «منحدر» بئر الجهد وسيُحتجز بعضها في البئر الموجودة على يَمينه. ومع تكرار هذه العملية مرارًا، تكون المُحصِّلة النهائية تولُّد حركة للجزيئات نحو اليمين.

أما بروتين الكينسين، وهو آلة جزيئية منفردة، فلا يختلف مبدأ عملِه عن ذلك كثيرًا. تحتوي كل وحدةٍ حركية من الكينسين على موقعَي ارتباط؛ أحدهما للأنيبيبات الدقيقة والآخر لمركَّب أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP). بالإضافة إلى ذلك، في كل خطوة يظلُّ أحد الرأسين متصلًا بالأنيبيبات الدقيقة بينما يتحرك الرأس الآخر؛ وفي الخطوة التالية، تُعكس الأدوار بحيث يتحرك المحرك الجزيئي إلى الأمام من خلال آلية التبديل من يدٍ لأخرى. (تُشبه قليلًا تسلُّق السلَّم بيديك فقط، حيث لا يمكن أن ترفع كلتا يدَيك معًا وإلا فستسقط.) وكما ذُكر سابقًا، يؤدي ارتباط مركب ATP إلى تغيُّر في التشكيل، وهذا بدوره يؤدي إلى تحرُّر الوحدة الحركية المتأخرة، التي بدورها تتأرجح إلى الأمام وتستخدم الطاقة الحرارية (الحركة البراونية) لاستكشاف المكان والعثور على أقل وضعية ممكنة للارتباط بالأنيبيبات الدقيقة من حيث الطاقة. ثم تبدأ الدورة من جديد، وتتأرجح الوحدة الحركية المتأخرة الأخرى إلى الأمام من أجل الخطوة التالية.

يا لها من استراتيجية دقيقة إلى حدٍّ استثنائي! أن تُسخَّر العشوائية والتقلبات لإنتاج حركة مُوجَّهة. ونظرًا لأن التطور قد ضبط المُحرِّكات الجزيئية بدقة على مدار آلاف السنين



شكل ٥-٢: المبدأ الأساسي لعمل السقَّاطات البراونية. بإيقاف وتشغيل بئر الجهد دوريًّا، يمكن الحصول على حركةٍ في اتجاهٍ مُعيَّن. تتحرك الجزيئات في اتجاه تناقُص الجهد، تمامًا كما تتدحرج الكرة عبر تلَّة.

حتى أصبحت فعَّالة للغاية في تحويل الطاقة الكيميائية الحيوية إلى طاقة ميكانيكية، فقد أدرك علماء تكنولوجيا النانو أن البدء من الصفر في تصميم آلات نانوية لنقل الحمولات الجزيئية يُشبه كثيرًا إعادةَ اختراع العجلة. لذلك، بُذلت جهود مضنية لسرقة أفكار من الطبيعة لدمج الآلات الجزيئية في الأنظمة النانوية الاصطناعية.

المحاكاة الحيوية والسرقة الحيوية في تكنولوجيا النانو

على حدٍّ علمي، صيغ مصطلح السرقة الحيوية من قِبل الفيزيائي (وعالم النانو) ريتشارد جونز من جامعة مانشستر. يفرِّق جونز بين المحاكاة الحيوية والسرقة الحيوية في تكنولوجيا النانو؛ فالأولى تُستوحى من مبادئ الطبيعة في التصميم على الصعيد النانوي، بينما الأخرى تكون بالسرقة من العالَم الطبيعي بالجملة بلا استحياء، وبها تُستجلَب المحركات الجزيئية (أو تؤخَذ منها مكونات) بكل تفاصيلها وتوضع داخل أنظمةٍ نانوية

اصطناعية أو تخليقية. وفيما يخصُّ الآلات الجزيئية، يكون علماء تكنولوجيا النانو مُقلِّدين ولصوصًا كذلك.

تُدمج المحركات الحيوية الجزيئية كالكينسين والدَّاينين (وهو بروتين مُحرك يمشي على طول الأنيبيبات الدقيقة في الاتجاه المعاكس للكينسين)، والميوسين (وهو البروتين المسئول عن انقباض العضلات) مع مجموعة متنوعة من المحركات والمستشعرات الاصطناعية. لكن الجمع بين التكنولوجيا الحيوية الطبيعية والاصطناعية يُشكل تحديًا هائلًا، رغم التقدُّم المذهل في تصنيع الأهداب الاصطناعية على سبيل المثال. تتألف الأهداب من مجموعةٍ من الأنيبيبات الدقيقة، وتلعب دورًا حيويًّا في فسيولوجيا جسم الإنسان وتُوجَد في الرئتين والجهاز التنفُّسي والأذن الوسطى والكلى والعين والحيوانات المنوية (حيث يعتبر ذيل الحيوانات المنوية هدبًا مُعدَّلًا). تتمتَّع الأهداب المتحركة بحركة موجية إيقاعية (أو «ضربات»)، وفي سياق الجهاز التنفُّسي، تكون مسئولة عن الحفاظ على الممرَّات الهوائية خاليةً من المخاط والأقذار. ولكن استغلال المبادئ البيولوجية التي تحكم سلوك الأهداب مُهم، ليس من وجهة النظر الطبية فحسب. فمثل هذه المحاكاة الحيوية تُتيح لنا أيضًا تصميمَ ما بات يُعرف الآن باسم المادة النشطة؛ وهي نظام أو مادة تتألَّف من عددٍ كبير من العوامل النشطة، تعمل خارج نطاق التوازن الحراري لبذل قوًى ميكانيكية.

في عام ٢٠١٨، صنَّع فريقٌ من الباحثين في جامعة هوكايدو ومعهد طوكيو للتكنولوجيا بقيادة أكيرا كاكوجو أهدابًا اصطناعية عن طريق تثبيت وحداتٍ تتكوَّن من الكينسين مع الأنيبيبات الدقيقة على حبيبات البوليسترين، ووضعها جميعًا داخل خليةِ تدفُّقٍ يمكن أن تُمرَّر خلالها موادُّ كيميائية مختلفة. عند تعريض الكينسين لمحلولٍ من أدينوسين ثلاثي الفوسفات، أظهرت الأهداب الاصطناعية حركةً موجية إيقاعية أمكن تعديل تردُّدها من خلال تغيير أيٍّ من المُتغيرات التجريبية، ومنها كثافة الكينسين على امتداد الأنيبيبات وطولها. وعلى الرغم من أن تكنولوجيا النانو الحيوية لم تصل بعدُ إلى النقطة التي يمكن فيها استغلال مثل هذه التراكيب في التطبيقات الطبية الحيوية مثل الأطراف الاصطناعية، فإن الأسس التي تقوم عليها قيد الإرساء بالتأكيد.

يمكن استخدام الآلات النانوية الحيوية أيضًا في تطبيقات الاستشعار. وعلى الرغم من التركيز القوي في أحدث تقنيات الاستشعار الحيوي على تكنولوجيا الموائع الميكروية والنانوية؛ حيث تُضخ حجوم صغيرة جدًّا من المواد المُراد تحليلها داخل مصفوفاتٍ من الشعيرات أو المسام النانوية، يُتبع نهج بديل يتمثل في إدخال ما يُعرَف بالمُستشعرات

النانوية الذكية داخل العينة. ويُطلَق على مجموعة من هذه المُستشعرات الغبار الذكي، وهي أقربُ ما توصَّلت إليه تكنولوجيا النانو من العنصر الأساسي في أدب الخيال العلمي عن تكنولوجيا النانو، ألا وهو: الروبوتات النانوية.

يتميز الروبوت النانوي في الخيال العلمي بالذكاء، والطاقة الذاتية، والوعي النشط، وعادةً ما تُشبه صورته المُتخيَّلة الغواصة «نوتيلوس» (من رواية «عشرون ألف فرسخ تحت الماء» لجول فيرن) ولكن مُصغَّرة؛ وهي غواصة نانوية تُحرك نفسها عبر مجرى الدم، وتصعق أيَّ شيءٍ غير طبيعي تجده. غير أن الطبيعة لم تنتج أيَّ شيءٍ يُشبه الغواصة المُصغَّرة؛ أي نموذج مُصغَّر لتكنولوجيا ماكروسكوبية؛ لأن المبادئ الفيزيائية والكيميائية والهندسية اللازمة للحركة بكفاءة في المستوى النانوي (أو الميكروي أو كليهما) تختلف كثيرًا عن تلك الموجودة في عالَمِنا اليومي. فالآلات النانوية لا بد أن تسبح في العسل وتمشي وسط إعصار، وهذه البيئة تعني أن تطبيق المبادئ الهندسية التقليدية في حيِّزٍ مصغر ببساطة لن يكون مُجديًا. غير أنه من الممكن بالتأكيد استخراج الآلات الحيوية الجزيئية واستخدامها في الأنظمة النانوية الاصطناعية غير العضوية لتطوير نُسَخ مُصغَّرة من التكنولوجيا الماكروسكوبية. في عام ٢٠٠٠ تقريبًا، صنَّع فريق من الباحثين في جامعة كورنيل جهازًا ميكانيكيًّا نانويًّا هجينًا يعمل بواسطة مُحرك جزيئي حيوي (إنزيم يُعرف باسم F_1-ATPase) يدفع مروحة دفع نانوية.

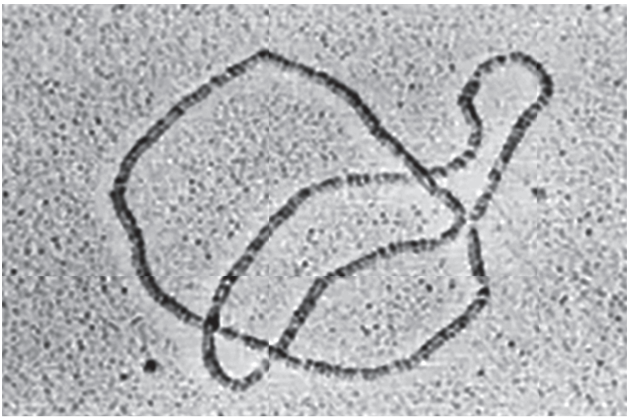
وفي حين ستظلُّ نوعية الروبوتات النانوية التي يرسمها الخيال العلمي خيالًا مدةً ليست بقليلة — بما فيها النانوجينات في مسلسل «دكتور هُو»، والروبوتات النانوية في «ستار تريك»، وسرب الروبوتات النانوية المرعب في رواية «الفريسة» لمايكل كرايتون، وما يُعرَف بالهلام الرمادي المُستوحى من كتابات إريك كيه دريكسلر — فإن عددًا من المجموعات البحثية تعمل حاليًّا على تطوير عناصرَ نانوية ذاتية التحكم. ففي عام ٢٠١٩، طوَّر ثورستن فيشر وأشوتوش أجاروال وهنري هيس، من جامعة فلوريدا، مستشعرًا حيويًّا قائمًا على الغبار الذكي، استُغِل فيه الكينسين لنقل الأنيبيبات الدقيقة المعرَّضة لمادة مستهدفة بالتحليل بين مواقع مختلفة. وهكذا صار بالإمكان تنفيذ عمليتي الوسم (باستخدام جزيئات فلورية تعمل عمل المؤشرات) والكشف باعتبارها عمليات منفصلة مكانيًّا. وإن كان هذا النوع من التكنولوجيا لا يزال في مراحله الأولى، إلا أنه يدمج الآلات الحيوية الميكروية والنانوية مع الهندسة الاصطناعية غير العضوية، ومن المُرجَّح جدًّا أن يلعب دورًا حاسمًا مع ازدهار تكنولوجيا النانو في القرن الحادي والعشرين.

تصميم الآلات النانوية الاصطناعية: الطوبولوجيا الكيميائية

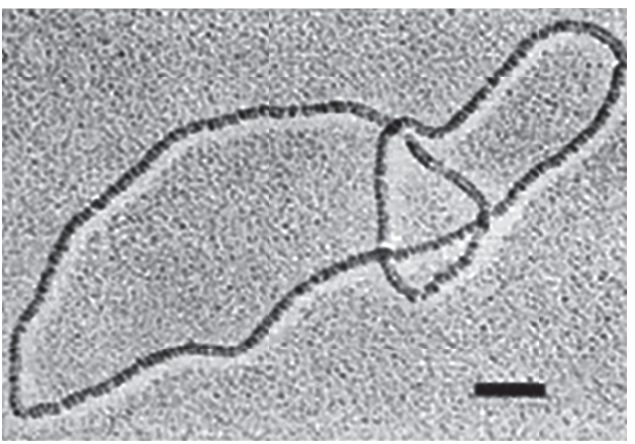
تميل أمثلة الآلات الحيوية التي وقع عليها اختياري حتى الآن نحو جانب السرقة الحيوية من المجال الهندسي. ولكن واكب ذلك تقدُّم ملحوظ في تنفيذ الآلات النانوية الاصطناعية وتحويلها إلى واقعٍ ملموس، لتجمع بين التشغيل الخارجي (كما في السيارة النانوية) وذاتية الحركة. وعلى وجه التحديد، حصل كلٌّ من جان-بيير سوفاج، وفريزر ستودارد، وبرنارد (بن) إل فيرينجا على جائزة نوبل في الكيمياء عام ٢٠١٦ عن عملهم الرائد في تصميم الآلات الجزيئية وتخليقها وتطويرها. وبحسب وصف الأكاديمية الملكية السويدية للعلوم في معرض الديباجة العلمية لجائزة الكيمياء لعام ٢٠١٦، كان هناك تطوُّران أساسيَّان، ومتداخلان إلى حدٍّ كبير، أُسِّسا لتنفيذ وتطوير الآلات الجزيئية الاصطناعية وهما: الطوبولوجيا الكيميائية واستغلال الروابط المتصاوغة.

تلعب الطوبولوجيا — دراسة الأجسام التي تتعرَّض للتمدُّد، أو اللَّي، أو التجعُّد، أو التعقُّد أو كل ذلك — دورًا مهمًّا إلى حدٍّ استثنائي في الكيمياء الحيوية وتُعتبر مصدر إلهام رئيسًا لأعمال سوفاج وستودارد وفيرينجا والفريق البحثي التابع لكلٍّ منهم. تنتشر العُقد في شتَّى أرجاء الأنظمة البيولوجية. ويوضِّح شكل ٥-٣ مثالًا لبنيةٍ معقودة للحمض النووي صُنعت بواسطةِ ما يُعرف بالتوبوإيزوميراز، وهي إنزيمات وُصفت بسحرة عالم الجزيئات الحيوية؛ لأنها تسمح لشرائط الحمض النووي ولَوالِبه المزدوجة بالمرور بعضها عبر بعض من خلال كسر الروابط وإعادة بنائها، أو ربط/فك العُقد على طول السلاسل. (يُعتقد أن خلل إنزيمات التوبوإيزوميراز يُسهم في أشكالٍ متنوعة من السرطان.)

أدرك سوفاج وستودارد إمكانية استغلال الطوبولوجيا الكيميائية لتخليق أنظمةٍ جزيئية تحتوي على مكونات متشابكة، يُتحكَّم في مواضعها النسبية عن طريق مُحفِّزات ضوئية كيميائية، أو كهربية كيميائية، أو ميكانيكية كيميائية أو جميعهم معًا. ستكون لدى هذه الأنظمة جميعُ المكونات المطلوبة للآلات النانوية، فلا تقتصر على مُحاكاة عمل المحركات النانوية الموجودة طبيعيًّا مثل الكينسين، بل ستُحاكي كذلك مجموعةً أوسع كثيرًا من الآلات الحيوية الجزيئية. أسَّس سوفاج وزملاؤه في المركز الوطني للبحث العلمي بجامعة لويس باستور بستراسبورج في عام ١٩٨٣ تقنيةً جديدة سمحت بتخليقٍ أسهلَ كثيرًا لفئتين مُهمتَين من الجزيئات ذات الوحدات المتشابكة والمتحرِّكة، وهما الكاتينانات والروتاكسانات.



(أ)

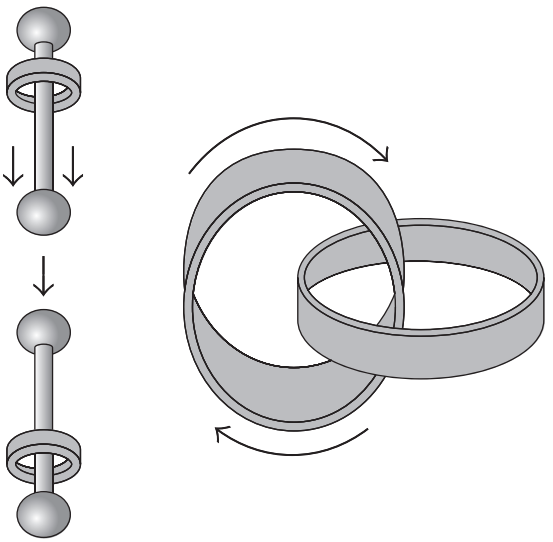


(ب)

شكل ٥-٣: جزيء حمض نووي معقود.

كما يظهر في شكل ٥-٤، تتألَّف الكاتينانات من حلقتَين متداخلتَين، بينما الروتاكسانات هي في الأساس وحدة جزيئية من عجلةٍ ومحور؛ حيث تُحتجز العجلة على المحور بواسطة سِدادتَين كبيرتَين في كل طرف. ولكن بالإضافة إلى قدرة العجلة على

الدوران، يمكن للعجلة — أو لاستخدام المصطلح الكيميائي الصحيح، الماكروسايكل (أي الحلقة الكبيرة) — التحرك ذهابًا وإيابًا على طول المحور.



شكل ٥-٤: مُخططات توضيحية للفئتَين الجزيئيتَين المعروفتَين بالروتاكسانات (على اليسار) والكاتينانات (على اليمين).

لم تسمح تقنية سوفاج وزملائه الجديدة بتخليق الكاتينانات والروتاكسانات فحسب، بل سمحت بتخليق مجموعةٍ كبيرة من الأنظمة الجزيئية المُعقَّدة طوبولوجيًّا تحتوي على عُقد وروابط وأقفال. حقَّق ستودارد وسوفاج وزملاؤهم على مدار التسعينيات سلسلة من التطورات الرائدة في مجال التحكم في الحركة الانتقالية والدورانية للوحدات الفرعية الجزيئية داخل أنظمة الكاتينانات والروتاكسانات، وتشمل التحريك الحراري والضوئي الكيميائي والكهربي الكيميائي. ومع بداية الألفية خلَّق فريق سوفاج بنيةً روتاكسانية قادرة على التمدُّد والانضغاط؛ وهي بذلك شَبيه اصطناعي للمُحركات الحيوية الجزيئية التي تقوم عليها حركة العضلات. وسرعان ما أُتبع ذلك بتخليق ستودارد وآخرين (عام

٢٠٠٤) بنيةً روتاكسانية استطاعت ثنيَ عارضةٍ بارزة نانوية من الذهب من خلال آلية «عضلة جزيئية» مشابهة.

اتبع الفائز الثالث بجائزة نوبل في الكيمياء لعام ٢٠١٦، بِن فيرينجا، استراتيجيةً مختلفة إلى حدٍّ ما، وإن لم تقلَّ عن سابقتها ريادةً وابتكارًا، في تطوير آلات جزيئية. ففي عام ١٩٩٩ صنَّع فريقُ فيرينجا بجامعة جرونينجن الهولندية، بالتعاون مع باحثين من جامعة توهوكو، أولَ محرِّك جزيئي اصطناعي بمقدوره الحركة في اتجاهٍ واحد باستخدام طريقة عبقرية ودقيقة تسمَّى تصاوغ الروابط. وقد توصَّلوا إلى الحركة الأحادية الاتجاه من خلال إعادة تشكيل الروابط الكيميائية للجزيء، خطوةً خطوة، بطريقةٍ تضمَن دوران المحرك في اتجاه واحد فقط. وخلال السنوات التي تلت تخليق هذا المحرك الأول، أدخل فيرينجا وزملاؤه وشركاؤهم تحسينات جذرية على التصميم، ووصلوا إلى تردُّد دوران بلغ ١٢ ميجاهرتز عام ٢٠١٤.

لم يقتصر التطور في الآلات الجزيئية على الفائزين بجائزة نوبل وفِرقهم. فلم تلعب مجموعة ديفيد لي البحثية بجامعة مانشستر (وقبلها جامعة إدنبرة)، على سبيل المثال، دورًا محوريًّا في تطوير استراتيجيات مُبتكرة للآلات الجزيئية فحسب، بل أيضًا استكشفوا الروابط العميقة بين المعلومات والطاقة والإنتروبيا والأنماط في النطاق النانوي، كما حدث مع أعمال وينفري وروزرموند وسيمان وآخرين في تكنولوجيا النانو القائمة على الحمض النووي. ومرةً أخرى، كانت الطوبولوجيا الجزيئية — أي العُقد والسلاسل والروابط — مصدرَ إلهامٍ مستمرًّا لأعمال مجموعة لي. وقد عبَّر لي عن هذا بنفسه في مقابلة مع مجلة «كيمستري آند إنجينيرينج نيوز» عام ٢٠٢٠ كما يلي:

> يقول لي: «لطالما كان للنسج وعمل العُقَد تأثيرٌ تكنولوجي عظيم على البشر»، في إشارة إلى أن اختراع العُقد والأنسجة ساعد البشر على صنع الأسلحة والأدوات والشِّباك والأقمشة. «من ذاك الذي يقول إن الحال لن يكون نفسه مع البِنى الجزيئية؟»

يحمل فريق لي (ومعهم مشاركون من جامعة مانشستر) الرقمَ القياسي في موسوعة جينيس للأرقام القياسية لأرقِّ نسيجٍ نُسِج على الإطلاق. فقد قاموا بحياكة خيوط جزيئية كيميائيًّا في طبقات ثنائية الأبعاد لتشكيل نسيج ذي بِنيةٍ نانوية تبلغ كثافة خيوطه — أي عدد الخيوط في البوصة الواحدة — ٥٠ مليونًا، في مقابل كثافة خيوط بلغت قرابة

١٥٠٠ للكتان المصري الرقيق. ولأولئك الذين يُفضِّلون وحدات النظام الدولي، فإن هذه الكثافة تُعادل خيوطًا يبلُغ عرضها أربعة نانومترات.

وفي سلسلة من التطوُّرات والإنجازات خلال الأعوام العشرين الماضية أو نحو ذلك، طوَّر لي وزملاؤه مجموعةً مُذهلة من الآلات الجزيئية؛ منها محركات نانوية، وآلات مشَّاءة، وسقَّاطات معلوماتية — وهي آلات جزيئية تعمل بالضوء وتنقل المعلومات بدلًا من المواد — وأُضيف إليها حديثًا روبوتات جزيئية قابلة للبرمجة. أي روبوتات نانوية بعبارة أخرى. يُركِّز كثير من التصورات البائسة لمُستقبلنا الذي تقوده تكنولوجيا النانو — لا سيما رواية مايكل كرايتون «الفريسة» التي أشرت إليها في موضع سابق — على سيناريو ينفلت فيه زمام روبوتات نانوية قابلة للبرمجة وواعية للغاية. فهل ينبغي أن نخاف؟

الفصل السادس

هل باتت الروبوتات النانوية على مقربة؟

«شاي. إيرل جراي. ساخن.» ثم، وكأنه السِّحر؛ إذ فجأة يظهر مشروب كابتن بيكارد المُفضَّل من جهازٍ مُستنسخ في غرفته على متن سفينة «إنتربرايز» الفضائية. أكَّد المؤلِّف آرثر كلارك أن أي تكنولوجيا متقدمة بما فيه الكفاية لا يمكن تمييزها عن السِّحر. وتكنولوجيا جهاز المُستنسخ في «ستار تريك» تبدو ضربًا من السِّحر بلا شكٍّ في القرن الحادي والعشرين؛ فنحن أمام جهازٍ صغير يُمكنه تخليق أي مادة أو جسم تقريبًا، بما في ذلك الطعام والشراب والهواء الذي نتنفَّسه والثياب والدواء، من خلال تجميعها من مُكوِّناتها الخام. إن تلك المادة الخام، في «ستار تريك»، هي طاقةٌ نقية وليس واضحًا على الإطلاق كيف تحدُث عملية التحوُّل بين الطاقة والمادة في وحدة «مكتبية» صغيرة؛ فهو خيال علمي في النهاية.

لكن ماذا لو صار «بإمكاننا» تفكيك المادة إلى مكوِّناتها من الذرات أو الجزيئات، ثم إعادة بنائها بتركيبٍ مختلف تمامًا ووفقًا لمُخطط مُحدَّد مسبقًا؟ يبدو هذا تفاؤلًا لا حدود له عند الحديث عن تكنولوجيا جهاز المُستنسخ. غير أن الكيميائيين يفعلون ذلك طوال الوقت. فالبنى النانوية الاصطناعية المتنوعة التي تعرَّضنا لها على مدار هذا الكتاب، بدايةً من النانوكيد وصولًا إلى المحركات الجزيئية، تُعتبر في النهاية نتاجًا لهذه النوعية تحديدًا من التلاعب بالمادة: تفكيك المكونات الكيميائية الأولية من خلال التفاعلات الكيميائية، وإعادة ترتيب الذرات المكوِّنة لها لتكوين بنًى جديدة. فما هذه سوى الكيمياء التقليدية وقد كنا نمارسها، كما يزعم، منذ اكتشاف النار في عصورِ ما قبل التاريخ.

إذن فلدَينا بالفعل التكنولوجيا الكيميائية اللازمة لإعادة ترتيب الوحدات البنائية الذرية والجزيئية للمادة وتحويلها إلى أشكال أخرى مُحدَّدة بدقة. فما الذي يجعل جهاز المستنسخ يبدو «سحريًّا» بهذا القدْر من منظورنا في القرن الحادي والعشرين؟ حسنًا،

أحد الأسباب أن الجهاز يُحضِّر المادةَ من الخواء؛ أو أيًّا كان نوع الطاقة الغامض المُستخدَم في عالم «ستار تريك». لكن مسألة «التجهيز حسب الطلب» هو الجانب الذي نراه وكأنه قادم من عالَم آخر في هذه التكنولوجيا. فنحن مُعتادون أن نطرح على المساعد الذكي «سيري» سؤالًا ونحصل على إجابةٍ شبه فورية؛ أعترف أنها تكون إجابةً خاطئة أحيانًا، لكنه على الأقل يُداوم على المحاولة. أما ما يُقدِّمه لنا جهاز المُستنسخ فليس معلومات، كما يفعل «سيري»، بل يُقدِّم لنا «مادة» تُجهَّز حسب الطلب وتُشكَّل على النحو الذي نريده.

قارن البعض جهازَ المُستنسخ بنوعيةٍ أخرى من التكنولوجيا المستقبلية تُعرف بالمُجمِّع الشامل أو المُجمِّع الجزيئي. هذا المفهوم مُستمَد بدوره من رؤيةٍ لتكنولوجيا النانو طالها نقدٌ واسع طرحها كيه إريك دريكسلر في ثمانينيات القرن الماضي ووصفها بإسهاب في كتبه «محركات التخليق: عصر تكنولوجيا النانو المقبل»، و«الأنظمة النانوية»، و«الوفرة الراديكالية». يتخيل دريكسلر عالمًا مُستقبليًّا مثاليًّا مدعومًا بتكنولوجيا النانو، حيث يقوم المُجمِّع الجزيئي بعملية تصنيع بدقةٍ ذرية «ستصير قادرةً على صنع أي شيءٍ تقريبًا من موادَّ شائعة بلا جهد بَشري، فتحل أنظمة نظيفة كالغابات محلَّ المصانع ذات الأدخنة».

لكَم سيكون هذا العالَم رائعًا! إن نسخة دريكسلر من التكنولوجيا النانوية تُعَد تصورًا ملهمًا ومشجعًا لما قد يمكن أن يكون عليه الحال إن استطعنا تصنيعَ منتجات بدقةٍ ذرية. والجدير بالمُلاحظة هنا أن جوهر رؤية دريكسلر، وهو الكيمياء الخاضعة للتحكُّم الحاسوبي لا على مستوى الذرات المُفردة فحسب، بل أيضًا على مستوى «الروابط الكيميائية المفردة»، تنفَّذ الآن في عددٍ كبير من معامل علوم النانو عبر جميع أنحاء العالم (كما رأينا على مدار الفصول السابقة). يُساورني بعض التردُّد في تسمية عملية التلاعُب بالروابط الكيميائية في المادة واحدة تلوَ الأخرى عمليةً روتينية حتى الآن، ولكنها صارت بالتأكيد تقنيةً راسخةً معتمَدة لدى كثيرٍ من المجموعات البحثية التي تستخدِم مجهر المسبار الماسح.

نشبت نقاشاتٌ وجدالات مُحتدِمة عبر أوساط علوم النانو خلال التسعينيات وبداية الألفية حول احتمالية تحوُّل أجهزة المجمع الشامل إلى واقع، ومُنتهى القدرات والإمكانيات والمخاطر المرتبطة بقدرة تكنولوجيا النانو على تركيب المادة، ذرةً بذرة. ولا تزال أصداء تلك النقاشات تتردد بوضوح حتى اليوم، لا سيما فيما يتعلق بواجهات التفاعل بين الإنسان والآلة التي تُطوِّرها شركة نيورالينك التابعة لإيلون ماسك.

بالرغم مما اتَّسم به إريك ديكسلر من بُعد نظر وفطنة حين تنبَّأ بإمكانية تنفيذ التفاعلات الكيميائية بدقةٍ ذرية بواسطة التحكُّم الحاسوبي — وذلك قبل أعوام من اختراع أول مجهر مسبار ماسح في أوائل الثمانينيات — فقد تعرَّض للتوبيخ والانتقاد على نطاقٍ واسع، ليس فقط من علماء النانو، بل من المجتمع العلمي الأعم. ولكي نفهم لِمَ أثار دريكسلر كلَّ هذا التنديد الذي أثاره، نحتاج أولًا إلى النظر في فكرته عن المُجمع الشامل ومفهوم التخليق الميكانيكي المُرتبط به. وكما هو الحال مع جهاز المُستنسِخ في «ستار تريك»، فلا تزال هذه الأفكار قابعةً في عوالم الخيال العلمي لم تبرَحه، إلا أن مبادئ عملها، على الأقل، قابلةٌ للتعريف على نحوٍ أفضل إلى حدٍّ ما: بدلًا من التحوُّل المُبهم للطاقة إلى مادة، تنطوي تكنولوجيا النانو وفقًا لتصوُّر دريكسلر على تحويل المادة من صورةٍ إلى أخرى.

قد يبدو هذا أشبَهَ بخيمياء على طراز القرن الحادي والعشرين، غير أن هذا التلاعُب بالمادة يحدُث على مستوى الروابط الكيميائية لا الأنوية الذرية. فنحن لا نُحوِّل عنصرًا إلى عنصر آخر؛ أي لا نحوِّل موادَّ «رخيصةً» إلى ذهب. بل سيقوم جهاز المُجمِّع الشامل المُستقبلي بتفكيك المادة وإعادة بنائها بالترتيب الجديد الذي نحتاج إليه من خلال تلاعُب كيميائي ميكانيكي بالذرات والجزيئات: ستتشكَّل الروابط الكيميائية عن طريق إقحام الذرات حرفيًّا معًا في المواضع المناسبة المطلوبة لتشكيل المُنتج المرغوب، سواء كان ذلك المنتج كوبًا ساخنًا من شاي «إيرل جراي»، أو زوجًا جديدًا من الجوارب، أو حاسوبًا كموميًّا في الحالة الصلبة. يُطلِق دريكسلر على هذه العملية أسماءً شتى، مثل التخليق الميكانيكي، وكيمياء الحالة الآلية، والتصنيع الجزيئي. وإذا أمكن بلوغ مثل هذه التكنولوجيا فعلًا، فستُمثل قمةَ أشكال تكنولوجيا النانو.

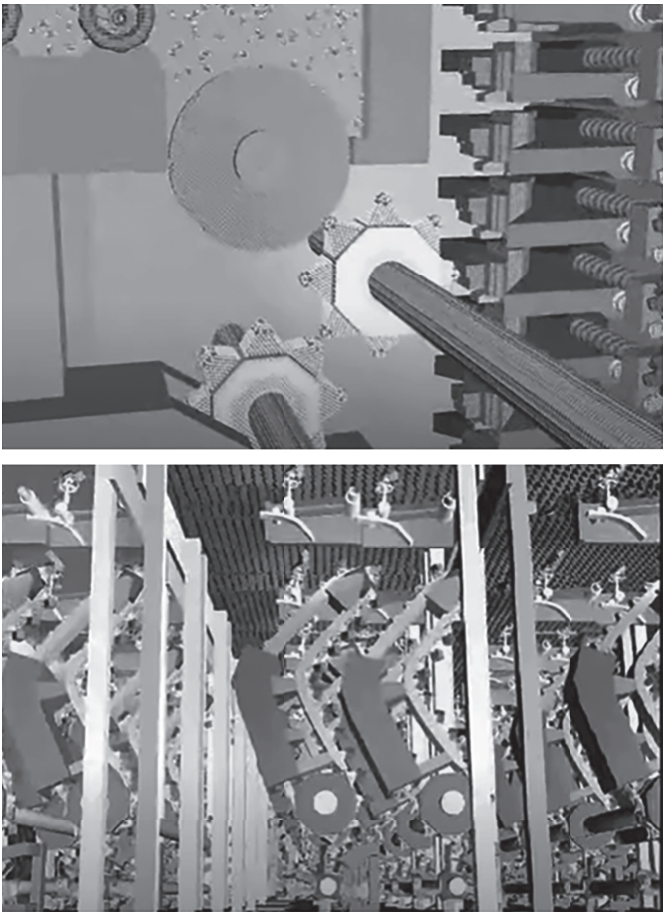
إن تكنولوجيا النانو في الحالة الآلية وفق مفهوم دريكسلر هي في الواقع الهندسة الواقعية التي نعرفها، ولكن في صورةٍ مصغرة. مصغرة جدًّا. توضع موادٌّ خام — جزيئات بسيطة كالإيثين C_2H_2 والميثان CH_4 على سبيل المثال — في آلة للتصنيع، وهي آلة لن تشغَل حيزًا في مطبخك أكثرَ مما يشغله فرن ميكروويف حديث، على عكس نظيرها من آلات الثورة الصناعية العملاقة. فقبل وقتٍ طويل من ابتكار الطباعة الثلاثية الأبعاد، وضع دريكسلر تصورًا لتكنولوجيا للتلاعُب بالمادة تُشبه في جوهرها طباعةً ثلاثية الأبعاد، ولكن بالذرات. في مثل هذه المصانع النانوية، تُربط الجزيئات بعضها ببعض مكوِّنة جسيماتٍ نانوية، يُربَط بعضها ببعض هي الأخرى لتكوين جسيمات ميكروية، تترابط بدَورها معًا

لإنشاء بِنية دون المليمتر، ومن ثَم تتصاعد لنطاقات أطوال أكبرَ بكثير؛ بعبارة أخرى، كأنها تَتَابُع هرَمي من قِطع الليجو، يُشكل في النهاية بنًى ماكروسكوبية نستخدمها في حياتنا اليومية كأجهزة الكمبيوتر والسيارات والبيوت.

يعرض شكل ٦-١ صورتَين مأخوذتَين من فيلم للرسوم المتحركة جُمِّعا معًا من قِبل شركة تُدعى «نانوريكس» في ٢٠٠٥؛ لتوضيح بِنية المصانع النانوية وآلية عمل التصنيع الميكانيكي. يُغذَّى المصنع بجزيئاتٍ بسيطة صغيرة (هي الإيثين C_2H_2 في حالتنا هذه)، ثم تُفكك وتُمرَّر عبر سلسلةٍ من العجلات والروافع والسيور الناقلة تعمل بدقةٍ ذرية. تُنقَل الجزيئات والذرات ويُربَط بينها لبناء بِنية أعقد، حتى يتجلَّى أمامنا في النهاية كمبيوتر محمول. ليس هذا بكمبيوتر محمول عادي بكلِّ تأكيد؛ بل هو جهاز صُنِّع بدقةٍ في مستوى الذرات المفردة؛ ومن ثَم فهو خالٍ من العيوب المتعارَف عليها في الطريقة التنازلية في معالجة المواد وتصنيع أجهزة أشباه المُوصِّلات التي ناقشناها في الفصل الثالث.

صحيح أن المصانع النانوية الموصوفة أعلاه هي ضربٌ من الخيال العلمي، مثلها مثل جهاز المُستنسخ في «ستار تريك». لكن السؤال المهم هو: ما عيب مفهوم التصنيع الجزيئي؟ هل يُخالف قواعدَ أساسية في الفيزياء أو الكيمياء؟ هل ينتهك القانون الثاني في الديناميكا الحرارية؟ هل يتعارَض مع قانون بقاء الطاقة؟ ما دامت الكيمياء تسمح بالفعل بتفكيك المادة ومزْج المكونات الكيميائية لتكوين مركبات جديدة، لماذا إذن أدى توسيع دريكسلر لمدى هذه الإمكانية لتصل إلى «حالة آلية» خاضعة للتحكم الحاسوبي إلى إثارة كل هذه الجلبة؟ لقد اتُّهم دريكسلر بأنه مهووس ومُضلَّل، ولاقى مفهومه عن التصنيع الجزيئي رفضًا باعتباره مُستحيلًا جوهريًّا. حتى إن العالِم الراحل ريتشارد سمولي، أحد أعلام مجتمع علماء النانو الحائز جائزةَ نوبل (لدوره في اكتشاف جزيء البوكمنسترفلورين)، وعالِم الكيمياء (النانوية) الفذ، رفض أفكار دريكسلر لكونها غير عملية أبدًا وشديدة السذاجة:

> مثلما لا يُمكن أن تدفع فتًى وفتاة للوقوع في الحُب بدفع أحدهما نحو الآخر ببساطة، لا يُمكنك كذلك أن تُحدِث كيمياء دقيقة بين جسمَين جزيئيَّين كما تريد بحركاتٍ ميكانيكية بسيطة تحدث عبر بضع درجات من الحرية داخل محور الإسناد المُثبَّت بجهاز المُجمِّع الشامل. فالكيمياء أعقد من هذا، مثلها مثل الحب.



شكل ٦-١: صورتان مأخوذتان من فيلم رسوم مُتحركة عن مفهوم المصانع النانوية الجزيئية/المُجمِّع الذي طرحه كيه إريك دريكسلر.

الأسوأ من ذلك أن سمولي قد صوَّر دريكسلر غولًا يُهدد علوم النانو، وأن أفكاره عن أجهزة التجميع الشامل والروبوتات النانوية الذاتية التكاثر ليست في غير محلِّها فحسب، بل إنها أفكار مزعجة وبشِعة.

رغم أن دريكسلر لم يُفِد فكرته بشيء بتنبؤاته الجامحة المُفرطة في التفاؤل عن الإطار الزمني لتطوير إمكانية التصنيع الجزيئي التي استشرف ظهورها — مُشيرًا في عام ٢٠٠١ إلى أنها «تبعُد عنَّا ما بين عَقد وثلاثة عقود»، فإن كثيرًا من النقد الذي وجَّهه سمولي (وكثيرون غيره) لم يكن عادلًا وحرَّف حُجَجه التي يقوم عليها التركيب الميكانيكي والتصنيع الجزيئي.

هذا لا يعني أن رؤيةَ ديكسلر لتكنولوجيا النانو، كما وصفها في كتابه «الأنظمة النانوية»، ليست متاحةً للنقد المُستمر. بل على العكس تمامًا. فهناك أمورٌ كثيرة ما زالت لم تُحسَم بعدُ في فكرة التسلسُل الهرمي للتجميع الآلي — من المستوى النانوي (أو دون ذلك) إلى المستوى الماكروسكوبي — التي ربما يكون أفضل تلخيصٍ لها مقولة الفيزيائي فولفجانج باولي البليغة: «خلق الله الموادَّ الصلبة، لكن الأسطح من عمل الشيطان». وتلعب فيزياء وكيمياء هذه الأسطح «الشيطانية» دورًا محوريًّا في تكنولوجيا النانو وعلوم النانو بكل أشكالهما، وليس في تكنولوجيا دريكسلر المستقبلية للتصنيع الجزيئي فحسب؛ فعندما نُفتِّت كتلَ المادة التي يُمكننا حملها بين أيدينا إلى عناقيدَ نانوية مُتناهية الصغر تتألَّف من ذراتٍ معدودة، تزداد نسبة مساحة السطح إلى الحجم زيادةً مهولة. ومن جوانب عديدة، يُعَد علم الأسطح وعلوم النانو مُترادفين عمليًّا؛ وبالفعل غيَّر كثير من علماء الأسطح وصْف أنفسهم إلى علماء نانويين مع ظهور تكنولوجيا النانو في التسعينيات.

على الرغم من هذه الصعوبات التي تكتنف نظامَ التصنيع الجزيئي الذي طرحه دريكسلر، وعلى الرغم من (أو ربما بسبب) الضجة المحيطة به، فمن الواضح أن رؤيته قد تركت أثرًا بالغًا في ثلةٍ من علماء النانو على الأقل (ولا بد أن أعترف بأنني واحد من هؤلاء). فعلى الرغم من أن تكنولوجيا الروبوت الجزيئي (أو الروبوت النانوي) التي طرحتها مجموعة لي، وأتَينا على ذِكرها بإيجاز في الفصل السابق، تختلف اختلافًا شاسعًا عن التكنولوجيا التي تصوَّرها دريكسلر، فإنهم يُشيرون إلى أفكاره عند وصف خلفية عملهم ودوافعه. ويبدو أنه كان على الأقل مسئولًا جزئيًّا عن إلهام أبحاثهم (وأبحاث آخرين غيرهم). رغم ذلك، تدعم أبحاثهم زعْم فيليب بول بأن «دريكسلر قد انتهى إلى اقتراح الطريقة الصعبة لإتمامِ ما يمكن تحقيقه بطرقٍ أسهل (وأسرع) باستخدام بعض الإبداع الكيميائي». ولا يزال الطريق أمامنا طويلًا قبل أن نُضطر إلى القلق من أن تُحولنا الروبوتات النانوية الذاتية التكاثر إلى هلام رمادي (أو جراي جوو) بحسب الوصف المشهور للأمير تشارلز. وقد أسهمت هذه التصريحات، جنبًا إلى جنبٍ مع القصص المُخيفة

التي تنشرها وسائل الإعلام، في تشكيكٍ غير مُبرَّر من جانب الجماهير في تكنولوجيا النانو من شأنه أن يُلقي بتداعِيات سلبية طويلة الأمد. هناك تحدياتٌ تكنولوجية واجتماعية وسياسية أكثر إلحاحًا بكثيرٍ يجب على المجتمع مواجهتها، وفي مُقدِّمتها التغيُّر المناخي (وهي مشكلة بإمكان تكنولوجيا النانو أن تُسهِم في إيجاد حلول لها بلا شك)، أكثر من غزو الروبوتات النانوية.

رغم ذلك، سيكون تهاونًا منِّي أن أُقلِّل من أهمية المخاوف الواقعية التي يُبديها العديد من علماء النانو حول التأثيرات السلبية على الصحة والأضرار البيئية المُحتملة التي قد تتسبَّب فيها المواد ذات البِنى النانوية. فقد قضت كريستي سيز، الأستاذ المساعد بقسم علوم البيئة في جامعة بايلور، وفريقها عقودًا في دراسة تأثير الجُسيمات النانوية والأنابيب النانوية وغيرها من المواد ذات البِنية النانوية على الأنسجة الحيَّة والأنظمة الحيوانية (بما في ذلك البشَر). وعلى الرغم من أنه كثيرًا ما كان يفترض أن المواد النانوية قد تنطوي على تأثيراتٍ سامَّة جديدة تختلف كليًّا عن المواد الأخرى الأكثر تقليدية، تُشير سيز إلى أن المنشورات البحثية في هذا الصدد لا تدعم هذا الرأي. بدلًا من ذلك، تنجم السُّمِّية الزائدة للمواد النانوية من صِغَر حجمها الذي يُمكِّنها من الدخول إلى الخلايا والأنسجة بطريقةٍ غير مُتاحة للجسيمات الميكروية والجسيمات الأكبر حجمًا:

> على سبيل المثال، عند نثرِ جسيمات نانوية في الهواء في صورةِ رذاذ واستنشاقها، يكون بمقدورها أن تصل إلى مناطقَ بعيدة في الرئة لا تستطيع الجسيمات الأكبر أن تستقر فيها أو تصِلها. لكن مدى السُّمِّية أو الجرعة اللازمة لظهور آثار جانبية تكون أقلَّ كثيرًا عندما تتعرَّض لمادة نانوية مما لو تعرَّضت لجسيماتٍ كبيرة أو ميكروية.

بعبارة أخرى، تكمن المسألة في التعرُّض ومداه؛ فالأمر يستلزم عددًا أقل من الجسيمات النانوية لإحداث التأثير نفسه الذي تُحدِثه الجسيمات الأكبر. ومرة أخرى تلعب الأسطح دورًا مركزيًّا هنا. ففي ورقةٍ بحثية بالغة الأثر وكثيرًا ما يُستشهَد بها، وجدت سيز وزملاؤها أن إحداث تغييرات بسيطة نِسبيًّا في سطح جزيء البوكمنسترفوليرين (تتضمَّن إضافة مجموعات كيميائية لجعل الجزيء أفضل ذوبانًا في الماء) نتج عنه تأثير هائل على سُميته في مزارع الخلايا البشرية. ومن المُثير للاهتمام أن جرعة الفوليرين القاتلة تغيَّرت «سبع قِيَم أسية» في البوكمنسترفوليرين غير المُعالَج مقارنةً بنظرائه المُعدَّلة

كيميائيًّا. بالإضافة إلى ذلك، نتجت السُّمِّية من تمزُّق الأغشية الخلوية. بالمِثل يمكن لكثيرٍ من الجسيمات النانوية الأخرى أن تخترق أو تمزِّق الأغشية البيولوجية، فتتحرَّك خلال الخلايا والأنسجة وتُحدِث أضرارًا بيوكيميائية وتُسرِّع من تفاقُم الأمراض.

في هذا السياق، لا تُعتبَر أسراب الروبوتات النانوية ذات الوعي مصدرَ قلقٍ ملحًّا. فيركز مُجتمع بحوث السُّمِّية النانوية، في المقابل، على القضايا الصحية والبيئية الحقيقية بدلًا من تكريس وقتِهم للتعامُل مع تهديدٍ وجودي لا يزال حتى وقتنا الحالي حبيسَ عوالم الخيال العلمي. رغم ذلك، فهناك تَنامٍ سريع، في وقت كتابة هذا النص، في الأبحاث التي تربط بين تكنولوجيا النانو والذكاء الاصطناعي، بإدخال التعلُّم الآلي في مجموعةٍ واسعة من المشكلات، تشمل التحكُّم في المادة في النطاقات النانومترية والجزيئية والذرية. لكن مثل هذه الأعمال من المُستبعَد بالتأكيد أن تؤدي إلى نوعية الواقع التكنولوجي النانوي المرير التي يتنبَّأ بها رائد الأعمال وصاحب التنبؤات المستقبلية راي كرزويل:

> بحلول نحو عام ٢٠٣٠، ينبغي أن نكون قادِرين على غمر أدمغتنا بروبوتات نانوية يمكن إطفاؤها وتشغيلها وتعمل باعتبارها «أجهزة عرض للتجارب» تُتيح لنا معايشةَ تجارب الآخرين الحسِّية على وسعها ... ستوسع الروبوتات النانوية الذكاء البشري أيضًا بآلاف أو ملايين المرات. وبحلول عام ٢٠٣٠، سيكون التفكير غير البيولوجي أقوى بتريليونات المرَّات من التفكير البيولوجي.

يُمكنني أن أتنبَّأ بثقةٍ أنه بحلول عام ٢٠٣٠ لن تكون أدمغتنا مُغرقةً بالروبوتات التي تعرِض الخبرات الحسِّية وتنقلها من شخصٍ إلى آخر. بدلًا من ذلك، سيستمر الباحثون في دمج خوارزميات التعلُّم الآلي في جوانبَ شتَّى من تكنولوجيا النانو، لكنها أقل خيالية وأكثر أخلاقية بكثير، وأقل بؤسًا إلى حدٍّ بعيد، من بينها التصنيف التصويري والطيفي في مختلف أنواع الفحص الميكروسكوبي، وأتمتة المهام التي تستغرق وقتًا طويلًا، مثل استمثال رأس مِجهر نافذ ماسح أو مجهر للقوة الذرية، ووضع الذرات والجزيئات منفردةً في مواضعها.

وقد باتت الأخيرة تحدُث بالفعل. فقد نُشرت ورقة بحثية رائدة بعنوان «التصنيع النانوي الروبوتي المُستقل من خلال التعلُّم التعزيزي» للباحث كريستيان فاجنر وزملائه في مركز أبحاث يوليش في عام ٢٠٢٠؛ حيث يشرح المؤلِّفون كيف تم توجيه مِجهر مسبار ماسح ليلتقِط جزيئاتٍ مُفردة دون تدخُّل بشري. ويُعَد هذا أعلى إنجاز تقني في مجال

الدمج بين الشبكات العصبية الاصطناعية والتكنولوجيا النانوية في وقتِ كتابة هذا النص، إلا أنه مجرد طرف الخيط لِما يمكن تحقيقه. ومن المُتوقَّع أن تشهد السنوات القادمة تطوراتٍ سريعة في المنهجيات التي تجمع بين التعلُّم الآلي والتكنولوجيا النانوية، بحيث لا تظلُّ عنصرًا مُتخصِّصًا نادرًا، بل جزءًا أساسيًّا في تصوير المواد ومُعالجتها وتحليلها طيفيًّا على النطاق النانوي.

على الرغم من أن ذلك يعني أن أسراب الروبوتات النانوية لن تُداهمنا عمَّا قريب، فقد باتت تكنولوجيا النانو تُتيح لنا التحكُّم في المادة بطرقٍ لم يكن يُمكننا تصوُّرها منذ عقدٍ واحد حتى. ففي خلال إطارٍ زمني لا يتعدَّى جيلًا واحدًا، تقدمنا من عقليةٍ يرى فيها التيار الرئيسي في المجتمع العلمي أن القدرة على تحريك ذرةٍ مفردة ستظلُّ للأبد مجردَ تجربةٍ تخيلية، إلى التجميع الموجَّه للبنى النانوية رابطةً كيميائيةً تلو الأخرى. ومن هذا المنظور، يُصبح العلم أكثرَ تشويقًا وإثارة حتى من الخيال العلمي.

قراءات إضافية

الفصل الأول: مرحبًا بك في عالم الأقزام النانوية

Synthesis of anthropomorphic molecules: the NanoPutians, Stephanie H. Chanteau and James M. Tour, *Journal of Organic Chemistry* 68, 23, 8750–66 (2003).

Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, The Royal Society and the Royal Academy of Engineering; (https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2004/9693.pdf).

Scanning Probe Microscopy: From Sublime to Ubiquitous, American Physical Society collection of influential SPM papers. (https://journals.aps.org/prl/scanning-probe-microscopy).

Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, D. M. Eigler and E. K Schweizer, *Nature* 344, 524–6 (1990).

Feynman's fancy, Philip Ball, *Chemistry World* 8 Jan. 2009.

There's plenty of room at the bottom, R. P. Feynman, *Engineering and Science* 23, 22–36 (1960). (https://calteches.library.caltech.edu/1976/1/1960Bottom.pdf).

Van der Waals interactions and the limits of isolated atom models at interfaces, S. Kawai et al., *Nature Communications* 7, 11559 (2016).

Perplexed by Pauli, P. Moriarty, (https://muircheartblog.wpcomstaging.com/2014/08/15/perplexed-pauli/).

الفصل الثاني: عالم الكم محاصرًا

A Boy and His Atom, (https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0)

Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface, M. F. Crommie, C. P. Lutz, and D. M. Eigler, *Science* 262, 218 (1993).

For much more on the deep links between the physics of music—in particular, heavy metal—and quantum mechanics, see *When the Uncertainty Principle Goes to 11*, P. Moriarty (Ben Bella Books, 2018).

Quantum rings engineered by atom manipulation, Van Dong Pham, Kiyoshi Kanisawa, and Stefan Fölsch, *Physical Review Letters* 123, 066801 (2019).

Realization of a particle-in-a-box: electron in an atomic Pd chain,N. M. Nilius, T. M. Wallis, and W. Ho, *J. Phys. Chem. B* 109, 20657 (2005).

Michael Faraday's gold colloids, (https://www.rigb.org/our-history/iconic-objects/iconic-objects-list/faraday-gold-colloids).

(https://www.lancaster.ac.uk/news/the-nano-guitar-string-that-plays-itself)

Welcome to Clusterworld, Richard Palmer, *New Scientist* 22 Feb. 1997.

الفصل الثالث: التفكيك التنازلي، والبناء التصاعدي

ENIAC in Action: Making and Remaking the Modern Computer, Thomas Haigh, Mark Priestley, Crispin Rope, William Aspray, Thomas J. Misa (MIT Press, 2016).

Crystal Fire: The Birth of the Information Age, Michael Riordan and Lillian Hoddeson (W. W. Norton & Company, 1997).

Atomic-scale desorption through electronic and vibrational excitation mechanisms, T.-C. Shen et al., *Science* 268, 1590 (1995)

An Atomic Christmas Tree, Sixty Symbols—(https://www.youtube.com/watch?v=gRF9hM_eFPU)

Drying mediated self-assembly of nanoparticles, Eran Rabani et al., *Nature* 426, 271 (2003).

Disorder—a cracked crutch for supporting entropy discussions, Frank Lambert, *Journal of Chemical Education* 79, 187 (2002) Lambert's other engaging and influential papers on the subject of entropy are thoroughly recommended and can be sourced via his Wikipedia page.

Random tiling and topological defects in a two-dimensional molecular network, M. O. Blunt et al., *Science* 322 1077 (2008)

Digital alchemist seeks rules of emergence, interview with Sharon Glotzer, *Quanta* 2017.

(https://www.quantamagazine.org/digital-alchemist-sharon-glotzer-seeks-rules-of-emergence-20170308/)

Self-organization: the fundament of cell biology, Roland Wedlich-Söldner and Timo Betz, *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373, 20170103 (2018)

The beauty and utility of DNA origami, P Wang et al., *Chem* 2, 359 (2017).

Transcript of Konstantin Novoselov's Nobel Prize speech (https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/novoselov/lecture/)

الفصل الرابع: المعلومات أصل الموجودات

Quotation from Ada Lovelace, *Scientific Memoirs Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies* (1843), Article XXIX

Information, physics, quantum: the search for links, John A. Wheeler, *Proceedings of the Third International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics*, Tokyo, pp. 354–68 (1989), available at (https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf)

Molecular computation of solutions to combinatorial problems, L. M. Adleman, *Science* 266, 1021 (1994).

Feynman Lectures in Computation, published in paperback by Westview Press (2000).

Negative differential resistance on the atomic scale: implications for atomic scale devices, In-Whan Lyo and Phaedon Avouris, *Science* 245, 1369 (1989).

Molecule cascades, A. J. Heinrich, *Science* 298, 1381 (2002)

A kilobyte rewritable atomic memory, F. E. Kalff et al., *Nature Nanotechnology* 11 926 (2016).

Quantum holographic encoding in a two-dimensional electron gas, C. R. Moon et al., *Nature Nanotechnology* 4, 167 (2009).

Binary atomic silicon logic, T. Huff et al., *Nature Electronics* 1, 636 (2018).

Spin mapping at the nanoscale and atomic scale, Roland Wiesendanger, *Rev. Mod. Phys.* 81, 1495 (2009).

Coherent spin manipulation of individual atoms on a surface, Kai Yang et al., *Science* 366, 509 (2019).

Silicon quantum computing: (https://sqc.com.au)

الفصل الخامس: الآلات النانوية

How to build and race a fast nanocar, G. J. Simpson, *Nature Nanotechnology* 12, 604 (2017)

Kinesin motor transports vesicle along microtubule, (https://www.youtube.com/watch?v=plvQCOE9s_k)

Supraheroes, Emma Stoye, *Chemistry World* 14 Oct. 2016, (https://www.chemistryworld.com/features/supraheroes/1017562.article)

Brownian ratchets: Darwin's motors, George Oster, *Nature* 417, 25 (2002)

Construction of artificial cilia from microtubules and kinesins through a well–designed bottom–up approach, R. Sasaki et al., *Nanoscale* 10, 6323 (2018)

Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor, Ricky K. Soong et al., *Science* 290, 1555 (2000)

Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2016, Royal Swedish Academy of Sciences, (https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced–chemistryprize2016–1.pdf).

Chemical topology: complex molecular knots, links, and entanglements, Ross S. Forgan, Jean–Pierre Sauvage, and J. Fraser Stoddart, *Chem. Reviews* 111, 5434 (2011)

Light–driven monodirectional molecular rotor, N. Koumura, *Nature* 401, 152 (1999)

الفصل السادس: هل باتت الروبوتات النانوية على مقربة؟

The debate between Smalley and Drexler was published in *Chemical & Engineering News* in Dec. 2003: (http://pubsapp.acs.org.ezproxy.nottingham.ac.uk/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html)

Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, K. Eric Drexler (John Wiley & Sons, Inc., 1992)

Small problems, Philip Ball, *Nature* 362, 123 (1993). A review of Drexler's *Nanosystems*.

Stereodivergent synthesis with a programmable molecular machine, S. Kassem et al., *Nature* 549, 374 (2017)

Pick–up, transport and release of a molecular cargo using a small–molecule robotic arm, S. Kassem et al., *Nature Chemistry* 8, 138 (2016)

Autonomous robotic nanofabrication with reinforcement learning, P. Leinen et al., *Science Advances* 6, eabb6987 (2020)

قائمة الصور

(1–1) “NanoKid”, one of a family of NanoPutian molecules synthesized by Stephanie H. Chanteau and James M. Tour of the Center for Nanoscale Science and Technology at Rice University.

(1–2) The scanning probe microscope achieves atomically precise imaging and manipulation of matter by scanning an ultrasharp tip, terminated by a single atom, very close to a surface. (Reprinted by permission from Eigler, D. M., and Schweizer, E. K., ‘Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope’, *Nature* 344, no. 6266 (1990) © 1990 by Springer Nature.)

(1–3) The variation in force between two atoms as their separation is varied, calculated using the Lennard–Jones potential. (Reprinted with permission from “Van der Waals interactions and the limits of isolated atom models at interfaces”, Kawai, S., et al., *Nature Communications* 7, 11 559 (2016). © Springer–Nature 2016.)

(2–1) Frames from “A Boy and His Atom”, the world’s smallest stop motion video, created by a team of nanoscientists at IBM Research Labs (Almaden) led by Andreas Heinrich.

(2–2) A quantum corral comprising 48 iron atoms, each positioned using the tip of a scanning tunnelling microscope, on the surface of a copper crystal, and a standing wave formed in a vibrating cup of coffee.

(2–3) There are very close parallels between the standing waves that form on guitar strings and the probability waves associated with electrons in nanostructures. (Reprinted from “Quantum rings engineered by atom manipulation”, Van Dong Pham, Kiyoshi Kanisawa, and Stefan Fölsch, *Physical Review Letters* 123, 066801 (2019). © American Physical Society 2019.)

(2–4) From energy levels to bands.

(3–1) Top–down semiconductor processing: nanolithography.

(3–2) Atomically precise nanolithography. (Images taken from the work of Michelle Simmons and colleagues at the University of New South Wales, and Joseph Lyding and colleagues at the University of Illinois at Urbana–Champaign.)

(3–3) (a) Electron microscope image of 7 nm field effect transistors fabricated on a silicon chip; (b) Self–assembled lattice of proteins (an S–layer) from the Sulfolobus archaeon. ((a) Taken from (https://www.tsmc. com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_7nm.) (b) Taken from Architecture and modular assembly of Sulfolobus S–layers revealed by electron cryotomography, Lavinia Gambelli et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* 116, 25 278 (2019).)

(3–4) A scanning tunnelling microscope image of a single self–assembled layer of a molecule.

(3–5) Examples of far–from–equilibrium organization of gold nanoparticles on a silicon wafer. (Taken from the work of the Nottingham Nanoscience Group.)

(3–6) Foams and cellular networks in nature. (S. P. Silva, M. A. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel & R. L. Reis (2005)

Cork: properties, capabilities and applications, International Materials Reviews, 50:6, 345–365, DOI: 10.1179/174328005X41168, copyright © Institute of Materials, Minerals and Mining and ASM International, reprinted by permission of Taylor & Francis Ltd, http://www.tandfonline.com on behalf of Institute of Materials, Minerals and Mining and ASM International.)

(3–7) DNA origami. (Taken from (https://www.nanowerk.com/news/newsid=21020.php).)

(3–8) Carbon nanotechnology.

(4–1) Molecular computing. (From Molecule cascades, A. J. Heinrich et al., *Science* 298, 1381 (2002).)

(4–2) Plenty of room at the bottom: Feynman's celebrated 1959 speech encoded in single atom vacancies in a chlorine lattice. (From A kilobyte rewritable atomic memory, FE Kalff et al., *Nature Nanotechnology* 11, 926 (2016).)

(4–3) Sub–atomic precision. Image © Hari Manoharan, Stanford University.

(4–4) Dangling bond logic. (Adapted from Binary atomic silicon logic, T. Huff et al., *Nature Electronics* 1, 636 (2018).)

(4–5) Artist's impression of how a scanning tunnelling microscope, with a suitably chosen magnetic tip, images spin orientation at a surface.

(5–1) Chemical structure of Dipole Racer, the winner of the first NanoCar race, and artist's impression of kinesin, a motor protein. (Top image adapted from How to build and race a fast nanocar, *Nature Nanotechnology* 12, 604 (2017).)

(5–2) The basic operating principle of a Brownian ratchet.

(5–3) A DNA knot. (Krasnow, M., Stasiak, A., Spengler, S. et al. Determination of the absolute handedness of knots and catenanes of DNA. Nature 304, 559–560 (1983). https://doi.org/10.1038/304559a0.)

(5–4) Schematic illustrations of the molecular classes known as rotaxanes and catenanes.

(6–1) Two frames from an animation of the molecular nanofactory/assembler concept put forward by K. Eric Drexler.

هنـــداوي